

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет екологічної безпеки, інженерії та технологій
Кафедра хімії і хімічної технології

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____ А. Кустовська
« ____ » _____ 2022р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «БАКАЛАВР»
за спеціальністю: 161 «Хімічні технології та інженерія»
освітньо-професійної програми «Хімічні технології альтернативних
енергоресурсів»

Тема: «Водень як безвуглецеве паливо для авіації»

Виконавець: Іванов Віктор Андрійович, група АП-407 Б _____

Керівник: доцент, к.х.н. Новоселов Є.Ф. _____

Нормоконтролер: доцент, к.х.н. Максимюк М.Р. _____

Київ 2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет екологічної безпеки, інженерії та технологій
Кафедра хімії і хімічної технології
Спеціальність: 161 «Хімічні технології та інженерія»
ОПП «Хімічні технології альтернативних енергоресурсів»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ А. Кустовська
« ____ » _____ 2022р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Іванов Віктор Андрійович

1. Тема роботи: «Водень як безвуглецеве паливо для авіації», затверджена наказом ректора від 20.04.2022р. № 417/ст
2. Термін виконання роботи: з 23 травня 2022 р. по 19 червня 2022 р.
3. Вихідні дані до роботи: газоподібний та скраплений водень, обладнання для збереження скрапленого водню, методи збереження газоподібного та скрапленого водню, використання водню як безвуглецевого альтернативного палива для авіації.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Розділ 1. Літературні дані по особливостям водню як альтернативного палива. Розділ 2. Методи використання водню в криогенному та стисненому стані. Розділ 3. Застосування зрідженого та газоподібного водню в авіації. Висновки. Список бібліографічних посилань використаних джерел.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстраційного) матеріалу. графіки, таблиці, рисунки, технологічні схеми установок та транспортування стиснутого та скрапленого водню та застосування в авіації.

6. Календарний план-графік

| № з/п | Завдання | Термін виконання | Відмітка про виконання |
|-------|---|------------------|------------------------|
| 1. | Одержання теми. Пошук та аналіз літератури за темою дипломної роботи. | 23.05.22 | |
| 2. | Опрацювання літературних джерел з теми " Водень як безвуглецеве паливо для авіації " | 05.06.22 | |
| 3. | Проведення літературно-аналітичних досліджень з теми" Водень як безвуглецеве паливо для авіації " | 09.06.22 | |
| 4. | Обробка одержаних результатів | 14.06.22 | |
| 5. | Узагальнення матеріалу, оформлення дипломної роботи, підготовка доповіді та презентації. | 14.06.22 | |
| 6. | Захист дипломної роботи | 16.06.22 | |

Дата видачі завдання: « 23 » травня 2022 р.

Керівник дипломної роботи _____ к.х.н., доц. Новоселов Є.Ф.

Завдання прийняв до виконання _____ Іванов В. А.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: «Водень як безвуглецеве паливо для авіації» містить 59с., 11 рис., 6 табл., 42 літературних джерел.

Мета та завдання роботи. – пошук та розробка методик використання водню в якості безвуглецевого палива, беручи до уваги енергетичні і екологічні властивості водню і вуглеводнів у зв'язку з дефіцитом енергоносіїв в Україні та переходом на власні джерела енергії.

Об'єкт дослідження. – технологія одержання водню як безвуглецевого паливо для авіації та використання газоподібного та зрідженого водню для використання в авіаційній та авіакосмічній галузях

Метод дослідження – аналіз літературних джерел, вивчення сучасних технологічних схем використання водню як безвуглецевого палива для авіації, розгляд фізико-хімічних та хімічних проблем застосування водню в авіакосмічній царині

Результати цієї роботи пропонується використати при виборі методик та схем технологічних процесів використання водню як безвуглецевого палива для авіації, а також під час навчального процесу НАУ.

ЗЕЛЕНА АВІАЦІЯ ВОДЕНЬ, БЕЗВУГЛЕЦЕВЕ ПАЛИВО, ПАЛИВНИЙ ЕЛЕМЕНТ, ЗРІДЖЕНИЙ ВОДЕНЬ, КРІОГЕННА ТЕХНОЛОГІЯ

ЗМІСТ

| | |
|--|-----------|
| ВСТУП | 7 |
| РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНІ ДАНІ ПО ОСОБЛИВОСТЯМ ВОДНЮ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА..... | 8 |
| 1.1. Хімічні ресурси водню | 8 |
| 1.2. Гідриди металів..... | 13 |
| 1.3. Вуглецеві нанотрубки як ресурс водню..... | 13 |
| 1.4. Скляні мікросфери в збереганні водню..... | 14 |
| 1.5.Хімічні гідриди як ресурс водню..... | 14 |
| 1.6. Зелена авіація на водні..... | 15 |
| 1.7. Енергетичні властивості водню..... | 16 |
| РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ В КРІОГЕННОМУ ТА СТИСНеноМУ СТАНІ..... | 18 |
| 2.1 Виробництво водню – зелений, синій, сірий водень | 18 |
| 2. 2.Виробництво водню..... | 23 |
| 2.3.Водень з викопного палива..... | 24 |
| 2.4. Водень з відновлюваних джерел енергії..... | 25 |
| 2. 5. Зберігання паливного водню..... | 26 |
| 2.6. Фізичне зберігання водню..... | 28 |
| 2.7. Паливні елементи..... | 30 |
| 2.8. Виробництво водню в промисловості..... | 35 |
| РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ЗРІДЖЕНОГО ТА ГАЗОПОДІБНОГО ВОДНЮ В АВІАЦІЇ..... | 36 |
| 3.1.Розробки використання водню в авіації..... | 36 |
| 3.2.Різновиди авіаційних палив..... | 37 |
| 3.3. Літаки з водневим двигуном..... | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4. Рідкий водень як кріогенне паливо..... | 38 |
| 3. 5. Рідкий водень як паливо в авіації..... | 41 |
| 3.6. Згоряння водню в авіаційних ДВС..... | 43 |
| 3.7. Ракетні двигуни на водні (кріогенні)..... | 44 |
| 3.8.Літаки з водневими двигунами..... | 47 |
| 3.9.Безпека використання газоподібного і кріогенного водню в авіації..... | 51 |
| 3.10. SABRE комбінований ракетний двигун..... | 52 |
| Висновки | 54 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 55 |

ВСТУП

Феномен повітряного транспорту поміщається з розподілом світового споживання енергії в сумі від 2,5% до 5% і показує зростаючу перспективу приблизно на 4,8% на рік. Зі збільшенням населення світу та споживанням енергії авіаційна промисловість привела технології та дослідження до альтернативних та/або відновлюваних джерел енергії залежно від ризику виснаження газового палива та його впливу на підвищення цін та негативного впливу на навколишнє середовище.

Воднева енергія, яка H_2 є найбільш поширеним елементом у Всесвіті і більша частина існує у вигляді води та органічних сполук, вважається найбільш перспективним паливом для всіх транспортних засобів, яким потрібна ефективна енергія. Різноманітність доступності та відновлюваність водневого палива відкрили шлях для використання в різних інженерних сферах зі створенням екологічно чистого палива.

Аерокосмічний та авіаційний сектори раніше усвідомили важливість використання цього палива. Об'єднання авіаційної промисловості та водневої енергетики зустріли роботи NASA і зайняли чудову позицію з технологією, що розвивається. Мета даної роботи стосується системи стратегій використання водню в авіації як палива. З цією метою розглянуто використання H_2 в авіації, потім були надані переваги та проблеми з поясненнями, проаналізована інженерна технологія використання H_2 , пояснюється застосування паливних елементів та рідкі форми H_2 як фокус палива та необхідності зберігання. проаналізовано та надано з порівняннями підхід до нових технологій. Як результат, оглянуто на мінімальному, але детальному огляді стану техніки використання водневої енергії в авіації.

РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНІ ДАНІ ПО ОСОБЛИВОСТЯМ ВОДНЮ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА

1.1. Хімічні ресурси водню

Галузь повітряного транспорту, що прискорює економічний і соціальний розвиток країни, все більше стає частиною нашого життя [1]. Цей вид транспорту збільшує свою свободу та переваги з розвитком технологій. Незважаючи на складні інженерні особливості та розрахунки, він стрімко розвивається в інтенсивній роботі в галузі. За останні 20 років повітряний транспорт щороку збільшував на 4,8% свою пропускну здатність, що позначилося на кількості реактивних літаків [2]. Крім того, згідно з оцінками Boeing Current Market Outlook, кількість літаків становила 19 000 до 2008 року, у 2027 році збільшиться до 35 800 [3].

Літак несе занадто велике навантаження, тому існує дуже широкий діапазон ваг з максимальною злітною масою до 640 тонн. Для перевезення цих вантажів потрібні великі та потужні двигуни, які потребують великої кількості палива. Ця потреба в паливі має свої переваги та проблеми, пов'язані з безпекою палива, вартістю палива, питомою енергією та еквівалентною енергоефективністю.

Сьогодні літаки в основному використовують паливо на нафтовій основі, отримане з викопного палива. Серед цих видів палива вартість перельоту найбільш переважного гасу нижча, ніж інших видів палива [4,5]. Середній хімічний склад гасу у відсотках становить: 35 відсотків алкенів (парафінів), 60 відсотків циклічних алканів (нафтенів), 15 відсотків ароматичних речовин. Температура спалаху і температура самозаймання становлять 38-74 °C і 229 °C відповідно [6].

Хоча гас і деякі суміші бензину були кращим потенціалом використання як паливо для авіації; їхні запаси приречені на загибель, а збільшення параметрів викидів парникових газів негативно впливає на навколишнє середовище. Виходячи з цих міркувань, дослідники та виробники знаходять нові способи та форми поводження з енергією за допомогою альтернативних/відновлюваних видів палива.

Коли справа доходить до вибору правильного палива; Дінчер і Бічер [5] передали основні вимоги до палива для повітряних транспортних засобів. [5] перерахував властивості палива для повітряних транспортних засобів як; “Високі рівні максимальної дальності або тепла корисного навантаження. Це свідчить про високу питому енергію і високу щільність енергії, ризик вибуху. Висока питома теплоємність, вільний від забруднення, низький рівень утворення вуглецю. Низька в'язкість і висока змащувальна здатність, хороші характеристики насосного зберігання, включаючи низьку температуру замерзання, щоб полегшити роботу. Висока стабільність, термічна/хімічна стабільність, широка доступність та прийнятна ціна та береже навколишнє середовище. Належні характеристики землі та вантажопідйомності» [5]. На додаток до всього цього всі великі та малі повітряні транспортні засоби повинні бути екологічно чистими. Авіаційний сектор відповідає за 12% викидів CO від усіх транспортних засобів і близько 80% авіаційних викидів CO₂ є результатом польотів на відстань понад 1500 км [7].

Тільки у 2015 році, через весь світ польоти утворили 770 млн т CO [5]. Коронео та ін. [8] посилався на негативний вплив гасу на навколишнє середовище, який полягає в основному у викидах CO₂ та SO₂. Вони визначили, що найбільшою екологічною руйнацією гасу є викид SO₂, який відіграє важливу роль в утворенні кислотних дощів.

З огляду на ці міркування та зміну позиціонування цієї найгіршої

шкали переваг, звичайне викопне паливо, яке використовується в авіації, почало давати шанс новим технологіям двигунів та альтернативним видам палива. Одним з найважливіших елементів сімейства палив є водень. Протягом останніх років водень став центром уваги дослідників і експертів з горіння через доступність, кращі специфічні енергетичні властивості та екологічні переваги.

Дінчер і Акар [4] стверджують, що водень має два види використання як палива в літаках. Перший спосіб полягає у використанні водню як палива замість гасу у великих літаках, а другий спосіб полягає у використанні водневих паливних елементів, особливо з полімерними мембранними паливними елементами, замість реактивних двигунів у невеликих гвинтових літаках.

Шарп та ін. [9] досліджували використання водню в надзвукових/гіперзвукових літаках як альтернативного авіаційного палива. Вони згадали, що водень, який виробляється стабільно і має найвищу енергію на одиницю маси в порівнянні з будь-яким хімічним паливом, є чудовим запасом енергії. Однак об'ємну щільність водню з дуже низькою щільністю енергії на одиницю об'єму слід збільшити для використання в авіації. Сумісність та інфраструктурні елементи водню потрібно буде покращити. Верстрате [10] порівняв дальні літаки з воднем і гасом у сучасних і завтрашніх авіаційних технологіях. Вони також повідомили, що коли водень використовується замість палива на основі нафти в літаках, відсоток водяної пари, що збільшує питому теплоту газів згоряння, збільшується. Ця ситуація призводить до меншого падіння тиску в турбіні, створюючи більшу тягу.

Таблиця 1.

Властивості водню [дані зібрані з 4,5,13]

| Властивість водню | Значення |
|---|---------------------------|
| Октанове число | 130+ |
| Температура самозаймання | 585 °С |
| Нижча теплотворність (при 25 °С і 1 атм) | 119,93 кДж/г |
| Вища теплоємність (при 25 °С і 1 атм) | 141,86 кДж/г |
| Точка кипіння | - 252,7 °С |
| Точка плавлення | - 259,2 °С |
| Щільність точки кипіння | 70,8 кг/м ³ |
| Щільність пари (при 68 °F; 20 °С, 1 атм) | 0,08376 кг/м ³ |
| Питомий об'єм у рідкому вигляді –253 °С і 1 атм | 0,014 м ³ /кг |
| Питомий об'єм у формі газу при 20 °С і 1 атм | 11,9 м ³ /кг |
| Точка займання | < –253 °С; 20 К |
| Температура полум'я | 2158 °С |
| Маса повітря/палива | 34.2 |
| Споживання енергії | 316,5 Мдж/км |
| Витрата палива | 2,64 кг/км |
| Теплота згоряння | 120 кДж/кг |
| Теплота пароутворення | 446 кДж/кг |

Ця технологія потребує подальшого розвитку, оскільки вона має суттєві недоліки, а також переваги використання водню як палива в літаках. Водень, при всіх властивостях, необхідних для його використання як палива, має найвищий енергетичний вміст на одиницю маси з усіх відомих видів палива (у 2,8 раза вище, ніж у порівнянні з гасом) [5,11]. Ця властивість дуже важлива, оскільки дозволяє збільшити корисне навантаження[12]. Ще одна перевага полягає в тому, що водень обіцяє довгострокове зростання авіації, захищаючи

навколишнє середовище [11]. Водень утворює лише водяну пару та невелику кількість NO як продукт згоряння [11-12]. Коронеос і Мусіопулос [11],

Контрерас та ін.[12] вивчив екологічні наслідки використання водню як палива і дійшов висновку, що водень є одним з найбільш перспективних варіантів для навколишнього середовища, оскільки він не містить викидів, які негативно впливають на навколишнє середовище, наприклад 2CO_2 , SO. Крім того, багато досліджень показали, що вплив водяної пари в результаті спалювання водню на навколишнє середовище є незначним на дозвукових крейсерських рівнях [11].

Хімічні властивості водню наведено в таблиці 1.1. Температура самозаймання водню становить $585\text{ }^\circ\text{C}$, що є відносно високою. Це запобігає самозайманню воднево-повітряної суміші без додаткового джерела запалювання [4, 13]. Однак найважливіша складність, що обмежує використання водню, полягає у зберіганні при $-253\text{ }^\circ\text{C}$ у рідкому вигляді, оскільки він займає більший об'єм через те, що має дуже низьку щільність [5, 14]. Рідка форма водню потребує добре ізольованих резервуарів [11].

Переваги та недоліки використання водню як палива в авіації детально представлені в [4-5, 11-14]. Перші роботи з використання водневого палива на літаках (якщо не враховувати повітряні кулі) були проведені в 1956 році, коли в США почали політ бомбардованого літака Канберра B57 з використанням водневого палива, яке в одному з його двигунів нагнітається гелієм [14]. Ця авантюра, яка почалася з відділення водню від води за допомогою електрики, тепер прийшла до використання паливних елементів.

Водневі паливні елементи вперше почали використовуватися в космічних човниках та інших високотехнологічних програмах, коли потрібне чисте та ефективне джерело живлення.

1.2.Гідриди металів

Гідриди металів, які поглинають водень, є металевими сплавами. Ці сплави можуть бути використані як механізм зберігання з їхньою здатністю як поглинати, так і вивільняти водень [22]. Температура гідридів впливає безпосередньо на виділення водню. Як уже відомо, гідриди металів можуть утримувати водень, що дорівнює приблизно 1-2% від їх маси. Тільки за умови активного нагрівання для видалення водню це може збільшитися до 5-7% маси гідриду. [22]. Однак з точки зору авіації навіть така технологічна розробка все ще залишається серйозним недоліком, оскільки вага металевого гібрида, який буде описуватися як паливний бак, повинна бути більше 100 тонн [14].

1.3.Вуглецеві нанотрубки як ресурс водню

Вуглецеві нанотрубки викликали інтерес як матеріали для зберігання водню, оскільки вони мали високу площу поверхні та термічну стабільність [23]. Вуглецеві нанотрубки — це трубчасті вуглецеві структури розміром 2 нанометри, і теоретично ці структури можуть зберігати водень у структурі трубки [22].

Вуглецеві нанотрубки та металеві гібриди нагадують один одного за методами зберігання. Однак кількість водню, що зберігається в нанотрубках, може бути значно вищою, тому технологія нанотрубок, що розвивається, розглядається як перспективний метод зберігання водню, особливо в авіаційній галузі [14].

1.4. Скляні мікросфери в зберіганні водню

У цьому методі розробки для зберігання водню можна використовувати порожнисті скляні кулі, розміром менші за зерно солі [14]. Основна концепція та робоча процедура узагальнено в [16], оскільки метод зберігання водню зі скляними мікросферами можна пояснити трьома етапами: заряджання, наповнення та розрядження. Спочатку при високому тиску (350-700 бар) і високій температурі (близько 300 °C) H_2 заповнюють у порожнисті скляні кулі шляхом проникнення в посудину високого тиску. Потім охолоджені мікросфери (до кімнатної температури) перенесли в бак низького тиску. Нарешті, мікросфери нагрівають до прибл. 200-300 °C з метою контрольованого виділення H_2 . [16].

Швидкість заповнення та продувки прямо пропорційна проникності для водню скляних куль. Воднепроникність збільшується з підвищенням температури. Наприклад, швидкість заповнення/продувки при кімнатній температурі становить 5000 годин, а при 300 °C — близько 15 хвилин [22].

1.5. Хімічні гідриди як ресурс водню

Хімічні гідриди з більшою щільністю енергії, оскільки вони містять легші елементи, привертають більше уваги, ніж гідриди металів. Крім того, їх можна використовувати для зберігання водню у відносно м'яких робочих умовах [23].

Боргідрид натрію ($NaBH_4$) є найбільш дослідженим хімічним складом для БПЛА. Переваги боргідриду натрію включають: стабільну реакцію, швидку реакцію при температурі навколишнього середовища,

низьку теплоту гідролізу та більш стабільне та легке в обробці джерело палива порівняно з рідким або стисненим воднем [21]. Рівняння 9 зазначає, що боргідрид натрію може забезпечити відносно високу теоретичну ефективність водню (10,8 мас. %) з реакцією гідролізу [23] :

KAIST (Корейський передовий інститут науки і технологій) продемонстрував використання боргідриду натрію для досягнення 5-годинного часу польоту в 2007 році. Це дослідження проводилося на Мікроповітряний транспортний засіб зі змішаним крилом (MAV), який був поєднаний з паливним елементом потужністю 50 Вт (два паливні елементи по 25 Вт), які живили літак під час рейсу. Енергія батареї забезпечувалась на етапі зльоту. Ця система паливних елементів з баком NaBH_4 виявила щільність енергії 1000 Вт·год/кг [21].

Боран аміаку з високою матеріальною ємністю (19,6 мас.% H_2) є перспективним кандидатом серед хімічних запасів, а водень виділяється гідролізом або термолізом. [21, 23].

2013 році KAIST і Корейський науково-дослідний інститут розробили БПЛА, який має розмах крил 2,9 м і злітну масу 7,5 кг. Цей БПЛА з використанням аміачно-боранового водневого генератора забезпечив час польоту 57 хвилин [21].

1.6. Зелена авіація на водні

Зелена авіація відіграватиме важливу роль у майбутніх авіаційних стратегіях та застосуванні. Більше екологізації можна досягти за рахунок мінімізації викидів (наприклад, без викидів) повітряних транспортних засобів. З цією метою водень має можливість використовувати в авіації як паливо. У цьому міні-огляді сучасний стан використання водню в авіації

коротко виражається у світлі виробництва, зберігання водню, паливних елементів і застосування дронів для космічних човників.

Ключом до запуску та розповсюдження водню на літаках є просування до проблем зберігання та виробництва та досягнення прогресу в цій сфері. Існує багато способів зберігання водню в літаках. Однак бажану та повну ефективність неможливо отримати за допомогою жодного методу, включаючи криогенне зберігання.

Вважається, що для польоту літака необхідно багато рідкого водню. У виробництві водню використання викопного палива з обмеженими запасами не відповідає меті водневої ефективності.

Найближчим часом будуть розроблені нові технології зберігання та виробництва, якщо витрати зменшаться; Водень, який є одним з найчистіших видів палива, поширить його використання в повітряних транспортних засобах. Передбачається, що найзручнішим і економічним способом для світу в майбутньому вибрати водень як авіаційне паливо є виробництво водню за допомогою ядерної енергії. Хоча проблеми водневої інженерії можна вирішити шляхом розробки технології, висока вартість все ще ускладнює роботу дослідників над цим питанням.

1.7. Енергетичні властивості водню

Водень має питому енергію (120 МДж/кг) що в 2,8 рази вище, ніж традиційне реактивне паливо (43 МДж/кг).

Криогенний рідкий водень має в 4,1 рази меншу щільність енергії (8,5 МДж/л порівняно з 35 МДж/л), але його потрібно охолоджувати до 20 К (-253 °С) і зберігати в ізольованих резервуарах, але низького тиску; у той час як газоподібний водень має меншу щільність енергії, потребує резервуарів високого тиску, що досягають до 700 бар, часто з вуглецевого волокна, але його можна зберігати при звичайних температурах.

Якщо водень доступний у певній кількості з низьковуглецевої енергії,

наприклад вітрової або ядерної, його використання в літаках вироблятиме менше парникових газів (водяна пара та невелика кількість оксиду азоту), ніж поточні літаки. Нині з використанням низьковуглецевих джерел енергії виробляється дуже мало водню, і існує кілька серйозних перешкод для використання водню в літаках та інших транспортних засобах. Через спосіб його виробництва та відносну неефективність його виробництва з урахуванням сучасних технологій водень дорожчий, ніж викопне паливо.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ В КРІОГЕННОМУ ТА СТИСНЕНОМУ СТАНІ

2.1 Виробництво водню – зелений, синій, сірий водень

Різні способи отримання водню зазвичай називають зеленим, синім і сірим (іноді також бірюзовим, жовтим і рожевим) воднем.

Зелений водень – відновлена енергія та нульові викиди

Зелений водень отримують шляхом електролізу шляхом розщеплення молекул води на окремі елементи. під час цього процесу виробляються тільки водень і кисень. кисень можна безпечно викидати в атмосферу як побічний продукт. для електролізу потрібна електрична енергія, що виробляється за допомогою відновлюваних джерел, таких як енергія вітру та сонця, у випадку зеленого водню. крім електролізу, зелений водень також можна отримати шляхом парового риформінгу біометану та піролізу біогенної сировини. зелений водень є найчистішим способом виробництва водню з найменшими (близько до нуля) викидами CO₂.

Синій водень – риформінг паром та уловлювання та зберігання вуглецю

Синій водень отримують шляхом розщеплення природного газу на водень і CO₂, наприклад, шляхом парового риформінгу метану (SMR). CO₂ не викидається в атмосферу, а вловлюється в процесі і зберігається. Цей процес уловлювання та зберігання вуглецю (CCS) пом'якшує вплив на навколишнє середовище.

Сірий водень – здобувається з викопного палива

Сірий водень виробляється подібно до блакитного водню з викопного палива, такого як вугілля або природний газ. Однак викиди вуглецю викидаються в атмосферу, що робить цю технологію менш екологічно безпечною.

Інші способи добутку водню – бірюзовий, жовтий та рожевий

Є й інші способи отримання водню, деякі з яких варто згадати.

- Бірюзовий водень утворюється в результаті піролізу метану, який розщеплюється на твердий вуглець і водень в реакторі. Цей процес не утворює газоподібний CO₂ як побічний продукт, і якщо відновлювані джерела енергії живлять реактор, він вважається нейтральним щодо викидів CO₂.
- Жовтий водень виробляється подібно до зеленого водню, при цьому енергія одержується виключно за рахунок сонячної енергії.
- Рожевий водень також отримують за допомогою електролізу, а енергію надходить від ядерної енергії.

Декарбонізація є серйозною проблемою для авіації. Авіаційний сектор викидає понад 900 мільйонів тонн вуглекислого газу (CO₂) на рік. Якщо припустити зростання промисловості на 3-4 відсотки на рік (па) і підвищення ефективності на 2 відсотки на рік, викиди зростуть більш ніж вдвічі до 2050 року. у той же період.

Група виконавців з повітряного транспорту (АТАГ) зобов'язалася скоротити викиди CO₂ на 50%. (порівняно з 2005 р.) та

Крім CO₂, літаки впливають на клімат через викиди оксидів азоту (NO_x), сажі та водяної пари, які створюють сліди та перисті хмари. Таким чином, «повний» внесок у глобальне потепління значно перевищує лише викиди CO₂.

У цьому звіті оцінюється потенціал водневого (H₂) двигуна для зменшення впливу авіації на клімат.

Щоб зменшити вплив на клімат, галузі доведеться запровадити додаткові важелі, такі як радикально нові технології, значно масштабувати стійке авіаційне паливо (SAF), таке як синтетичне паливо (synfuel), тимчасово покладатися на компенсації у великих кількостях або покладатися на їх комбінацію. економічні H₂ літаки та інфраструктуру, які справляються з впливом клімату.

Останні оцінки показують, що спалювання водороду може зменшити вплив на клімат під час польоту на 50-75 відсотків, а рух на паливних елементах - на 75-90 відсотків. Це для порівняння приблизно з 30 до 60 відсотків для синпалива.

Щоб масштабувати літаки з двигуном H, необхідно здійснити кілька технологічних розблокувань: підвищення загальної ефективності за допомогою більш легких баків

Експерти галузі прогнозують, що ці важливі досягнення можливі протягом п'яти-десяти років двигун може значно зменшити вплив на клімат. Водень усуває CO викиди в польоті і викидів та з урахуванням невизначеності

Припускаючи ці технічні розробки, двигун H найкраще підходить для приміських, регіональних, ближніх і середніх літаків.

Для приміських та регіональних літаків двигун на паливних елементах є найбільш енергоефективним, екологічно чистим та економічним варіантом. У порівнянні зі звичайними літаками, експлуатаційні витрати збільшуються всього на 5-10 доларів США на пасажир, приблизно на 10 відсотків на одного пасажир.

Для літальних апаратів малої дальності гібридний підхід (згоряння H і паливний елемент) може бути найкращим, що збільшує витрати на PAX на 20-30 відсотків. Наступний за величиною сегмент, літак середньої дальності, вимагає значно розширеного фюзеляжу для зберігання LH, а отже споживатиме приблизно на 25 відсотків більше енергії, ніж звичайні літаки; ці літаки призвели б до збільшення витрат на 30-40 відсотків на одного PAX.

Враховуючи обсяг впливу на клімат, якого вдалося уникнути, це означає витрати на еквівалент зменшеної тонни викидів вуглекислого газу менше ніж 60 доларів США для регіональних та приміських та 70-220 доларів США для літаків малої та середньої дальності. Це вигідно порівняно з 210-230 дол. США за тонну CO екв. для синтезованого палива з прямого захоплення повітря для літаків малої та дальньої дії. Літаки великої дальності

потребують нових конструкцій літаків для водню. Н є технічно можливим, але менш придатним для еволюційних конструкцій далекобійних літаків з економічної точки зору. Резервуари з воднем збільшать довжину планера і потребу в енергії, що призведе до збільшення витрат на 1 РАХ на 40-50%. Synfuel, ймовірно, є більш економічно ефективним рішенням для декарбонізації. Нові конструкції літаків (наприклад, змішане крило) можуть змінити це, але можуть залишитися принаймні через 20 років після введення в експлуатацію.

Техніко-економічний аналіз показує, що водень може бути основною частиною майбутнього авіаційного технологічного комплексу. Якщо літаки з двигуном Н будуть розгорнуті в сегментах, де вони є найбільш економічно ефективним засобом декарбонізації, до 2050 року вони могли б становити 40 відсотків усіх літаків, а після 2050 року ця частка буде ще більше зростати.

На 60 відсотків літаків вплив авіації на клімат зменшиться приблизно на 2,7 гігатонн СО екв. проти 5,7 гігатонн СО екв у базовому сценарії, де відбувається лише підвищення ефективності. За цим сценарієм авіаційний сектор зменшить викиди СО₂ на 1,8 гігатонн, що дозволить йому досягти цілей скорочення викидів вуглецю, встановлених ЄС та АТАГ.

Інфраструктура для заправки паливом є керованою проблемою на перших порах, але вимагатиме значної координації. За вищезазначеним сценарієм до 2040 року світовий попит авіації на ЛН становитиме 10 мільйонів тонн на рік – 5 відсотків прогнозованого загального світового попиту на водень.

Таким чином, авіація може використовувати місцеві ланцюги постачання Н, які також обслуговують інші галузі. Вантажівки на рідкому паливі могли б обслуговувати більшість аеропортів-учасників, оскільки попит на аеропорт, ймовірно, все ще буде низьким, і будуть переобладнані лише літаки малої дальності.

Правила поведінки та безпеки повинні бути переоцінені для використання ЛН в авіації, враховуючи кардинально інші властивості

порівняно зі звичайним реактивним паливом. Паливні компанії, аеропорти, виробники літаків та авіакомпанії також повинні працювати разом, щоб забезпечити розвиток інфраструктури та запуск літаків у тандемі.

Потрібне більш складне, але не неможливе розширення після 2040 року. До 2050 року попит авіації на LH зросте до 40 мільйонів тонн на рік, і будуть представлені літаки середньої дальності H, що вимагатиме значного розширення ланцюга постачання водню та інфраструктури заправки в аеропортах. Це розширення призведе до проблем, включаючи пошук більш масштабованої технології заправки паливом, ніж заправка вантажівок, створення паралельної інфраструктури заправки в аеропортах та адаптацію стоянок для розміщення більших літаків. Хоча ці зміни суттєві, не існує фундаментальних технічних обмежень, які б завадили впровадженню, якщо воно планувалося і вчасно розглянуто до 2035 року.

Необхідно терміново вжити сміливих кроків, щоб розпочати шлях до декарбонізації за допомогою водню. Сьогодні галузь має змінити траєкторію, оскільки комерціалізація та сертифікація літаків може зайняти більше 10 років, а суттєва заміна парку – ще 10 років. Для переходу на нову технологію двигуна, секторна дорожня карта для зменшення впливу на клімат, активізація діяльності та фінансування досліджень та інновацій (R&I), і довгострокова політика буде потрібна.

Дорожня карта сектору має визначити амбіції. За прогнозами Hydrogen Council Воднева авіація | Обґрунтоване фактами дослідження водневих технологій, економіки та впливу на клімат до 2050 року рівня, узгоджувати стандарти, розробляти заходи безпеки, координувати розбудову інфраструктури, подолати провали ринку та заохочувати перших.

Надихаючою середньостроковою метою може стати впровадження літака малої дальності з двигуном H до 2035 року. Діяльність і фінансування досліджень і інновацій мають зосередитися на чотирьох ключових сферах: паливні та силові компоненти LH, авіаційні системи, розбудова інфраструктури та нормативно-правове забезпечення структуру (див. Розділ

5 для дорожньої карти R&I). Довгострокова політична структура має визначити шляхи захисту залізниці для сектора, в тому числі способів вимірювання впливу на клімат і виконання дорожньої карти.

Європейський Союз міг би спершу орієнтуватися на приміські, регіональні та ближні рейси, оскільки вони підпадають під його юрисдикцію, а потім разом із своїми міжнародними партнерами розширити це на літаки середньої та дальньої дії.

Підводячи попередній підсумок, водневий двигун має значний, поки що недооцінений потенціал для зменшення впливу авіації на клімат і сприяння досягненню цілей декарбонізації. Щоб скористатися цим потенціалом, ми повинні розробляти та впроваджувати нові технології повсюдно.

2.2.Виробництво водню

Хоча водень є одним із найпоширеніших елементів у Всесвіті, він не існує окремо, оскільки легко реагує з іншими елементами. З цієї причини виробництво водню засноване на принципі видалення інших молекул [15]. Водень можна отримувати з різноманітних кормів. Це викопні ресурси, такі як природний газ та вугілля, а також відновлювані ресурси, такі як біомаса та вода [16].

У 2006 році джерела виробництва водню можуть бути виражені кількістю; 48% природного газу, 30% нафти, 18% вугілля, 4% електролізу та інших незначних джерел[17].Огляд багатьох методів виробництва водню та різних кінцевих користувачів представлено на рисунку 1.a [18], а відсотки методів виробництва водню показані на рисунку 1.b.

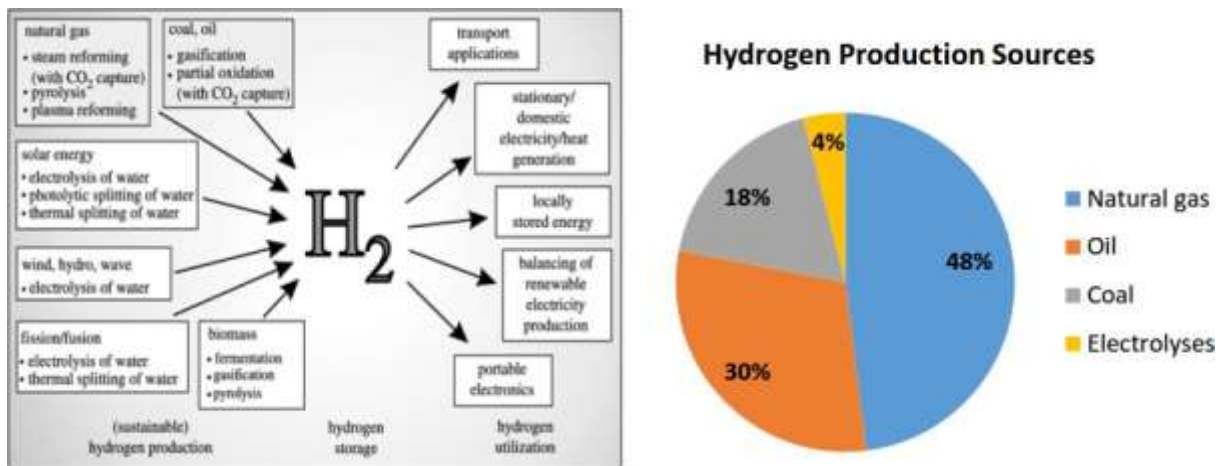


Рис. 1.a Методи виробництва водню та різні кінцеві споживачі [18]
1.b відсоток джерел виробництва водню.

2.3. Водень з викопного палива

Найдешевшою виробничою сировиною для виробництва водню є викопне паливо, але розробляються нові методи, оскільки викопне паливо використовує обмежені запаси та забруднює навколишнє середовище [15]. Водень можна отримувати з великої кількості викопного палива, головним чином природного газу та вугілля. Його можна отримати з природного газу трьома різними способами: паровий риформінг, автотермічний риформінг і часткове окислення [16]

У методі парового риформінгу метан і водяна пара перетворюються на водень і монооксид вуглецю шляхом ендотермічного перетворення, 1 [17].

У реакції, що протікає між 850 °C-700 °C і 3-25 бар, тепло зазвичай виходить від згоряння частини газу, що подається метану [17]. Продукт-газ, що містить близько 12% CO, може бути додатково перетворений в

водень CO₂ і H₂

При частковому окисленні, яке є екзотермічною реакцією, часткове згоряння метану з газоподібним киснем утворює монооксид вуглецю та водень, [17].

Автотермічний риформінг, який є екзотермічною реакцією, являє собою комбінацію як парового риформінгу, так і часткового окислення [19]. У процесі автотермічного риформінгу, коли температура на виході з реактора може становити від 950 до 1100 °С, а тиск газу може становити до 100 бар, отриманий СО перетворюється в H₂, 2 [16-17] .

Вугілля можна перетворити на водень за допомогою кількох ендотермічних процесів газифікації, таких як фіксований шар, псевдозріджений шар і залучений потік. Різні параметри, такі як розмір реактора, бажане використання газу та якість, впливають на вибір відповідної технології. У класичній реакції газифікації паливо та газифікатор перетворюються на суміш, що містить переважно монооксид вуглецю та водень, [19].

2.4. Водень з відновлюваних джерел енергії

Хоча водень має широкий спектр джерел виробництва, оскільки викопне паливо поступово зменшується, використання води у виробництві стає все більш вигідним [14]. Електроліз води є процесом відділення кисню та водню від води за допомогою прямої електричної енергії шляхом окислювально-відновної реакції [16]. Для проведення електролізу потрібна велика кількість електричної енергії, але реакція є повністю екологічно чистою та поновлюваною [15].

У лужному електролізі, передовій технології, вода в катоді споживає електрони для утворення водню. Іони гідроксиду мігрують за допомогою розчину в напрямку до анода, на якому вони вивільняють електрони.

Використання твердої полімерної мембрани як електроліту в електролізері PEM значно покращує проблеми провідності, пов'язані з використанням рідкого електроліту. Основна відмінність лужних електролізерів від електролізерів PEM полягає у використанні твердого полімерного мембранного електроліту замість рідкого електроліту [19-20].

На відміну від лужного та полімерного мембранного електролізу, що працює при низькій температурі (<100 °C), твердооксидний електроліз проходить при високій температурі (<1000 °C). Така ситуація призводить до підвищення ефективності [20]. З боку катода вода або, точніше, пара відновлюється з утворенням водню з утворенням оксидних іонів.

Термохімічне розщеплення води перетворює воду на водень за допомогою різних хімічних реакцій. При цьому перетворенні замість електрики використовуються джерела високого тепла, такі як сонячна та ядерна [19]. Штадлер [19] розробив, що термохімічні методи розщеплення води, такі як сірка - йод, гібрид сірки та гібрид хлориду міді.

2.5. Зберігання паливного водню

Існують деякі проблеми, які не вирішені щодо використання водню у всьому авіаційному секторі, особливо в БПЛА на паливних елементах (безпілотні повітряні транспортні засоби), хоча є багато досліджень та

застосувань, пов'язаних із закінченням терміну дії. Ці проблеми у своєму дослідженні висунули Гонг і Верстрете [21].

Вони зазначили, що через обмежені площі конструкції літака щодо ваги та об'єму літака важко ефективно зберігати, виробляти та використовувати водень. Крім того, низька щільність газоподібного водню (0,089 кг/м³ при стандартній температурі та тиску) потребує альтернативних методів транспортування водню об'ємно ефективним способом. Крім того, Колоццо [22] торкнувся цих проблем. Він припустив, що висока щільність енергії водню є блискучою і є хорошим потенційним паливом для літаків. Однак у більшості застосувань використання водню вимагає великих обсягів. З цієї причини інтенсивність водню слід збільшити, щоб він був корисним у літаках.

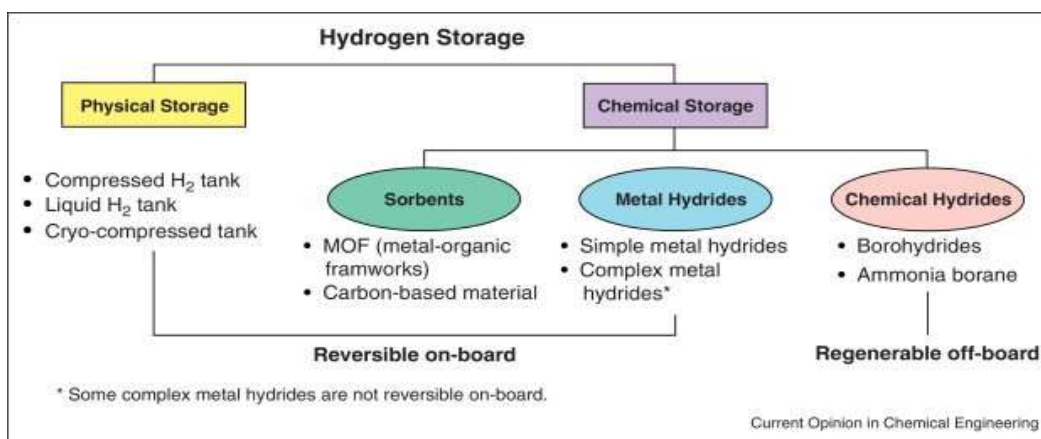


Рис.2 Діаграма зберігання водню [23].

Відомі методи систем зберігання водню та наведено переваги та недоліки цих систем. Як правило, сховище водню поділяється на дві частини, які є фізичними та хімічними сховищами. На малюнку 2 показана схема зберігання водню. Нижче наведено детальні короткі пояснення питань, у яких вони використовуються в авіаційній галузі.

2.6. Фізичне зберігання водню

Компримований Н₂-бак

За поширеною думкою, найбільш звичайним і найпростішим типом зберігання водню є стиснутий водень [22]. Через низьку щільність водень зберігається у стиснутому вигляді [24]. У резервуарах для стисненого газу, де щільність газоподібного водню збільшується із збільшенням тиску [22], тиск зберігання становить від 35 МПа до 70 МПа. [21]. Незважаючи на те, що дуже високий тиск ускладнює заправку палива, переваги цього методу полягають у тому, що можлива швидка швидкість заповнення та простота технології [21]. Основним недоліком цього методу є те, що об'ємна густина не збільшується зі збільшенням тиску [20]. Коли справа доходить до останніх досягнень, алюмінієвий бак із стиснутим газом під тиском із вугіллям у програмі Ion Tiger у NRL (Військово-морська дослідницька лабораторія), зберігали 500 г Н при 34 МПа і вагу системи зменшили до 8 фунтів. [21,25].

Резервуари для рідкого водню LH

Для зберігання водню в криогенній формі необхідні дуже низькі температури [21]. Рідкий водень підтримується при температурі близько -260 С і має щільність близько 71 кг/м.³[22]. Властивості рідкого водню роблять можливим як значне збільшення щільності над сховищем газу під високим тиском, так і зменшення маси резервуара за рахунок роботи з низьким тиском. [22].

У порівнянні з газоподібним станом, оскільки рідкий водень має вищу об'ємну ємність (0,07 кг/л), зберігається більше водню, ніж у резервуарах стисненого газу (0,039 кг/л при 700 бар) для даного об'єму [26]. Шенель [14] згадав про важливість зберігання рідкого водню в авіації і сказав, що LH (зріджений водень) є кращим через його досвід роботи в космічних апаратах. Крім того, високі коефіцієнти щільності

ЛН мають важливу перевагу в порівнянні з газоподібним. Gong і Verstraete [21] розповіли, що згідно з дослідженнями, проведеними NRL, в мікробезпilotному апараті використання рідкого водню замість стисненого газу може забезпечити збільшення часу польоту з 26 до 72 годин, а позитивні властивості рідкого водню є перспективний потенціал для БПЛА. Однак у наш час БПЛА з рідким воднем не є поширеними, оскільки рідкий водень виробляється зовні та транспортується до БПЛА.

Хоча водень має широкі можливості для використання як рідкого палива, він має серйозні недоліки, які зустрічаються при його використанні. Ці недоліки перераховані в [22] як;

Для зменшення википання рідкого водню та підтримки його при криогенних температурах потрібна герметична система ізоляції.

Робота з рідким воднем вимагає спеціального обладнання та процедур. Також час зберігання рідкого водню обмежений (через википання), тому паливо зазвичай потрібно виготовляти на місці або поблизу.

У паливних баках необхідно підтримувати постійний тиск, зазвичай близько 21 фунт/кв. дюйм, щоб мінімізувати википання. Для цього необхідна система вентиляції та впроваджена процедура.

Резервуари та трубопроводи з рідким воднем повинні бути закриті від атмосфери. Якщо повітря потрапить в резервуари, воно замерзне і може заблокувати лінії потоку. Як продувний газ можна використовувати лише гелій» [22].

Колоцца [22] детально вивчав методи зберігання водню та їх застосування в авіаційних застосуваннях. Він згадав про шляхи збільшення густини водню, що є золотим правилом використання водню в авіаційних додатках.

Одним із способів розчинення та генерації для подальшого збільшення густини рідкого водню є отримання гелеобразного рідкого водню. Гелеобразующий водень, отриманий шляхом введення гелеутворювача в рідкий водень, може забезпечити збільшення до 10% щільності рідкого водню, а також зменшує швидкість википання в 2-3 рази порівняно з рідким воднем.

Явище википання також є ще одним важливим елементом, який вплине на ефективність. Завдяки теплопередачі на накопичувачі за добу втрачається 2-3% водню, що випаровується [20]. Кількість накопиченого водню, ефективність теплоізоляції, навколишні умови, геометрія судна та тривалість між рухами є факторами, які впливають на кількість і швидкість википання водню. [26]. Пари водню утворюються в результаті витоку тепла в резервуар через ізоляцію. Кріоохолоджувач використовується для інтенсифікації парів водню в ґрунті [22].

Останні дослідження показали, що конструкція кріогенного вуглецевого композитного бака може поєднуватися з високою ємністю тиску, а саме бак можна заповнювати рідким воднем і піддавати тиску до 275 бар або навіть 350 бар. Ця нова система зберігання забезпечила критичну ціль DoE 2015 щодо об'ємної ефективності [20].

2.7. Паливні елементи

Зелена авіація набуває все більшого значення. Збалансувавши потужність і масштаби викидів, вся транспортна галузь переходить на планування електрифікації двигунів [27]. Є кілька переваг електричної енергії, до яких можна віднести ефективність, надійність, низьку вартість, низьку теплову та шумову характеристику, низьку вібрацію тощо [21]. Електроенергія може бути забезпечена батареями за найсучаснішими

технологіями або системами на основі паливних елементів, які забезпечують більш високу питому енергію порівняно з батареями [21].

Основною метою використання ПЕ є виробляв електроенергію за допомогою електрохімічних реакцій з води за допомогою розкладання кисню і водню. Розвиток ПЕ ґрунтується на історичних даних 1839-х років. Після винаходу сера Вільяма Гроува в ті часи дослідники зацікавилися ПЕ як новий і надійний постачальник енергії. [41].

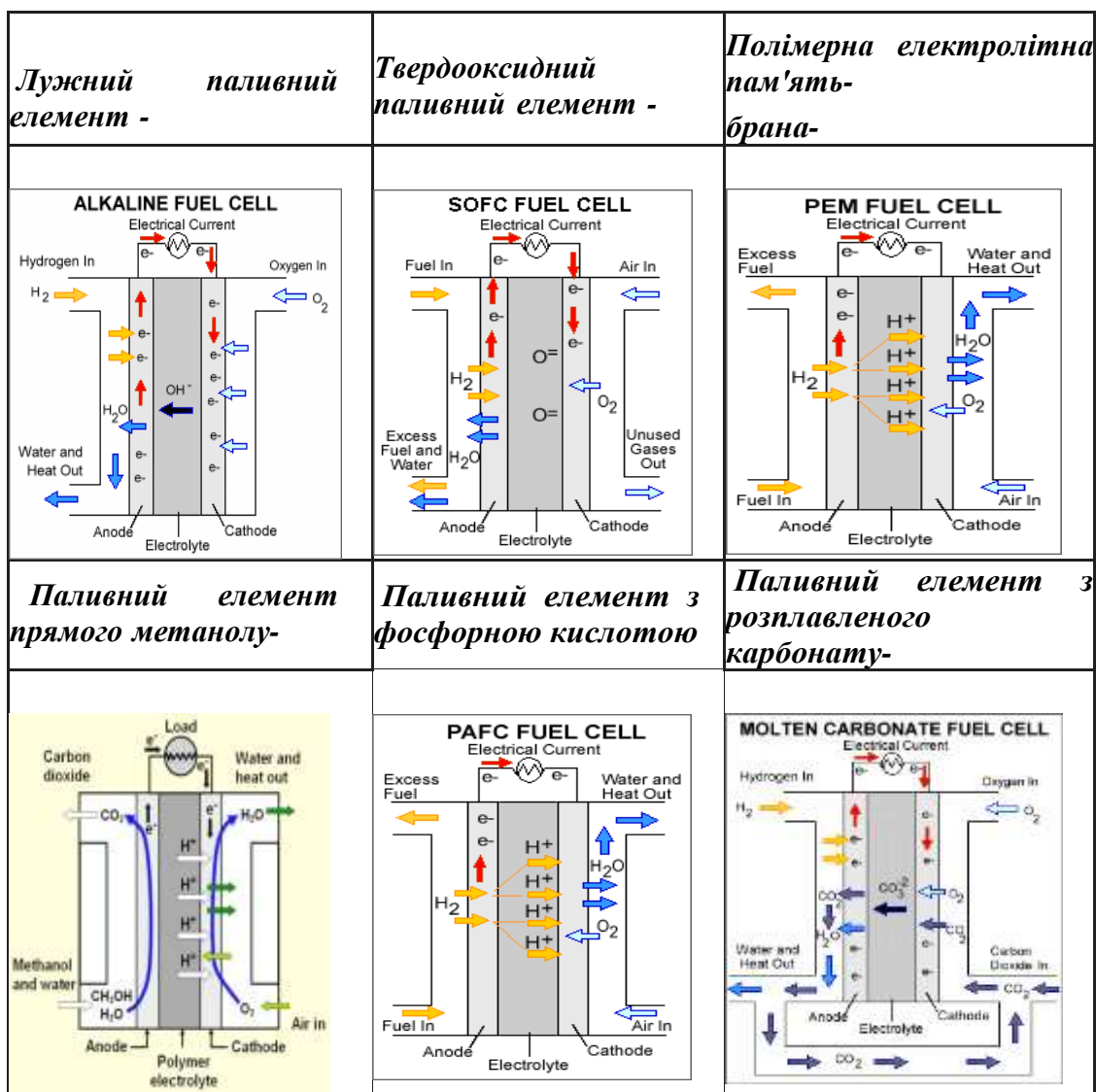


Рис.3. Принципи роботи деяких паливних елементів [з 33]

Більш зелені паливні елементи — це електрохімічні пристрої, які перетворюють хімічну енергію палива в електричну [28]. Паливо

Елементи та батареї дуже схожі через те, що складаються з електрохімічних елементів, які мають два електроди, які обгортають електроліт, і обидва використовують внутрішні реакції окиснення-відновлення в процесі для перетворення хімічної енергії в електричну [29].

Однак з одного боку батарея утримує в собі закритий запас енергії і зобов'язана для ситуації заряду/розряду із зовнішнім джерелом електрики відбуватися електрохімічна реакція навпаки. Паливний елемент, з іншого боку, використовує зовнішнє джерело хімічної енергії і може працювати необмежено довго з джерелом водню та джерелом кисню [30]. Крім того, вдосконалені акумуляторні батареї можуть досягати щільності енергії 150 Вт-год/кг на рівні модуля, тоді як регенеративні паливні елементи можуть досягати >800 Вт-год/кг на системному рівні, а нерегенеративні паливні елементи можуть досягати >1000 Вт-год/кг [31].

Перенесення іонів у паливному елементі відрізняється для різних типів елементів [32]. Принципи роботи різних паливних елементів проілюстровані на малюнку 3.

Хоча паливні елементи є чистим і ефективним механізмом перетворення енергії, вони мають багато недоліків. Деякі з них можна перерахувати як; пізня реакція на перехідні навантаження, що вимагає більшого об'єму для заданої потужності та має меншу питому потужність (Вт/кг) у порівнянні з двигунами внутрішнього згорання [21,29]

Паливні елементи з полімерними електролітними мембранами

PEMFC є найбільш перспективними кандидатами для транспортних застосувань [29]. Деякі особливості PEMFC, такі як робота при низьких температурах, частково вища щільність потужності, швидка реакція на зміну навантаження, роблять його придатним для польотів [21].

PEM, ефективність якого коливається від 40 до 60%, досягає найвищого виходу при часткових навантаженнях [21]. НУ4, перший у світі чотиримісний пасажирський літак з двигуном на водневих паливних елементах, працює на цьому типі енергії FC для прикладу м'якої авіації [34].

Паливні елементи типу прямого метанолу

Паливні елементи прямого метанолу (DMFC) схожі на концепції PEMFC і працюють при низьких температурах, що дає можливість швидкого запуску та швидкого виконання навантаження. Однак паливо передається через водень до метанолу, [21].

Процес вимагає транспортування більшої маси метанолу для отримання такої ж кількості енергії, ніж PEMFC [21]. Крім того, використання DMFC в авіаційній галузі виражається в [37], як приклад за допомогою застосування; легкий блок 200 Вт для малого безпілотного БПЛА. DMFC складається з 33 елементів і виробляє 251 Вт при 13,4 В і 74°C. Вони прийшли до висновку, що стек DMFC забезпечує максимальну потужність для круїзного польоту, але акумулятор потребує додаткового живлення для зльоту.

Метод порівняльного проектування використання ПЕ у БПЛА виконано в [38]. Вони дають блискучу інформацію та підходи до DMFC та SOFC з детальною таблицею.

Твердооксидні паливні елементи

Основна структура твердооксидних паливних елементів (ТОТЭ) наведена на малюнку 3. Перевага ТОТЭ полягає у високій температурі. SOFC можуть використовувати вуглеводневе паливо, таке як пропан, що покращує доступність палива та зменшує вимоги до зберігання.

Однак цими високими температурами потрібно ретельно керувати, а ТОТВ потрібен час, щоб нагрітися і досягти робочої температури, тому вони не можуть реагувати на (швидкі) зміни

навантаження [28]. SOFC є одним з найважливіших компонентів сімейства FC для використання в авіаційних додатках. Особливо для БПЛА, SOFC і PEMFC є найбільш переважними FC.

Дослідження, проведене [39], повідомляє про результати використання (SOFC) у гібридній системі APU для комерційного літака. Вони очікували важливих порад щодо гібрида SOFC/GT та умов їх дослідження.

Таблиця 2.

Властивості паливних елементів, які найчастіше використовуються в авіації [дані зібрані з 20, 21, 29].

| Тип паливних елементів | Паливо | Робоча температура (°C) | Ефективність (%) | Реакції |
|------------------------|-------------|-------------------------|------------------|--|
| PEMFC | водень | 30-100 | 40-60 | Анод: $H \rightarrow 2H^{++} + 2e^{-}$ Катод: $\frac{1}{2} O_2 + 2H^{++} + 2e^{-} \rightarrow H_2O$ |
| DMFC | метанол | 20-90 | 20-30 | Анод: $CH_3OH + HO_2 \rightarrow CO_2 + 6H^{++} + 6e^{-}$ Катод: $\frac{3}{2} O_2 + 6H^{++} + 6e^{-} \rightarrow 3H_2O$ |
| SOFC | Вуглеводень | 500-1000 | 30-50 | Анод: $H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + 2e^{-}$ Катод: $\frac{1}{2} O_2 + 2e^{-} \rightarrow O^{2-}$ |
| AFC | водень | 150-200 | 60-70 | Анод: $H_2 + 2OH^{-} \rightarrow H_2O + 2e^{-}$ Катод: $\frac{1}{2} O_2 + 2H_2O + 2e^{-} \rightarrow 2OH^{-}$ |

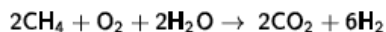
Лужні паливні елементи

Лужний паливний елемент (AFC), який був одним із перших сучасних паливних елементів, розроблених у 1960 році. У той час як додаток доводив бортову електричну енергію для космічного корабля Apollo, AFC продовжує використовуватися зараз. Він забезпечує бортове живлення для орбітального корабля Space Shuttle з елементами виробництва UTC Fuel Cells [28].

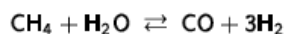
2.8. Виробництво водню в промисловості

у промисловості

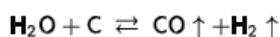
- з природного газу, що складається в основному з метану, який змішують з водяною парою та киснем і нагрівають до температури 800—900 °С в присутності каталізатора:



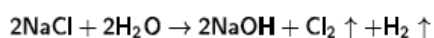
- Конверсія з водяною парою при 1000 °С:



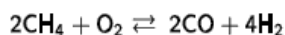
- Пропущення пари води над розпеченим коксом при температурі близько 1000 °С:



- при електролізі розчинів хлориду натрію та хлориду калію як побічний продукт виробництва лугів, гіпохлоритів і хлоратів:



- Каталітичне окислення киснем:



Водень може вироблятися електролізом за високого тиску або електролізом води за низького тиску.

У сучасних ринкових умовах 50 кВт·год електроенергії, витраченої на виробництво одного кілограма стисненого водню, коштують приблизно стільки ж, скільки водень, вироблений за 8 центів/(кВт·год).

Ціновий еквівалент пояснюється тим, що більшість водню виробляється з викопних видів палива, які ефективніше використовувати для виробництва хімічного продукту безпосередньо, ніж для виробництва електроенергії і подальшого електролізу.

РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ЗРІДЖЕНОГО ТА ГАЗОПОДІБНОГО ВОДНЮ В АВІАЦІЇ.

3.1. Розробки використання водню в авіації

Вивчення використання водню як палива в літаках розпочалося в 1956 році. США досягли польоту на літаку B57 Canberra, який використовував водневе паливо під тиском за допомогою гелію в одному з його двигунів, що є системою літака [14]. Після B57 в 1988 році війська випробували експериментальне переобладнання раннього серійного Ту-154 з одним двигуном на водні. У результаті випробування двигун з рідинним водневим двигуном був випробуваний на висоті до 7000 м і розігнався до 900 км/год. На жаль, програму рідкого водню (LH) було скорочено лише до п'яти рейсів і було вирішено не продовжувати використання такого палива через високу вартість та відсутність інфраструктури водню [35].

До сьогодні багато водневих прототипів літаків, таких як Tupolev Tu-155 (Tupolev, 2009), Antares DLR-H2 (Fuel Cell Works, 2009), Boeing phantom eye (Jackson and Haddox, 2010) і ENFICA-FC Rapid 200. -FC (Європейська комісія, 2011 р.) були побудовані з використанням методів компресійного та зрідженого зберігання[4]. Історичний часовий масштаб розвитку літаків, що працюють на рідкому водні та паливних елементах, проілюстрований на малюнку 4.

Найближчим часом, у вересні 2016 року, перший у світі чотиримісний пасажирський літак HY4 з двигуном на водневих паливних елементах здійснив свій перший політ в аеропорту Штутгарта. У цьому майбутньому електричне таксі; водневе паливо зберігається під тиском від 4300 PSI до 5800 PSI у двох баках з

вуглецевого волокна, які обидва розташовані в двох фюзеляжах. У цьому літаку з максимальною швидкістю 200 км/год паливний елемент безпосередньо перетворює водень в електрику, і єдиним відходом, який виходить з цього процесу, є вода. [34].

Питома енергія є важливим критерієм під час вибору відповідного пального для живлення літака. Значна частина ваги літального апарату, йде на зберігання пального, щоби забезпечити дальність польоту, а більша вага, означає більшу витрату пального. Літаки мають високу пікову потужність, отже потреба пального під час зльоту і посадки збільшується. Електричні батареї фактично усунено, як основне джерело енергії для комерційних літаків, але з 2016 року літаки на сонячних батареях вже здійснюють навколосвітні подорожі.

Ми розглядаємо використання водню в якості палива для двигунів в авіації.

Використання водню знімає проблему викидів вуглецю в навколишнє середовище

3.2. Різновиди авіаційних палив

Авіаційне пальне, є спеціалізованим пальним звичайно на нафтовій основі, використовуваним для повітряних суден. Воно, як правило, має більш високу якість, за паливо, яке використовується для менш важливих застосувань, таких як опалення або дорожній транспорт, і часто містить серед інших властивостей, добавки для зниження ризику замерзання або вибуху через високу температуру.

У більшості сучасних комерційних авіакомпаній і на військових літаках, застосовують реактивне пальне для найкращої ефективності його використання і зменшення витрат. Іншим авіаційним пальним, доступним для літаків, є види нафтового спирту (лігроїну), що використовуються у

двигунах зі свічками запалювання (тобто поршневі і роторні двигуни Ванкеля).

3.3. Літаки з водневим двигуном

Це літак, який використовує водневе паливо як джерело енергії. Водень можна або спалювати в реактивному двигуні або в іншому типі двигуна внутрішнього згорання,

Водень може використовуватися для живлення паливного елемента для вироблення електроенергії для живлення пропелера.

На відміну від більшості літаків, які зберігають паливо в крилах, літаки з водневим двигуном зазвичай мають водневі паливні баки всередині фюзеляжу.

Таблиця 3

Фізико хімічні властивості водню

| | Температура плавлення, К | Температура кипіння, К | Потрійна точка, К / кПа | Критична точка, К / кПа | Густина рідкий / газ, кг/м ³ |
|----------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---|
| H ₂ | 13,96 | 20,39 | 13,96 / 7,3 | 32,98 / 1,31 | 70,811 / 1,316 |
| HD | 16,65 | 22,13 | 16,60 / 12,8 | 35,91 / 1,48 | 114,80 / 1,802 |
| HT | | 22,92 | 17,63 / 17,7 | 37,13 / 1,57 | 158,62 / 2,310 |
| D ₂ | 18,65 | 23,67 | 18,73 / 17,1 | 38,35 / 1,67 | 162,50 / 2,230 |
| DT | | 24,38 | 19,71 / 19,4 | 39,42 / 1,77 | 211,54 / 2,694 |
| T ₂ | 20,63 | 25,04 | 20,62 / 21,6 | 40,44 / 1,85 | 260,17 / 3,136 |

3.4. Рідкий водень як кріогенне паливо

Рідкий водень існує в дуже вузькому інтервалі температур від $-252,76$ до $-259,2$ °С.

Це безбарвна рідина, дуже легка (густина при -253 °С — $0,0708$ г/см³)

й текуча (в'язкість при $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ — 13,8 пуаз).

Критичні параметри водню дуже низькі: температура $-240,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиск 12,8 атм.

Цим пояснюються труднощі при зрідженні водню. У рідкому стані рівноважний водень складається з 99,79 % пара- H_2 , 0,21 % орто- H_2 .

Щоб існувати як рідина, H_2 повинен бути охолоджений нижче критичної точки

33 К. Однак, щоб він був у повністю рідкому стані при атмосферному тиску, H_2 необхідно охолодити до 20,28 К ($-252,87\text{ }^{\circ}\text{C}$; $-423,17\text{ }^{\circ}\text{F}$).]

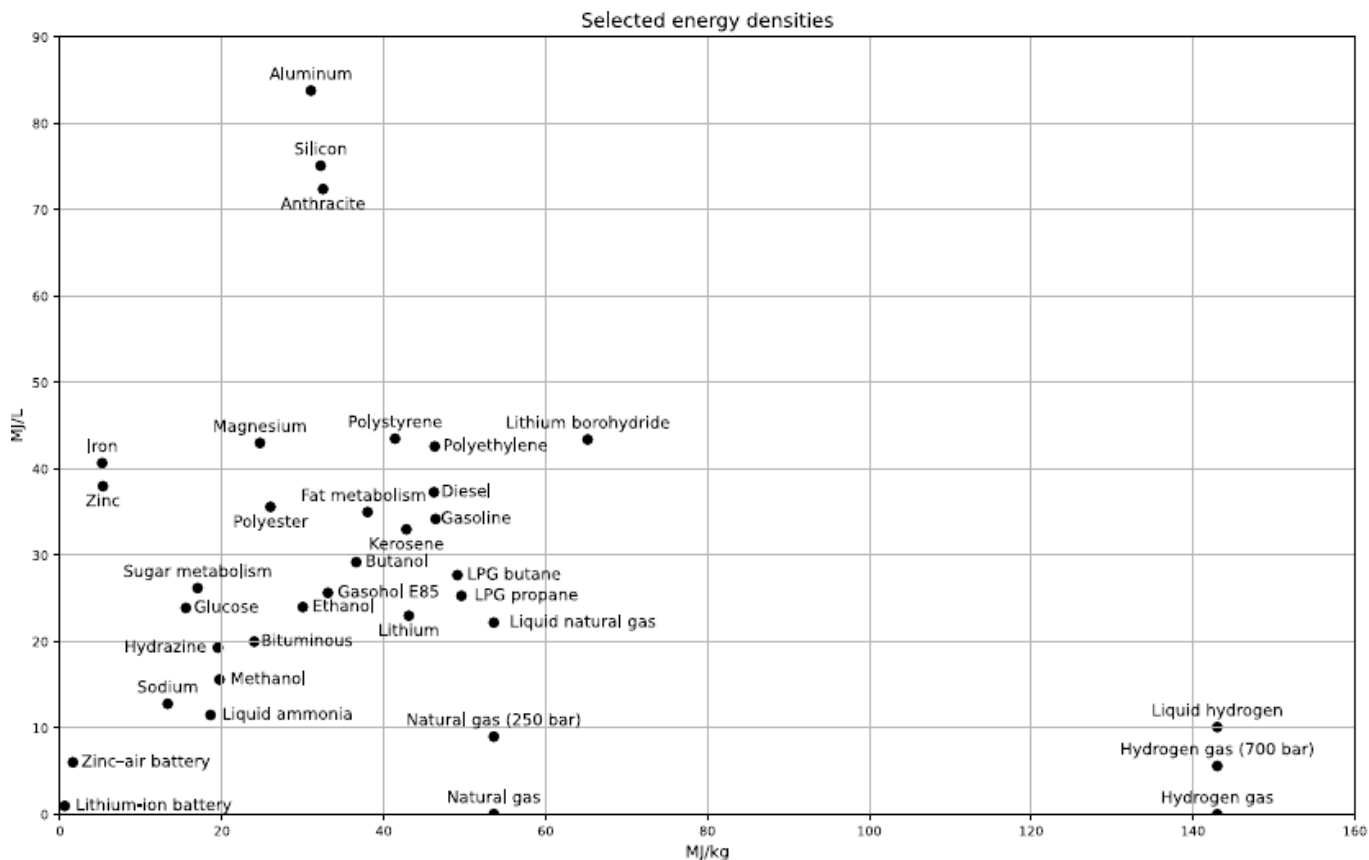
Копримований водень в авіації

Одним із поширених методів отримання рідкого водню є компресор, який за зовнішнім виглядом і принципом нагадує реактивний двигун. Рідкий водень зазвичай використовується як концентрована форма зберігання водню.

Як і для будь-якого газу, його зберігання у рідкому вигляді займає менше місця, ніж зберігання у вигляді газу при нормальній температурі та тиску.

Однак щільність рідини дуже низька в порівнянні з іншими поширеними видами палива. Після зрідження його можна зберігати у вигляді рідини в герметичних та термоізованих контейнерах

Порівняння енергій згоряння сполук з воднем



Значення в наступній таблиці є нижчими показниками для ідеального згоряння, не враховуючи масу або об'єм окислювача. Коли використовується для виробництва електроенергії в паливному елементі або для виконання роботи, це вільна енергія Гіббса реакції (ΔG), що встановлює теоретичну верхню межу та згоряння (120 МДж/кг).

Нижчі показники для ідеального згоряння

Енергія, що виділяється в результаті хімічних реакцій (окислення)

| Матеріал | Конкретні енергії (МДж/кг) | Енергія щільність (МДж/л) | Конкретні енергії (В·год/кг) | Енергія щільність (В·в/л) | Коментар |
|---|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|--|
| <u>Водень, рідина</u> | 141,86 (HHV) 119,93 (LHV) | 10,044 (HHV) 8,491 (LHV) | 39 405,6 (HHV) 33 313,9 (LHV) | 2790,0 (HHV) 2358,6 (LHV) | Відносяться показники енергії після повторного нагрівання. Дивіться примітку вище про використання в паливних елементах. |
| <u>Водень, газ (69 МПа, 25 °С)</u> | 141,86 (HHV) 119,93 (LHV) | 5,323 (HHV) 4 500 (LHV) | 39 405,6 (HHV) 33 313,9 (LHV) | 1478,6 (HHV) 1250,0 (LHV) | Дата з того самого посилання, що й для рідкого водню. Резервуари високого тиску важать набагато більше, ніж водень, який вони можуть умістити. Водень може становити близько 5,7% в загальній масі, що дає лише 6,8 МДж на кг загальної маси для палива. Дивіться примітку вище про використання в паливних елементах. |
| <u>Водень, газ (1 атм або 101,3 кПа, 25 °С)</u> | 141,86 (HHV) 119,93 (LHV) | 0,01188 (HHV) 0,01005 (LHV) | 39 405,6 (HHV) 33 313,9 (LHV) | 3,3 (HHV) 2,8 (LHV) | |
| <u>Діборан</u> | 78.2 | | 21 722,2 | | |
| <u>Берилій</u> | 67.6 | 125.1 | 18 777,8 | 34 750,0 | |
| <u>Боргідрид літію</u> | 65.2 | 43.4 | 18 111.1 | 12 055,6 | |
| <u>бор</u> | 58.9 | 137.8 | 16 361,1 | 38 277,8 | |
| <u>Метан (101,3 кПа, 15 °С)</u> | 55.6 | 0,0378 | 15 444,5 | 10.5 | |
| <u>ЗПГ (ПГ при -160 °С)</u> | 53.6(23) | 22.2 | 14 888,9 | 6 166,7 | |
| <u>CNG (ПГ стиснутий до 25 МПа = 3600 psi)</u> | 53.6(23) | 9 | 14 888,9 | 2 500,0 | |
| <u>Природний газ</u> | 53.6(23) | 0,0364 | 14 888,9 | 10.1 | |
| <u>LPG пропан</u> | 49.6 | 25.3 | 13 777,8 | 7 027,8 | |
| <u>LPG бутан</u> | 49.1 | 27.7 | 13 638,9 | 7 694,5 | |
| <u>Бензин (бензин)</u> | 46.4 | 34.2 | 12 888,9 | 9 500,0 | |

3.5. Рідкий водень як паливо в авіації

Рідкий водень має в 4,1 рази меншу енергетичну щільність, ніж реактивне паливо на основі гасу; а для зберігання рідкого водню потрібен герметичний резервуар з мінімальною поверхнею для мінімального термічного впливу

вага ізоляції, що веде до циліндричних баків у фюзеляжі, а не до мокрих крил у звичайних літаках. Це призводить до довшого, ширший фюзеляжу; додавання більшого опору тертя оболонки та опору хвилі через додаткову

зволожену область; додаткова вага бака; і коливання ваги та балансу під час польоту.

Оскільки питома енергія водню в 2,8 рази вище, ніж реактивного палива, водневому літаку знадобиться в 2,8 рази менше ваги палива для того ж діапазону, ігноруючи наслідки додаткового об'єму та ваги бака. Оскільки у авіалайнерів частка палива від MTOW становить від 26% для середньоміагістральних до 45% для далеких, максимальна вага палива може бути знижена до 9%-16% від MTOW, але це буде лише для незвичайних максимальний паливний варіант компромісу між корисним навантаженням і діапазоном.

Ефективність літака, що працює на водневому паливі, є компромісом між більшою площею обгорненої ю, меншою вагою палива та додатковою вагою бака, що залежить від розміру літака.

Енергія і особливості зберегання водню

Водень має питому енергію (120 МДж/кг) що в 2,8 рази вище, ніж традиційне реактивне паливо (43 МДж/кг).

Кріогенний рідкий водень має в 4,1 рази меншу щільність енергії (8,5 МДж/л порівняно з 35 МДж/л), але його потрібно охолоджувати до 20 К (-253 °С) і зберігати в ізольованих резервуарах, але низького тиску

Газоподібний водень має меншу щільність енергії, потребує резервуарів високого тиску, що досягають до 700 бар, часто з вуглецевого волокна, але його можна зберігати при звичайних температурах.

Способи зберегання газоподібного та зрідженого водню

Таблиця 6.

Способи зберегання газоподібного та зрідженого водню

| Спосіб зберігання | Массовое зМІСТ водорода | Робоча температура | Робочий тиск |
|--|-------------------------|--------------------|--------------|
| Стальні баллони для компримированного водорода | до 1% | 20 - 40 °С | 150 бар |
| Композитні балони високоякісні для композитного водороду | 5 - 7% | 20 - 40 °С | 350 бар |
| Композитні балони вищого тиску для компримированого водороду | 10,5 - 13,8% | 20 - 40 °С | 700 бар |
| Кріогенні ємності для зрідженого водню | До 7,1% | - 252 °С | 1 бар |
| Рідкі органічні гідриди | До 7,2% | 180 - 280 °С | 1-10 бар |
| Обратимо гідровані метали і сплави (металлогідриди) | 1,5 - 7,5% | 100 - 300 °С | 1 - 5 бар |
| Ріткий аммиак | 17% | 400 - 600 °С | 350-500 бар |

3.6. Згоряння водню в авіаційних ДВС

Продуктом згоряння водню в середовищі чистого кисню є виключно водяна пара. Однак високі температури згоряння та наявний атмосферний азот можуть призвести до розриву зв'язків $N \equiv N$, утворюючи токсичні NO_x , якщо не проводити очищення відпрацьованих газів..

Оскільки вода часто вважається нешкідливою для навколишнього середовища, двигун, що горить, можна вважати «нульовим викидом». Однак в авіації водяна пара, що викидається в атмосферу, сприяє глобальному потеплінню (меншою мірою, ніж CO_2).[9]

Щільність рідкого водню становить лише 70,85 г/л (при 20 К), відносна густина всього 0,07. Хоча питома енергія більш ніж вдвічі перевищує

показники інших видів палива, це дає йому надзвичайно низьку об'ємну щільність енергії, у багато разів нижчу.

Для рідкого водню потрібна криогенна технологія зберігання, така як спеціальні теплоізоляційні контейнери, і вимагає особливого поводження, загального для всіх криогенних палив. Це схоже на рідкий кисень, але важче.

Навіть із теплоізолюваними контейнерами важко підтримувати таку низьку температуру, і водень буде поступово витікати (як правило, зі швидкістю 1% на добу[10]). Він також має багато тих же проблем безпеки, що й інші форми водню, а також він достатньо холодний, щоб зріджувати або навіть затверджувати атмосферний кисень, що може бути небезпечним для вибуху.

Потрійна точка водню знаходиться при 13,81 К[5]7,042 кПа.[11]

Викиди літаків на водневому паливі

Літаки з воднем, що використовують конструкцію паливних елементів, мають нульові викиди під час експлуатації,

тоді як літаки, які використовують водень як паливо для двигуна внутрішнього згорання, є нульовими викидами для CO₂, але не для NO_x:

спалювання водню в повітрі призводить до утворення NO_x.

Тобто реакція $H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$ в азото багатом середовищі повітрі викликає утворення NO_x.

3.7. Ракетні двигуни на водні (криогенні)

Для створення корисної тяги ракетним двигунам потрібні високі масові витрати як окислювача, так і палива. Кисень, найпростіший і найпоширеніший окислювач, знаходиться в газовій фазі при стандартній температурі і тиску, як і водень, найпростіше паливо. Незважаючи на те, що паливні речовини можна зберігати у вигляді газів під тиском, для цього знадобляться великі важкі танки, які утруднюють, якщо взагалі неможливим,

орбітальний політ. З іншого боку, якщо пропеленти достатньо охолоджені, вони перебувають у рідкій фазі з більш високою щільністю та нижчим тиском, що спрощує резервування. Ці кріогенні температури змінюються залежно від палива, при цьому рідкий кисень існує нижче $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-297,4\text{ }^{\circ}\text{F}$; $90,1\text{ K}$) і рідкий водень нижче $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-423,4\text{ }^{\circ}\text{F}$; $20,1\text{ K}$). Оскільки один або кілька пропелентів знаходяться в рідкій фазі,[2]

Випробовувалися різні комбінації кріогенного палива та окислювача, але комбінація рідкого водню (LH_2) і окислювача рідкого кисню (LOX) є однією з найбільш широко використовуваних.[



Рис. 4. *Вулкан* - двигун ракети Ariane 5

Принцип роботи авіаційного газотурбінного двигуна на водороді:

- 1). Всмоктування і стиснення повітря в лопатковому компресорі, подача його в камеру згоряння;
- 2). Змішування стисненого повітря з паливом для утворення паливно-повітряної суміші (ППС) і згоряння цієї суміші;
- 3). Розширення газів через їхнє нагрівання при згорянні паливо-повітряної суміші, що формує вектор тиску газу, спрямований в бік найменшого опору (в напрямку лопаток турбіни), передача енергії (тиску) газу лопатками турбіни на диск або вал, в якому ці лопатки закріплено;
- 4). Приведення до обертання диска турбіни і, внаслідок цього, передача крутного моменту по валу з диска турбіни на диск компресора.[1]

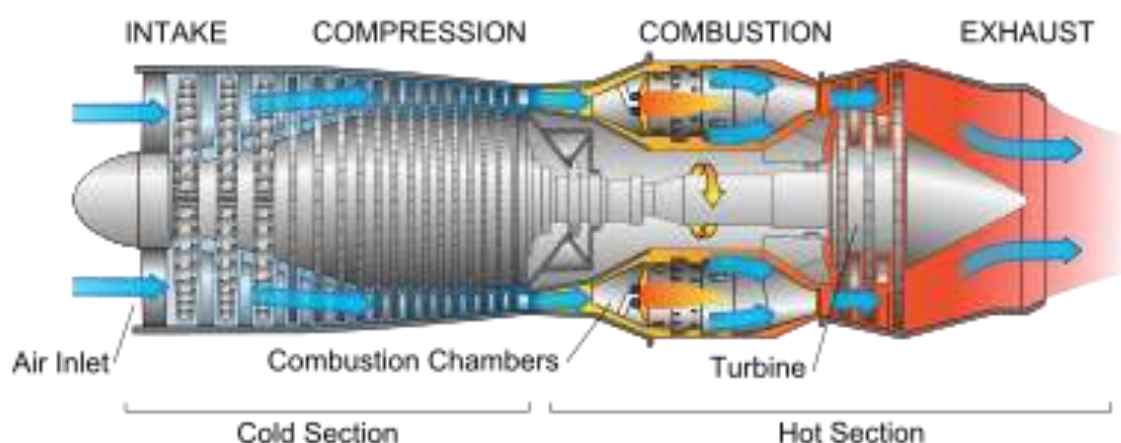


Рис.5. Принцип роботи авіаційного газотурбінного двигуна на водороді

3.8. Літаки з водневими двигунами

Літак з водневими двигунами це літак, який використовує водневе паливо як джерело енергії.

Водень можна або спалювати в реактивному двигуні або іншому типі двигуна внутрішнього згоряння, або може використовуватися для живлення паливного елемента для вироблення електроенергії для живлення пропелера.

На відміну від більшості літаків, які зберігають паливо в крилах, літаки з водневим двигуном зазвичай мають водневі паливні баки всередині фюзеляжу.

У вересні 2020 року Airbus представив три ZERO еконцепції на водневому паливі, спрямовані на комерційне обслуговування до 2035 року: [турбогвинтовий на 100 пасажирів, турбовентилятор на 200 пасажирів і футуристичний дизайн, заснований на змішаному корпусі крила. Літак оснащений газовими турбінами, а не паливними елементами.

У лютому 2022 року Airbus оголосила про демонстрацію турбовентилятора, що працює на рідкому водневому паливі, при цьому CFM International модифікує камеру згоряння, паливну систему та систему керування GE Passport для першого польоту, який очікується протягом п'яти років, встановленого на опорі фюзеляжу на A380. прототип.[26]

Прототип з водневим двигуном здійснив свій перший політ 15 квітня 1988



Рис.6. Прототип літака з водневим двигуном

Зміна форми літака на водні для підвищення об'єму баку палива

Змішане тіло крила (BWB), також відомий як змішане тіло або гібридний корпус крила (HWB), являє собою літак, який не має чіткої розмежувальної лінії між крилами та основною частиною корабля.[1] Літак має чітку структуру крила та кузова, які плавно змішані між собою без чіткої розмежувальної лінії.[2] Це контрастує з літаючим крилом, яке не має чіткого фюзеляжу, і підйомним тілом, яке не має чітких крил. Дизайн BWB може бути або не бути безхвостим. Основна перевага BWB полягає у зменшенні зволоженої площі та супутнього опору форми, пов'язаної зі звичайним з'єднанням крило-кузов.

Йому також можна надати широкий корпус у формі аеродрому, що дозволить всьому кораблю створювати підйомну силу і таким чином зменшити розмір і опір звичайних крил.



Рис.7. Літак з комбінованим фюзеляжем



Рис. 8 Літак на водневому паливному елементі

У 2008 році Boeing Fuel Cell Demonstrator здійснив прямолінійний політ під час пілотованої місії на водневому паливному елементі

Літаки з газотурбінами на водні

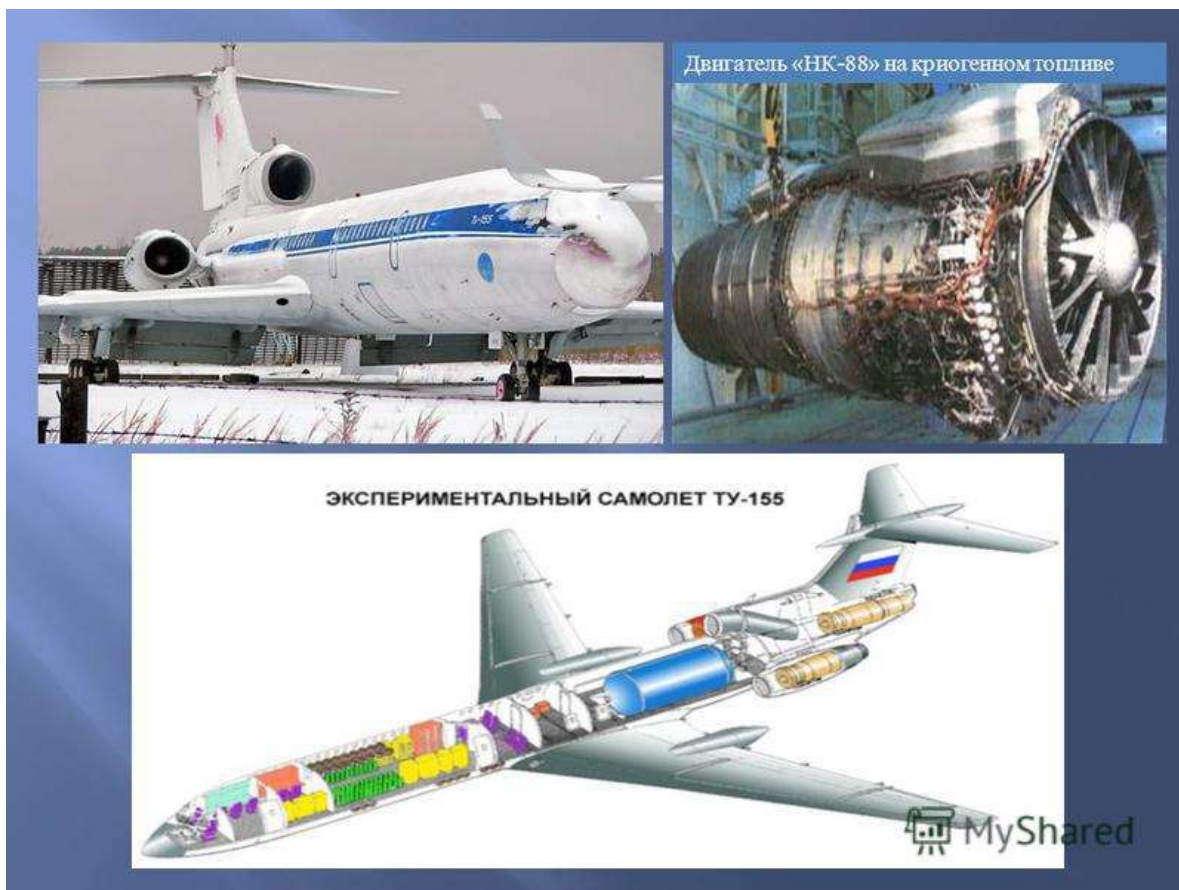


Рис.9. Моделі газотурбінних літаків на водні

Турбовентиляторні двигуни на водні

Pratt & Whitney хоче пов'язати свою архітектуру турбовентилятора з редуктором зі своїм проектом турбінного двигуна з впорскуванням водню і парю (HySIITE), щоб уникнути викидів вуглекислого газу, скоротити викиди NOx на 80% і зменшити споживання палива на 35% порівняно з поточним. реактивне паливо PW1100G, для вступу на службу до 2035 року з сумісним планером.[25] 21 лютого 2022 року Міністерство енергетики США за схемою OPEN21, яку керує його Агентство передових дослідницьких проектів-Енергетика (ARPA-E), нагородило P&W 3,8 мільйона доларів за дворічні дослідження на ранній стадії, щоб розробити камеру згоряння та використовуваний теплообмінник. для відновлення водяної пари у потоці вихлопних газів, що вводяться в камеру згоряння для збільшення її

потужності, і в компресор як проміжний охолоджувач, і в турбіну як охолоджувач.[25]

3.9.Безпека використання газоподібного і криогенного водню в авіації

Водень при змішуванні з повітрям утворює вибухонебезпечну суміш — так званий гримучий газ. Найбільшу вибухонебезпечність цей газ має при об'ємному відношенні водню і кисню 2:1, або водню та повітря приблизно 2:5, оскільки в повітрі міститься приблизно 21 % кисню. Також водень пожежонебезпечний. Рідкий водень при потраплянні на шкіру може викликати сильне обмороження.

Вважається, що вибухонебезпечні концентрації водню з киснем містять від 4 до 96 % об'ємних та при суміші з повітрям від 4 % до 75 (74)% за об'ємом. Такі цифри фігурують зараз у більшості довідників, і ними цілком можна користуватися для орієнтовних оцінок. Проте слід мати на увазі, що більш пізні дослідження (приблизно кінець 80-х) виявили, що водень у великих обсягах може бути вибухонебезпечний і при меншій концентрації. Чим більший об'єм, тим менша концентрація водню небезпечна.

3.10. SABRE комбінований (ракетний двигун)

«ШАБЛЯ» (Синергетичний ракетний двигун з повітряним диханням[4]) — це концепція, Reaction Engines Limited для гіперзвукового гібридного ракетного двигуна з повітрообміном з попереднім охолодженням.

Двигун, створений на основі концепції SABRE, під назвою Scimitar, був розроблений для пропозиції гіперзвукового пасажирського літака A2 для дослідження LAPCAT, яке фінансується Європейським Союзом.

Як і RB545, конструкція SABRE не є ні звичайним ракетним двигуном, ні звичайним реактивним двигуном, а гібридом, який використовує повітря з навколишнього середовища на низьких швидкостях/висотах і зберігає рідкий кисень на більшій висоті. Двигун SABRE «покладається на теплообмінник, здатний охолоджувати повітря, що надходить, до $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-238\text{ }^{\circ}\text{F}$), щоб забезпечити кисень для змішування з воднем і забезпечити реактивну тягу під час атмосферного польоту перед перемиканням на рідкий кисень у резервуарі в космосі».

Згодом стиснене повітря подається в камеру згоряння ракети, де воно запалюється разом із накопиченим рідким воднем. Високий коефіцієнт тиску дозволяє двигуну забезпечувати високу тягу на дуже високих швидкостях і висотах.

Після відключення вхідного конуса на швидкості 5,14 Маха і на висоті 28,5 км,[3] система продовжує працювати як високопродуктивний ракетний двигун замкнутого циклу, що спалює рідкий кисень і рідкий водень з бортових паливних баків, що потенційно дозволяє гібридній концепції космічного літака, як-от Skylon, досягати орбітальної швидкості після виходу з атмосфери на крутому підйомі.



Рис.10. Синергетичний ракетний двигун з повітряним диханням

Вітчизняна розробка водневго двигуна ДВС

ТЕХНОЛОГІЇ11:45 - 05 січня 2022

«Укроборонпром» розробляє сучасний водневий двигун.

На даний момент ведуться роботи зі створення випробувального стенду для розробки дослідних зразків двигунів. Цей план планують завершити в третьому кварталі 2022 року. У 2023 році планують виготовити робочий зразок камери згоряння на водневому паливі для газотурбінного двигуна потужністю 25 мегават.



Рис.11. Сучасний водневий двигун від «Укроборонпром»

Висновки

- Водень є одним із потенційних рішень, які можна поєднати з іншими заходами для повної декарбонізації польотів на великі відстані.
- Хоча водневі електричні технології повинні продовжувати розвиватися, на основі сучасних акумуляторних технологій, це можливо лише для польотів на короткі відстані та з обмеженим корисним навантаженням.
- Водень пропонує можливості та обмеження для сектора.
- Можливо, спалювання водню в реактивному двигуні призведе до викидів лише водяної пари.
- Це паливо майже повністю усуває будь-які викиди, пов'язані з вуглецем, включаючи сірку, тверді частки та оксиди азоту.
- Потрібні нові конструкції літаків, які можуть дозволити такі ідеї, як літаки зі змішаним крилом.
- Це може дати деякі аеродинамічні переваги, однак недоліком може бути час, затрачений на сертифікацію радикально нових літаків, а також потенційно значні витрати на перепроєктування та сертифікацію нових літаків та експлуатаційної інфраструктури

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Singh, V., & Sharma, S. K. (2015). Fuel consumption optimization in air transport: a review, classification, critique, simple meta-analysis, and future research implications. *European Transport Research Review*, vol. 7, no. 2, p.12, DOI 10.1007/ s12544-015-0160-x
2. Boeing :Summary outlook 2008-2027,
http://81.47.175.201/transvisions/documents/air/boeing_cmo_summary_2008.pdf [Accessed in December 2017]
3. Boeing frontiers, September 2008, Volume VII, Issue V,
<http://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2008/september/sep08frontiers.pdf> [Accessed in December 2017]
4. Dincer, I., & Acar, C. (2016). A review on potential use of hydrogen in aviation applications. *International Journal of Sustainable Aviation*, vol. 2, no. 1, p. 74-100, DOI: 10.1504/IJSA.2016.076077.
5. Bicer, Y., & Dincer, I. (2017). Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 16, p. 10722-10738, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.12.119
6. Curl, H. C., & O'Donnell, K. (1977). Chemical and physical properties of refined petroleum products (No. ERL MESA-17). US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories.
7. Facts and Figures, Air Transport Action Group, May 2016,
<http://www.atag.org/facts-and-figures.html> [Accessed in August 2017].
8. Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G., & Moussiopoulos, N. (2005). Life cycle assessment of kerosene used in aviation (8 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 10, no. 6 , p. 417-424, DOI: 10.1065/lca2004.12.191.

9. Sharpe, J. E., Bimbo, N., Ting, V. P., Rechain, B., Joubert, E., & Mays, T. J. (2015). Modelling the potential of adsorbed hydrogen for use in aviation. *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 209, p. 135-140, DOI: 10.1016/j.micromeso.2014.08.038.
10. Verstraete, D. (2013). Long range transport aircraft using hydrogen fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 34, p. 14824-14831, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.09.021.
11. Koroneos, C. J., & Moussiopoulos, N. (2002). Cryoplane –hydrogen vs. kerosene as aircraft fuel. *Proceedings of the Geophysical Society XXVII General Assembly, Nice, France*, p. 21-26.
12. Contreras, A., Yiğit,., Özay, K., & Veziroğlu, T. N. (1997). Hydrogen as aviation fuel: a comparison with hydrocarbon fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 22, no. 10-11 , p. 1053-1060, DOI: 10.1016/S0360-3199(97)00008-6.
13. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. Module 1: Hydrogen Properties. U.S. DOE. 2001, https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf [Accessed in December 2017].
14. Şenel, K. (2007), Hidrojenin yakıt olarak uçaklarda kullanımı. yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
15. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. Module 2: Hydrogen Use. U.S. DOE. 2001, <https://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/fcm02r0.pdf> [Accessed in December 2017].
16. Riis, T., Hagen, E. F., Vie P. J. S., Ulleberg, Ø., Sandrock, G.(2006). Hydrogen production and storage, International Energy Agency.
17. Bhandari, R., Clemens, A., Trudewind, Zapp, P.(2013). Life cycle assessment of hydrogen production methods – a review, STE research report.
18. Edwards, P. P., Kuznetsov, V. L., & David, W. I. F. (2007). Hydrogen energy. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical,*

- Physical and Engineering Sciences, vo. 365, no. 1853, p. 1043-1056, DOI: 10.1098/rsta.2006.1965.
19. Stadler, P. (2014). Cost evaluation of large scale hydrogen production for the aviation industry. Master Semester Project.
 20. Zhang, F., Zhao, P., Niu, M., & Maddy, J. (2016). The survey of key technologies in hydrogen energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 33, p. 14535-14552, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.293.
 21. Gong A., Verstraete D., (2017). Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: Current status and research needs. *Int. J. of Hydrogen Energy*, vol.42, no. 33, p. 21311-21333, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.148.
 22. Colozza, A. J., & Kohout, L. (2002). Hydrogen storage for aircraft applications overview. National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center.
 23. Hwang, H. T., & Varma, A. (2014). Hydrogen storage for fuel cell vehicles. *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 5, p. 42-48, DOI : 10.1016/j.coche.2014.04.004.
 24. Report on hydrogen storage and applications other than transportation.(2016). Sub-Committee on Hydrogen Storage and Applications Other than Transportation of the Steering Committee on Hydrogen Energy and Fuel Cells Ministry of New and Renewable Energy, Government of India, New Delhi
 25. Swider-Lyons, K. E., MacKrell, J. A., Rodgers, J. A., Page, G. S., Schuette, M., & Stroman, R. O. (2011, September). Hydrogen fuel cell propulsion for long endurance small UAVs. In *The AIAA centennial of naval aviation forum* (Vol. 100).
 26. Satyapal, S., Petrovic, J., Read, C., Thomas, G., & Ordaz, G. (2007). The US Department of Energy's National Hydrogen Storage Project: Progress towards meeting hydrogen-powered vehicle requirements. *Catalysis today*, vol. 120, no. 3, p. 246-256, DOI: 10.1016/j.cattod.2006.09.022.

27. Elitzur, S., Rosenband, V., & Gany, A. (2017). On-board hydrogen production for auxiliary power in passenger aircraft. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no.19 , p. 14003-14009, DOI :10.1016/j.ijhydene.2017.02.037.
28. Handbook, F. C. (2004). EG&G technical services. Inc., Albuquerque, NM, DOE/NETL-2004/1206.
29. Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, p. 810-853, DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.012
30. <http://www.fuelcelltoday.com/technologies>. [Accessed in August 2017].
31. Bradley, T. H., Moffitt, B. A., Thomas, R. W., Mavris, D. N., & Parekh, D. E. (2006). Test results for a fuel cell-powered demonstration aircraft (No. 2006-01-3092). SAE Technical Paper. DOI:10.4271/2006-01-3092.
32. Brandon, N., & Hart, D. (1999). *An introduction to fuel cell technology and economics*. Centre for Energy Policy and Technology, Imperial College.
33. <http://earthsci.org/mineral/energy/fuelcell/fuelcell.html> [Accessed in August 2017].
34. <http://www.aerospace-technology.com/projects/hy4-aircraft/> [Accessed in August 2017].
35. <http://ram-home.com/ram-old/tu-155.html> [Accessed in August 2017]
36. Khandelwal, B., Karakurt, A., Sekaran, P. R., Sethi, V., & Singh, R. (2013). Hydrogen powered aircraft: the future of air transport. *Progress in Aerospace Sciences*, vol.60, p. 45-59, DOI: 10.1016/j.paerosci.2012.12.002.
37. Kang, K., Park, S., Cho, S. O., Choi, K., & Ju, H. (2014). Development of Lightweight 200-W Direct Methanol Fuel Cell System for Unmanned Aerial Vehicle Applications and Flight Demonstration. *Fuel Cells*, vol.14, no. 5, p. 694-700.
38. Bradley, T. H., Moffitt, B. A., Fuller, T. F., Mavris, D. N., & Parekh, D. E. (2009). Comparison of design methods for fuel-cell-powered unmanned aerial vehicles. *Journal of Aircraft*, vol. 46, no. 6, p. 1945.

39. Rajashekara, K., Grieve, J., & Daggett, D. (2006, October). Solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid APU system for aerospace applications. In Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE, vol. 5, p. 2185-2192. IEEE.
40. Wu, S., & Li, Y. (2014, October). Fuel cell applications on more electrical aircraft. In Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference on, p. 198-201. IEEE.
41. Perry, M. L., & Fuller, T. F. (2002). A historical perspective of fuel cell technology in the 20th century. Journal of the electrochemical society, vol. 149, no. 7, p. S59-S67.
42. Альтернативні палива: підручник : підручник / А. Д. Кустовська, С. В. Іванов, Є. О. Бережний. — К. : НАУ, 2014. — 624 с.