

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І АУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА АВІОНІКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач випускової кафедри

\_\_\_\_\_ С.В. Павлова

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021р.

## ДИПЛОМНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА  
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

**Тема: «Лазерний витратомір водневого палива на літальному апараті»**

Виконавець: Петренко Євгеній Андрійович

Керівник: Проф.штат. Землянський Володимир Михайлович

Нормоконтролер:

\_\_\_\_\_

(підпис)

В.В.Левківський

(П.І.Б.)

Київ 2021

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Напрямок (спеціальність) 173 «Авіоніка»

(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ С.В. Павлова

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021р.

## ЗАВДАННЯ

**на виконання дипломної роботи (проекту)**

Петренко Євгеній Андрійович

1. Тема роботи: «Лазерний витратомір водневого палива на літальному апараті» затверджена наказом ректора від «22» березня 2021 р. №469/ст
2. Термін виконання роботи: з 17 травня 2021 по 20 червня 2021
3. Вихідні дані роботи: процес роботи лазерних витратомір на літальних апаратах; дослідження водню відносно застосування його на літальних апаратах, а також експериментальні дослідження
4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1. Загальне означення концепції водневого палива на літальних апаратах; Розділ 2. Недоліки і взаємодія лазерного матеріалу з воднем; Розділ 3. Вплив логістичних потоків на надійність авіаційного транспорту та техніки
5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: таблиці, рисунки, графіки.  
Зміни в часі атомного відношення водню до вуглецю ( $H / C$ ) у світовій паливній суміші з точки зору співвідношення  $H / (H + C)$ , Світове заміщення первинної енергії з точки зору частки  $F$  загальних джерел, захоплених ідентифікованим джерелом, Світовий попит на чистий водень (1975-2018)

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Підбір літератури	17.05.2021	
2.	Підготовка та написання 1 розділу	19.05.2021	
3.	Підготовка та написання 2 розділу	21.05.2021	
4.	Підготовка та написання 3 розділу	24.05.2021	
5.	Перевірка на антиплагіат та отримання рецензії на диплом	09.06.2021	
9.	Підготовка презентації та доповіді	13.06.2021	

7. Дата видачі завдання: “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_ Землянський В.М

(підпис керівника)

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Петренко Є.А.

(підпис випускника)

(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Лазерний витратомір водневого палива на літальному апараті» : 80 с., 7 рис., 7 графіки, 6 літературних джерела

**Об'єкт дослідження:** Загальне означення концепції водневого палива на літальних апаратах а також роль складів у виробництві водневого палива та її роль в майбутньому

**Мета роботи:** аналіз та розв'язання проблеми переходу літаків роботи на водню, а також її взаємодія з лазерним матеріалом

**Методи дослідження:** використовувались методи теорії рішень, теорії надійності, теорії ймовірностей, теорії статистики, теорії інформації.

**Синтетичні палива або синтетичне паливо, людський фактор, технічне обслуговування і ремонт, науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи, міжнародне агентство по відновлювальним джерелам енергії, Європейське Агентство з безпеки польотів**

## **ЗМІСТ**

Перелік умовних позначень, скорочень, термінів

Вступ

### **РОЗДІЛ 1. Загальне означення концепції водневого палива на літальних апаратах**

- 1.1. Сутність та поняття концепції водневого палива на літальному апараті
- 1.2. Переваги водневого палива
- 1.3. Властивості водню на літальному апараті
- 1.4. Актуальність переходу літаків роботи на водню
- 1.5. Робота водню з реактивними двигунами
- 1.6. Поновлення водневого палива
- 1.7. Фінансова складова у використанні водневого палива
- 1.8. Висновок

### **РОЗДІЛ 2. Недоліки і взаємодія лазерного матеріалу з воднем**

- 2.1. Недоліки використання водневого палива на літальному апараті
- 2.2. Взаємодія водню з лазерним матеріалом та історія витратомірів
- 2.3. Експериментальні дослідження взаємодій
- 2.4. Експлуатація водневих літаків
- 2.5. Висновок

### **РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ЛОГІСТИЧНИХ ПОТОКІВ НА НАДІЙНІСТЬ АВІАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТУ ТА ТЕХНІКИ**

- 3.1. Актуальність і перспектива водневого палива
- 3.2. Роль складів у виробництві водневого палива та її роль в майбутньому

### 3.3. Висновок

#### **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

АТ - авіаційна техніка

БП - безпека польотів

ЗПС – злітно-посадкова смуга

НДДКР - науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи

ІТС - інженерно-технічний склад

ЛФ – людський фактор

ПП – професійна підготовка

ПС - повітряне судно

ТО - технічне обслуговування

ТОiP - технічне обслуговування і ремонт

АТАG - група дій по повітряному транспорту є коаліцією авіаційних фахівців галузі з акцентом на питаннях сталого розвитку

LH2 - рідкий стан елемента водень

Synfuel - Синтетичні палива або синтетичне паливо

EASA - Європейське Агентство з безпеки польотів

ZeroAvia - британський / американський розробник воднево-електричних літаків

IRENA – міжнародне агентство по відновлювальним джерелам енергії

## Вступ

Водень та енергія мають давню спільну історію - потужність перших двигунів внутрішнього згоряння понад 200 років тому стала невід'ємною частиною сучасної нафтопереробної галузі. Він легкий, зберігається, енергоємний і не виробляє прямих викидів забруднюючих речовин або парникових газів. Але для того, щоб водень зробив значний внесок у перехід до чистої енергії, його потрібно застосовувати в секторах, де він майже повністю відсутній, таких як транспорт, будівлі та виробництво електроенергії.

«Майбутнє водню» забезпечує широке та незалежне обстеження водню, яке розкриває те місце, де зараз справи; шляхи, якими водень може допомогти досягти чистого, безпечного та доступного енергетичного майбутнього; і як ми можемо реалізувати його потенціал.

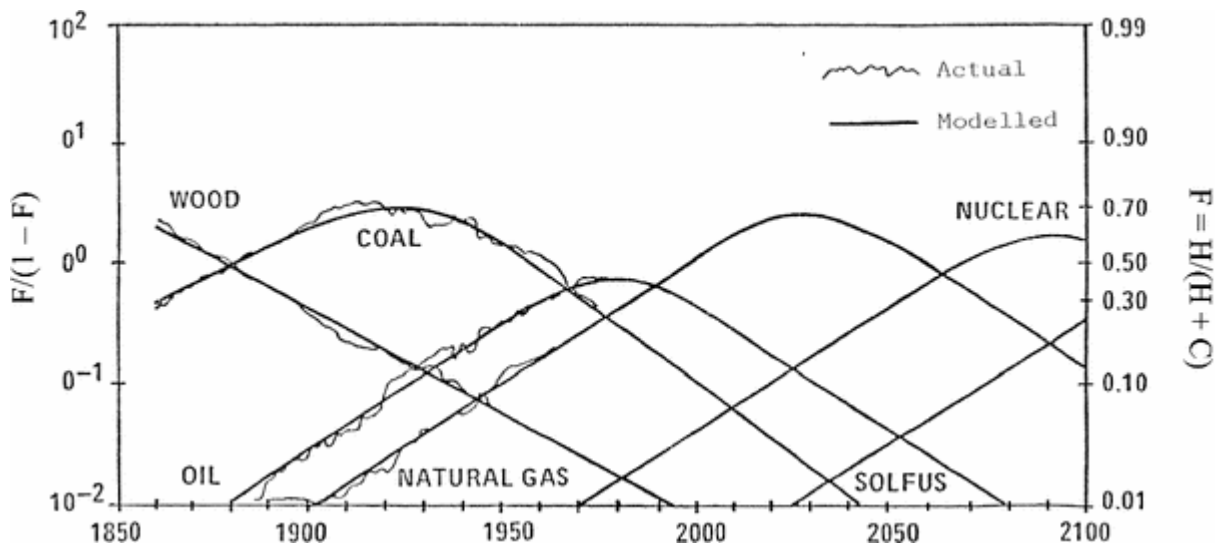
Світ має найрізноманітніші джерела енергії, які можна зібрати для отримання ще більш різноманітних носіїв енергії. Деякі джерела енергії, такі як викопне паливо, також є носіями енергії. Тобто їх енергія може транспортуватися і використовуватись споживачами енергії в тій самій формі, в якій вона знаходиться. Інші джерела енергії, такі як падаюча вода та сонячне випромінювання, спочатку повинні бути перетворені в енергетичну валюту (зазвичай, в електроенергію), перш ніж енергію можна використовувати.

В даний час викопне паливо є основними джерелами енергії та енергоносіями у світі. Однак поставки викопного палива є обмеженими, і їх використання спричиняє вплив на навколишнє середовище. Оскільки поставки з часом починають дедалі зменшуватися, а екологічні проблеми зростають, світ все частіше звертатиметься до альтернативних джерел енергії. Але всі передбачувані майбутні джерела енергії (падіння води, сонячна радіація, уран, вітер, припливи, хвилі тощо) не можуть виступати в ролі носіїв енергії для надання послуг кінцевого споживання. Більше того, використовуючи сучасну технологію, ці джерела здатні виробляти, здебільшого, один носій енергії: електрику.

Однак світові суспільства не можуть ефективно працювати з енергією, що забезпечується лише у вигляді електроенергії, оскільки їм також потрібні хімічне паливо та сировина. Наприклад, на багатьох транспортних засобах, особливо на літаках, неможливо економічно керувати електрикою. Оскільки використання викопного палива скорочується і замінюється енергоносіями з не викопних джерел, у кінцевому підсумку світ може стати перенасиченим електроенергією та бракувати хімічного палива.

Маркетті проілюстрував цей момент, використовуючи історичні дані про джерела енергії, зібрані групою енергетичних систем Міжнародного інституту прикладного системного аналізу. Дані представлені з абсцисою часу та ординатою  $F / (1 - F)$ , де  $F$  - частка загальної кількості джерел, захоплених ідентифікованим джерелом. У правій частині ординати  $F$  представлено в нелінійному масштабі (використовується параметр  $F / (1 - F)$ , оскільки він важливий у процедурах логістичної заміни, які використовувались для моделювання даних). Малюнок 1 показує, що з плином часу постійно зменшується частка світових джерел енергії постачається деревиною, вугіллям, нафтою та природним газом; на рисунку також передбачається, що зростаюча частка енергоносіїв у майбутньому буде забезпечуватися ядерним поділом та «сольфусом» (сонячний та ядерний синтез). Енергію вітру можна розглядати як частину сольфуса. Ймовірно, існує максимальна частка енергетичних операцій, які можуть використовувати електроенергію; припускаючи, що це значення 0,3, можна бачити, що частка енергетичних транзакцій із використанням ядерного розподілу, сонячного та ядерного синтезу в кінцевому підсумку перевищить 0,3 “стелю”, що призведе до надлишку електроенергії. У деяких регіонах та країнах іноді існували надлишки електроенергії.





*Світове заміщення первинної енергії з точки зору частки  $F$  загальних джерел, захоплених ідентифікованим джерелом*

Цей аргумент, який впливає із майбутнього спаду використання викопного палива, показано на рис. 1, та обмеження кінцевого споживання енергії, що обслуговується електроенергією, свідчить про те, що врешті-решт буде потрібно виробляти деяке хімічне паливо або безпосередньо з неуглеводнів джерела енергії або з електроенергії, яку вони вже здатні виробляти. Інші дослідники висловлювали подібні аргументи. Більше того, серед багатьох дослідників існує консенсус щодо того, що водень є найбільш логічним вибором як хімічного палива в майбутніх суспільствах світу. Потенційна «воднева економіка», де водень та електроенергія служать доповнюючими вторинними енергетичними носіями, передбачалася протягом багатьох десятиліть. Зверніть увагу, що в економіці водню залишаться інші первинні енергетичні носії, такі як уран, які можна легко зберігати та транспортувати, навіть якщо водень та електроенергія стають основними вторинними енергетичними носіями.

РОЗДІЛ 1. Загальне означення концепції водневого палива на літальних апаратах

1.1 Крилатою фразою для переходу до економіки з низьким або нульовим рівнем вуглецю є "наелектризувати все" - тобто створити світ, в якому більшість видів людської діяльності, починаючи від виробництва та будівництва, закінчуючи транспортом та туризмом, працюють на електроенергії, що виробляється з низьких або нульових джерел вуглецю, таких як вітрова, сонячна і, можливо, ядерна енергетика. Але є проблема: деякі галузі, як видається, важко, а то й неможливо електрифікувати в найближчій та середньостроковій перспективі, і авіація, мабуть, найголовніша серед них.

До того, як пандемія заснувала більшість польотів, на комерційну авіацію припадало близько 2,5% глобальних викидів вуглекислого газу . Це звучить як невелика частка в цілому, але це більше, ніж у Німеччині (2,2%), і це ще не вся історія. На вуглекислий газ припадає приблизно половина внеску авіації в те, що відоме як її ефективне випромінювання, тобто загальний внесок у фактори, які насправді сприяють підвищенню середньої глобальної температури. Contrails - сліди водяної пари від літаків - це найбільший інший фактор авіації.

**Що важливо в контексті польоту, водень забирає багато енергії на одиницю маси**

<i>Кафедра авіоніки</i>				<i>НАУ 19 14 47 000 ПЗ</i>			
<i>Виконав</i>	<i>Петренко Є.А.</i>				<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Землянський В.М</i>						
<i>Консульт.</i>							
<i>Н-контр.</i>	<i>Левківський В.В</i>						

Хороша новина полягає в тому, що комерційна авіація має відмінні результати у підвищенні ефективності. Викиди вуглекислого газу на один пасажирський рейс впали більш ніж на 50% з 1990 року завдяки вдосконаленим двигунам та експлуатації. Погана новина полягає в тому, що ці досягнення були переповнені зростанням обсягів повітряного руху. За останні п'ять років цей показник зріс щонайменше на п'яту, і, за прогнозами, до 2050 року він досягне 10 мільярдів пасажирів на рік .

На перший погляд, водень виглядає хорошим рішенням проблеми польоту без руйнування клімату. Незалежно від того, чи використовується водень для живлення паливного елемента для виробництва електроенергії, або безпосередньо згоряє для рушійної сили, єдиним відходом є чиста вода. Що важливо в контексті польоту, водень забирає багато енергії на одиницю маси - утричі більше, ніж у звичайного реактивного палива , і в сто разів більше, ніж у літій-іонних акумуляторів .

Уряди та компанії інвестують у цей потенціал. Політ на водневому паливі ZeroAvia 2020, відомий як HyFlyer I, був підтриманий урядом Великобританії, чия рада Jet Zero обіцяє "лазерний фокус на британських виробничих потужностях для стійкого авіаційного палива та прискорення проектування, виробництва та комерційної експлуатації нульових емісійні літаки ".

Уряд Великобританії спільно з приватними інвесторами та комерційними партнерами підтримує ZeroAvia у розробці літака з воднево-електричним (паливно-клітинним) силовим агрегатом, здатним перевезти до 20 пасажирів приблизно на 350 морських миль (648 км). Засновник та виконавчий директор ZeroAvia Валь Міфтахов каже, що компанія очікує пропонувати комерційні польоти з використанням такого літака вже в 2023 році, і що до 2026 року вона зможе здійснити польоти на відстані 500 морських миль (926 км) на літаках з до 80 місць. На 2030 рік у Міфтахова є ще більші плани: "У нас будуть однопрохідні реактивні літаки, категорія на 100 місць", - говорить він.

Амбіція є і в материковій Європі. Водень "є одним із найперспективніших технологічних векторів, що дозволяє мобільності продовжувати задовольняти основні людські потреби в мобільності в кращій гармонії з навколишнім середовищем", говорить Грація Вітальдіні, головний технологічний директор Airbus, найбільшого у світі виробника літаків. У вересні 2020 року Airbus оголосив, що силові системи, що працюють на водні, будуть в основі нового покоління комерційних літаків з нульовим рівнем викидів. Проект, названий ZeroE, є флагманом багатомільярдного пакету стимулів Європейського Союзу, спрямованого на екологізацію економіки блоку.

Airbus представив три концептуальні літаки, які, на його думку, можуть бути готові до розгортання до 2035 року. Перший - це турбогвинтовий (гвинтовий) літак, здатний перевозити близько 100 пасажирів приблизно на 1000 морських миль (1850 км). Другий, турбовентилятор (реактивний), міг перевезти 200 пасажирів удвічі більше. Обидва вони схожі на вже існуючі літаки, але третя концепція ZeroE - це футуристично виглядаючий змішаний дизайн крил, який сьогодні різко відходить від комерційних моделей. Airbus заявляє, що ця третя конструкція може перевезти більше пасажирів на більші відстані, ніж інші два, але на цьому етапі не повідомляє більше деталей. Всі три конструкції розглядаються як водневі гібриди.

Робота в ZeroAvia та Airbus викликала великий інтерес, але не всі в авіаційній галузі впевнені, що водень буде відігравати важливу роль у переході до польоту з низьким або нульовим рівнем вуглецю.

1.2. Авіаційний сектор викидає понад 900 мільйонів тонн вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) на рік. Припускаючи зростання промисловості від 3 до 4 відсотків на рік (п.а.) та ефективність покращення на 2 відсотки в рік, викиди збільшаться більш ніж удвічі до 2050 року. У той же проміжок часу повітря група транспортних дій (ATAG) взяла на себе 50 відсотків CO<sub>2</sub> скорочення викидів (порівняно з 2005 р.) та Європейський Союз (ЄС) визначив Зеленою угодою мету стати вуглецево нейтральною. Крім CO<sub>2</sub>, удар літака клімат через викиди оксидів азоту, сажі та водяної пари. Отже, «повний»

внесок у глобальне потепління значно вищий, ніж просто CO<sub>2</sub> лише викиди. У цьому звіті оцінюється потенціал рушія водню (H<sub>2</sub>) зменшити вплив авіації на клімат.

Для зменшення впливу на клімат, промисловості доведеться запровадити подальші важелі, такі як кардинально нові технології, що значно збільшує стійке авіаційне паливо (ВПС) як синтетичне паливо (синтетичне паливо) тимчасово покладаються на компенсації у великих кількостях або покладаються на їх комбінацію. H<sub>2</sub> рушій є однією з таких технологій, і цей звіт оцінює його потенціал в авіації. Розроблений за участю провідних компаній та дослідницьких інститутів проектує технологічний розвиток H<sub>2</sub> згоряння та паливо силових установок, що працюють на елементах, оцінює їх технічні та економічні показники доцільність, порівнює їх із синтетичним паливом та враховує наслідки для дизайн літаків, інфраструктура аеропорту та ланцюги постачання палива.

Загальний висновок звіту полягає в тому, що рушій водню має потенціал бути головною частиною майбутнього поєднання технологій руху. Це буде руйнівним нововведенням вимагати значних досліджень і розробок, інвестицій та супровідного регулювання для забезпечення безпечної, економічної H<sub>2</sub> авіація та інфраструктура, що освоюють вплив на клімат. Висновки та фактори, що підтверджують це: H<sub>2</sub> рушій може суттєво зменшити вплив на клімат. Водень усуває CO<sub>2</sub> викиди в польоті та може вироблятися без вуглецю. Враховуючи також не CO<sub>2</sub> та з урахуванням невизначеності цих ефектів<sup>1</sup>, останні оцінки показують, що H<sub>2</sub> згоряння може зменшити вплив клімату в польоті на 50–75 відсотка, а рух паливних елементів на 75–90 відсотків. Це порівняно з приблизно 30 - 60 відсотками для сировини. Повітряні літаки повинні мати кілька технологічних розблокувань: підвищення загальної ефективності легші баки (цільовий показник 12 кВт / кг / гравіметричний індекс 35%) та системи паливних елементів (цільові 2 кВт / кг з охолодженням), рідкий водень (LH<sub>2</sub>) розподіл в літаку турбін, здатних спалювати водень з низьким вмістом NO<sub>x</sub> викидів та розробка ефективних технологій заправки, що забезпечують швидкість потоку, порівнянну з потребою в гасі розвиватися. Експерти галузі прогнозують, що ці важливі досягнення можливі протягом п'яти-десяти років. Припускаючи ці

технічні розробки, H<sub>2</sub> рушійний двигун найкраще підходить для приміських, регіональних, короткомагістральних і середніх літаків. Для приміських та регіональних літаків двигун на паливних елементах стає найбільш енергоефективним, кліматичним та економічним варіантом. Порівняно зі звичайними літаками, експлуатаційні витрати зростають лише на 5-10 доларів США на пасажир, приблизно на 10 відсотків на PAX (пасажир).

Це навіть до витрат на вуглець та враховуючи всю пряму інфраструктуру та витрати на капіталовкладення, але не непрямі витрати на інфраструктуру, такі як потенційні зміни в плануванні аеропорту, які залишаються дуже невизначеними. Вступ в експлуатацію може статися протягом наступних восьми-п'ятнадцяти років. Для літаків малої дальності - гібридний рушійний підхід (H<sub>2</sub> згоряння та паливний елемент) можуть бути найбільш підходящими, збільшуючи витрати на PAX на 20-30 відсотків. Найбільший сегмент, літак середньої дальності, вимагає значно розширених фюзеляжів для LH<sub>2</sub> зберігання і тим самим споживав би приблизно на 25 відсотків більше енергії, ніж звичайні літаки; ці літаки призвели б до витрат збільшення на 30-40 відсотків на PAX. Враховуючи обсяг уникнути впливу клімату, це означає витрати на зменшену тонну CO<sub>2</sub> еквівалент менше 60 доларів США для регіональних та приміських поїздок та від 70 до 220 доларів США для літаки короткої та середньої дальності. Це вигідно порівняно з 210 до 230 доларів США за тонну CO<sub>2</sub> екв. для палива від пряме захоплення повітря для літаків малої та великої дальності.

**Літаки великої дальності вимагають нових конструкцій літаків для водню.** H<sub>2</sub> є технічно здійсненним, але менш придатним для еволюційних конструкцій літаків великої дальності з економічної точки зору. Баки з воднем збільшилися би довжина літака та потреба в енергії, що призводить до 40-50% більших витрат на PAX. Це все ймовірно більш економічне рішення щодо декарбонізації. Нові конструкції літальних апаратів (наприклад, корпус із змішаним крилом) можуть змінюватися це, але може бути щонайменше через 20 років від початку експлуатації.

Техніко-економічний та економічний аналізи показують, що водень може бути головною частиною майбутніх технологій авіації суміш. Потужні літаки розміщуються в сегментах, де вони є найбільш економічно ефективним засобом декарбонізації, до 2050 року вони можуть становити 40 відсотків усіх літаків, причому ця частка ще більше зросте після 2050 року. З використанням палива та / або біопалива, що живить інші 60 відсотків літаків, вплив авіації на клімат впаде на еквівалент приблизно 2,7 гігатон CO<sub>2</sub> екв проти 5,7 гігатон CO<sub>2</sub> екв у базовому сценарії, де лише покращено ефективність. Авіаційний сектор скоротить 1,8 гігатона CO<sub>2</sub> у цьому сценарії дозволяє це для досягнення цілей щодо зменшення вуглецю, встановлених ЄС та АТАГ. Заправна інфраструктура є вирішуваною проблемою в перші роки нарощування, але вимагатиме значного координація. За вищезазначеним сценарієм, до 2040 року глобальний попит авіації на LH<sub>2</sub> склав би 10 мільйонів тонн на рік - 5 відсотків від прогнозованої загальної світової потреби у водні. Таким чином, авіація могла спиратися на місцевий H<sub>2</sub>.

Постачання ланцюги, що обслуговують також інші галузі. Вантажівки для рідкого палива можуть служити більшості аеропортів, що беруть участь, як попит на один аеропорт, ймовірно, все ще буде низьким, і будуть переобладнані лише літаки з малою дальністю. Поводження та безпека нормативні вимоги потребують переоцінки щодо рівня LH<sub>2</sub> використання в авіації, враховуючи кардинально різні властивості проти звичайного палива для реактивних літаків. Паливні компанії, аеропорти, виробники літаків та авіакомпанії також повинні працювати разом забезпечити розвиток інфраструктури та впровадження літаків у тандемі.

Потрібне більш складне, але не неможливе масштабування після 2040 року. До 2050 року авіаційний попит на LH<sub>2</sub> зросте до 40 мільйонів тонн на рік, а H<sub>2</sub> середньої дальності буде введений літак, що вимагає значного розширення ланцюга постачання водню та інфраструктури заправки аеропортів. Це масштабування принесе виклики поряд із включенням пошуку більш масштабованої технології заправки, ніж заправлення вантажівок, встановлення паралельного заправлення інфраструктури в аеропортах та пристосування стоянок для паркування для

розміщення більших літаків. Поки ці зміни є суттєвими, немає фундаментальних технічних обмежень, які заважали б здійсненню, якщо це планується і звертатися вчасно.

Щоб започаткувати шлях, потрібно терміново вжити сміливих кроків до декарбонізації за допомогою водню. Сьогодні галузь повинна змінити траєкторію, як комерціалізацію а сертифікація повітряних суден може зайняти більше 10 років, і істотна заміна флоту ще 10 років. Рушій воднем має значний, поки що недооцінений потенціал зменшення впливу на клімат авіації та сприяти досягненню цілей декарбонізації. Щоб скористатися цим потенціалом, ми повинні розробити та впровадити нові технології. Необхідно негайно прискорити НДДКР, перш ніж ми зможемо перевести авіаційний сектор а галузь у більш ефективне та декарбонізоване майбутнє. Авіаційна промисловість перебуває на роздоріжжі. Зіткнувшись з тиском, щоб вирішити його вплив на клімат зміни, галузь повинна відповісти: вона повинна продовжувати вдосконалювати сучасні технології, але також почати інвестувати в екологічні, потенційно революційні рішення. Серед багатьох стійких авіаційних технологій, що розглядаються - від стійкого авіаційного палива до електричного літального апарату, яким володіє водень з'явився як потенційне авіаційне паливо майбутнього, пропонуючи паливні елементи та варіанти згоряння різні переваги. Яким технологічним шляхом повинні піти аерокосмічні та авіаційні керівники? Тривалий час розробки та сертифікації літаків зумовлює необхідність термінової відповіді до цього питання. Щоб допомогти керівникам пройти цей вибір, ми досліджуємо ключові проблеми і класифікувати різні стійкі рішення для авіації, від рішень "істинного нуля" до гібридних технологій. Потім ми порівнюємо їх не лише з точки зору впливу на навколишнє середовище, а й їх впливу рівень сумісності з сучасними двигунами та конструкціями літаків. Ми визнаємо водень справжнім претендент на накопичення енергії - той, який все частіше використовується не тільки в авіаційному секторі, але в інших галузях теж.

1.3. Натомість водень не існує на Землі у своїй молекулярній формі, а натомість вимагає вироблення енергії і повинна отримуватися з інших джерел, таких



як природні газ, вугілля та відновлювані джерела, що надходять із відновлюваних джерел енергії, таких як сонячне світло, вітру та гідроенергії. Більшість водню сьогодні виробляється за рахунок природного газу (та / або вугілля) реформування на великих НПЗ та шляхом газифікації вугілля, тобто реагування вугілля з кисню та пари під високим тиском та температурою, утворюючи синтез-газ – суміш що складається в основному з окису вуглецю та водню. Інший найбільш відомий звичайним спосіб отримання водню є електроліз води, яка руйнується вода, що входить до її складу, виділяючи водень і кисень. Однак цей спосіб є дорогим і потребує вдосконалення, щоб бути економічно готовим.

Літаки, що працюють на водні, мають репутацію небезпечної справи. Цьому значною мірою сприяла катастрофа в Гінденбурзі. Легкозаймиста тканина мішка для зберігання тоді сильно відрізняється від високоізольованих та структурно надійних ергономічних резервуарів, запропонованих для сучасних застосувань LH<sub>2</sub> (Brewer, 1983). Найновіші поглиблені дослідження виділяють водень як більш безпечну альтернативу звичайним гасовим паливам. У разі катастрофи літака рідкий водень, швидше за все, призведе до більш безпечного результату, ніж до катастрофи літака на гасовому паливі, через жорсткість танків LH<sub>2</sub>, рідша їх розрив, до плавучості газу, який швидко розсіюється, і до меншої спеки та інтенсивності водневого палива. На відміну від гасу, водень не може забруднювати природне середовище, таке як вода або ґрунт. Водень у рідкій формі набагато безпечніший за його газоподібний стан через нижчий тиск у резервуарах для зберігання, що зменшує ймовірність індукованих структурними руйнуваннями. Однак здатність водню як газу просочуватися через лінії зберігання або резервуари на відміну від повітря або інших газів викликає труднощі у виявленні витоків. Водень може навіть закріпити себе у твердих матеріалах, таких як полімери, шляхом проникнення, вимагаючи ретельного розгляду при виборі матеріалів, що містять водень.

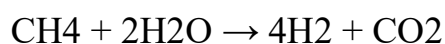
Як і майже всі види палива, водень становить небезпеку займистості. У своєму газоподібному стані водень має більший потенціал змішуватися з повітрям або гасом і утворювати небезпечну детонуючу суміш. Однак тепло від водневого полум'я

становить приблизно десяту частину від полум'я, що працює на вуглеводні. Це не тільки зменшує ступінь можливої шкоди, заподіяної під час великої аварії, але також дозволяє органам влади наблизитися до джерела тепла. У разі витoku водень у розумних кількостях може задушити повітря, поглинаючи киснем голодні організми. Хоча водень все ще не є корозійним або отруйним, його криогенні температури зашкодять людині при дотику. Зріджувач, введений в аеропорт, вимагає ретельних міркувань щодо дизайну. Такі компоненти, як насоси, з'єднання та аксесуари для LH2, вимагають точного проектування через криогенні умови, які вони відчують. Персонал, який контактує з такими системами, потребує спеціальної підготовки, оскільки контакт з будь-якими криогенно охолодженими металами може призвести до травм. Аеропорти повинні застосовувати технології, процедури та політику для безпечного та економічного поводження з LH2. Розгляд повинен охоплювати вплив катастроф або надзвичайних ситуацій. Поточна проектна вимога передбачає, що аварії залишаються на найнижчому можливому рівні та не перебувають у межах постраждалої споруди. Тим не менше, міркування повинні виходити за рамки внутрішніх надзвичайних ситуацій. Такі події можуть спричинити пожежу або летючий сміття до районів, де виробляється та / або утримується LH2. Пом'якшення цього повинно відбуватися у формі належного розташування наземних ресурсів LH2 шляхом забезпечення певних відстаней безпеки або захисту. Подібно до літаків форма танків є важливим аспектом з точки зору дотримання інтересів безпеки. Незважаючи на те, що різниці в експлуатації циліндричного або сферичного резервуару не існує, існує більший пов'язаний ризик у виробництві несправностей сферичних резервуарів через його складність. Циліндричні резервуари також пропонують більш ефективне використання капітальних ресурсів завдяки вертикальній установці.

Подібно до будь-якої структури LH2, паливні баки потребують захисту від зовнішніх елементів. Це може відбуватися у формі часткового занурення під землю, при цьому верхні елементи резервуара піддаються кваліфікованим операторам, проте все ще захищені фортифікацією. Подальше визнання також слід присвятити заходам безпеки, здійснюючи суворий контроль та обмеження доступу до резервів LH2.

Найближчим рішенням стане виробництво водню шляхом реформування природного газу та рідин, поки чистіші процеси з використанням відновлюваної енергії не стануть практичними. На першому етапі цього методу метан (CH<sub>4</sub>) реагує з паром при температурі близько 800° – 900°C (1500 ° – 1600 °F), прискорений нікелевим каталізатором. Цей крок реформування утворює синтез-газ, або синтетичний газ, що складається з водню (зазвичай 75%), вуглецю монооксид (15%) та CO<sub>2</sub> (10%). Потім реакція з додатковою паром (так звана реакція зсуву водного газу) перетворює окис вуглецю в CO<sub>2</sub> і виробляє більше водню, які можна відокремити від синтетичного газу та очистити. CO<sub>2</sub> видаляється адсорбцією процес, як правило, адсорбція з коливанням тиску (PSA). Синтетичний газ також може використовуватися для багатьох цілей, включаючи виробництво електроенергії та переробку нафти. Загалом метанова пара

Процес реформування може бути представлений:



Іншим звичайним методом є отримання водню з вугілля. Первинна шлях отримання водню з вугілля здійснюється шляхом газифікації. Замість спалення вугілля безпосередньо газифікація розщеплює вугілля до основних хімічних компонентів. Вугілля оголюється випаровуватися разом з ретельно контрольованою кількістю повітря або кисню, що призводить до часткового окислення при високих температурах і тиску. Інші тверді види палива, такі як біомаса, також можуть бути газифікованими. В одному з ранніх досліджень безпосередня реакція вуглецю з водою (яка є реакція вода-газ) була показана і відбувається при високих температурах (~ 1300 K)

Рідкий водень є одним з найкращих охолоджуючих рідин, що використовується в техніці, і пропонується використовувати цю властивість для охолодження впускного повітря для літаків з дуже високою швидкістю (див. Попередньо охолоджений реактивний двигун) або навіть для охолодження самої шкіри повітряного судна, особливо для силовий літак.

Хоча ці звичайні виробництва водню передбачають зрілу технологію та ринкових застосувань, висока вартість та забруднення чадним газом обмежує його застосування. Електроліз води не створює забруднення атмосферного повітря (CO, CO<sub>2</sub>). Однак це метод для розділення води на водень та кисень потрібна електрична енергія, і це дорого не інтегрована з відновлюваними джерелами енергії.

Також є кілька інших альтернатив, аніж ці загальновідомі загальноприйняті методи. Наприклад, у 1979 р. Було повідомлено про фотокаталітичну систему, в якій вуглець використовувався як сировина для розкладання води та отримання газоподібного водню при нижчих температури. Це вказує на наявність кисню, що утворюється на поверхні фотокаталізатора сильний окислювальний ефект на вуглець. З бажанням альтернативного швидкого та економічного способу отримання водню, різні джерела світла були використані в пошук стійкого механізму виробництва водню з незначним впливом на навколишнє середовище.

Порошкові фотокаталізатори (такі як TiO<sub>2</sub>, Sr<sub>3</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> та BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>) використовувались із сонячними батареями та джерела ультрафіолетового світла для отримання водню розкладанням води. У цьому процесі енергія фотонів перетворюється на хімічну енергію, що супроводжується позитивною зміною. Було показано, що вуглець сприяє фотокаталітичному розкладанню води на TiO<sub>2</sub> та платизованому TiO<sub>2</sub> за допомогою інтенсивної ртутної лампи, пригнічуючи зворотне реакції, що призводять до води.

Досліджено вироблення водню з використанням джерел світла як джерела енергії вже давно. Як приклад, наноалмази диспергуються у воді і піддаються імпульсному встановленню, що лазерне опромінення утворює водень та окис вуглецю. Графітизація наноалмазів лазером до “цибулеподібних” графітових шарів та включення різних металів (наприклад, Au, Pt, Pd, Ag та Cu), як виявилось, є ефективний механізм утворення водню. Кілька інших прийомів водню генерація з використанням наносекундних лазерних імпульсів була запропонована, оскільки температура і як повідомлялося, тиск плазми під час наносекундної абляції в рідинах був таким високим як 4000 К та кілька ГПа відповідно. Показано опромінення

зеленим лазером збільшити вироблення водню шляхом індукції додаткового поля для сприяння електропровідності в електроліз води. Нещодавно Акімото було показано, що кількість газу одержують із високоякісного вуглецевого порошку та вугільного порошку Vincho-Tan нелінійно за щільністю енергії лазера. Однак енергія і довжина хвилі залежність кількості та концентрації водню від різних рівнів вугілля детально не аналізували. У цій роботі ми використовуємо наносекундний лазер для отримання водень з вугілля та графіту

1.4. Під час недавніх блокувань пандемії рейси зупинились, а небо очистилося. Це був шанс подумати, як виграє клімат, якщо масова авіація стане зеленішою.

Спільне дослідження спільних підприємств показує, що технологія водню має значний потенціал для вирішення проблеми, якщо впроваджувати активну та масштабну програму досліджень та розробок введено в експлуатацію в майбутньому періоді. У дослідженні вже існує сильний інтерес у галузі та політиці, якого вже представляють на семінарах.

Згідно з дослідженням, літаки, що працюють на водні з малою дальністю, можуть вступити в експлуатацію до 2030-2035 рр., А рейси коштуватимуть лише на 18 євро (20 доларів США) більше на пасажирів на рейс.

Діючи зараз, наступне покоління радикально більш ефективних і водневих літаків може бути готовим до введення в 2030-х роках. Ці літаки можуть мати на 70 відсотків нижчий вплив глобального потепління і працювати при нульових викидах CO<sub>2</sub> (припускаючи, що потреба у водню може бути повністю задоволена відновлюваними джерелами). До 2050 року світовий флот міг би складати до 40 відсотків літаків, що працюють на водні.

Це можливість, яку нам потрібно використати. Авіація зазнає інтенсивного тиску на декарбонізацію. Європейський зелений курс закликає до кліматичної нейтральності у всіх секторах через 30 років.

В даний час авіаційний сектор викидає понад 900 мільйонів метричних тонн CO<sub>2</sub> в рік на рік. Зі зростанням галузі приблизно на 3-4 відсотки на рік та

підвищенням ефективності на 1,5 відсотка до 2 відсотків на рік викиди збільшаться більш ніж удвічі до 2050 року. Збільшення викидів твердих частинок, оксидів азоту (NOx) та водяної пари сприятиме зміні клімату .

Однак розробка проривної авіаційної технології в поєднанні з потенціалом водню як палива або енергії може суттєво зменшити вплив авіації на клімат.

Рідкі водневі літаки, що використовують теплову енергію, наприклад, згоряння в газових турбінах, не мали б CO<sub>2</sub> і могли б істотно скоротити NOx. Водневі паливні елементи для коротших польотів підуть далі, виробляючи лише воду та енергію.

Хоча кількість водяної пари, що утворюється при використанні водню як палива, буде значно вищим, ніж у випадку газового палива, попередні моделі показують, що механізм конденсації у краплях води різний. Є вказівки на те, що вони можуть мати менший зігріваючий ефект, ніж пара та краплі від спалювання гасу. Однак, паралельно з розвитком технологій, будуть потрібні додаткові дослідження впливу атмосфери.

Чи могли б ми мати зручність та економічні вигоди від авіаперевезень разом із чистішим небом? Коротка відповідь - так, при правильних інвестиціях для стійкої авіації на водень.

### **Дострокові перемоги в полі зору**

Щоб авіація мала якнайбільший вигаш у впливі на клімат до 2050 року, швидкий розвиток технологій та дострокове прийняття нових концепцій та архітектури літаків в діючому флоті є обов'язковими.

Ми розглядаємо потенціал водню в літаках різного розміру - від невеликих приміських літаків до літаків великої дальності на 300 пасажирів. Кожен сегмент оцінювався на його вплив на клімат, доцільність проектування відповідних літальних апаратів та інфраструктури та наслідки витрат.

Рейси довжиною до 3000 кілометрів становлять 50 відсотків усіх авіаційних викидів CO<sub>2</sub>. Вони охоплюють дві наші категорії: польоти короткої дальності до 2000 кілометрів з пасажирами до 165; і польоти середньої дальності до 7000 кілометрів з до 250 пасажирами.

Інші види палива частіше використовуються для більших літаків. Однак виглядає доцільним, що до 2050 року всі нові літаки короткої дальності, а також до 50 відсотків нових літаків середньої дальності можуть мати гідроген.

Концептуальний демонстратор для літаків малої дальності може бути готовий до 2028 року, а подібна перша демонстрація для літаків середньої дальності - до 2035 року. Більш революційна модель водню для далеких польотів може з'явитися з лабораторій за кілька десятиліть.

### **Доступна альтернатива**

Поряд із кліматичними та технічними проблемами у дослідженні розглядалися питання витрат, оскільки економіка може сприяти або порушити впровадження нових технологій.

Ми порівнювали водень із синтетичним паливом (синтетичним паливом), а не з викопним газом на масляній основі. Останні потрібно буде поступово припинити, якщо галузь бажає досягти нульової цілі чистого вуглецю. Synfuel, яке виготовляється з CO<sub>2</sub> та водню, може використовуватися в існуючих літаках і не виробляє чистого викиду CO<sub>2</sub>, якщо виготовляється з використанням CO<sub>2</sub>, захопленого з повітря.

Однак це лише часткове рішення. Найбільш доступний CO<sub>2</sub> - з промислових процесів, що зменшує ефект зменшення CO<sub>2</sub> вдвічі. Крім того, синфуель сам по собі також забезпечує незначне або зовсім не зменшує оксиди азоту, водяну пару та протипари. Тим часом технологія отримання водню з води та відновлюваних джерел енергії вже є добре відпрацьованою. І оскільки для отримання синтетичного палива доводиться виробляти водень, синтетична альтернатива займає більше часу і дорожча, ніж водень.

Це означає, що, хоча водень потребуватиме значних змін в аеропортах та конструкції літаків, загальні витрати все одно можуть бути нижчими, ніж синтез-паливо на всіх, крім найдовших рейсів. Водневі рейси можуть бути на 10 відсотків дешевшими для приміських та регіональних рейсів (до 1000 кілометрів), на 5 відсотків дешевше для польотів короткої дальності та можуть коштувати за ту саму вартість для рейсів середньої дальності.

Коли розглядаються прогнози, пов'язані з ймовірним рівнем майбутніх витрат на компенсацію вуглецю, водень буде ще більш конкурентоспроможним.

### **Зелене світло промисловості**

Наше дослідження базувалося на промислових та громадських дослідженнях та академічних дослідженнях наших організацій-членів, координованих консультантами McKinsey & Company. Ми розраховували на цінний вклад 24 дослідницьких установ та провідних компаній у галузі виробництва літаків, аеропортів, виробництва та розподілу палива та технології водню.

Результатом стала дорожня карта досліджень та інновацій (R&I), яка, на думку наших наукових та галузевих партнерів, є реалістичною.

Ми очікуємо, що рання робота з реконструкції літаків стосуватиметься системи розподілу водню, а також більш ефективних резервуарів з рідким воднем, систем паливних елементів та водневих турбін.

Що стосується інфраструктури, ми визначили можливості для безпечної та економічно ефективної експлуатації водневих літаків поряд із газовими або синтетичними паливами.

Одним із складних аспектів є заправка. У порядку денному НДДКР також буде розглянуто це, щоб зробити роботу літаків, що працюють на водню, конкурентоспроможною у світовій системі повітряного транспорту.

В цілому, і, на закінчення, водень як паливо або енергетичне джерело для авіації має значний потенціал, але необхідно забезпечити наступне:



- Авіаційна дорожня карта для керівництва переходом. Це повинно визначити чіткі амбіції, узгодити стандарти, скоординувати розбудову інфраструктури, подолати провали ринку та заохотити перших людей
- Значне збільшення та довгострокова діяльність та фінансування НДДКР. Це повинно призвести до правової та фінансової впевненості у необхідних дослідницьких зусиллях та розвитку технологій.
- Довгострокова політична база, що визначає охорону залізниці для цього сектору, включаючи те, як буде вимірюватися вплив на клімат та як буде реалізована дорожня карта.

Воднева енергія для авіації може бути здійсненою, доступною за ціною та може суттєво зменшити вплив польоту на клімат, але лише за умови, що зараз почнеться правильна підтримка НДДКР та авіаційного сектору.

«Чисте небо», яка є частиною програми ЄС «Горизонт 2020», розробляє інноваційні технології для більш аеродинамічних крил, легших та ефективніших двигунів, розумніших систем, нових конфігурацій літальних апаратів та більш стійкого життєвого циклу літаків. Метою програми є зменшення викидів газу CO<sub>2</sub> та рівня шуму, що створюється літаками. Об'єднуючи понад 900 партнерів з галузі, МСП, дослідницьких центрів та наукових кіл для досягнення найкращих інноваційних результатів, «Чисте небо» зміцнює європейську співпрацю з аеронавтики, глобальне керівництво та конкурентоспроможність.

Водень в авіації пропонує безліч можливостей для трансформації нашого авіаційного сектору. Від виробництва, до розподілу, до нових конструкцій літальних апаратів та широкомасштабного використання, це забезпечує численні можливості для європейських компаній бути в авангарді нашої промислової революції в найближчі роки.

Дослідження та інновації є життєво важливими для реалізації всього потенціалу водневих технологій для декарбонізації авіації. Майбутня рамкова програма ЄС Horizon Europe з досліджень та інновацій - це прекрасна можливість просунути цей порядок денний, працюючи у партнерстві з промисловістю та

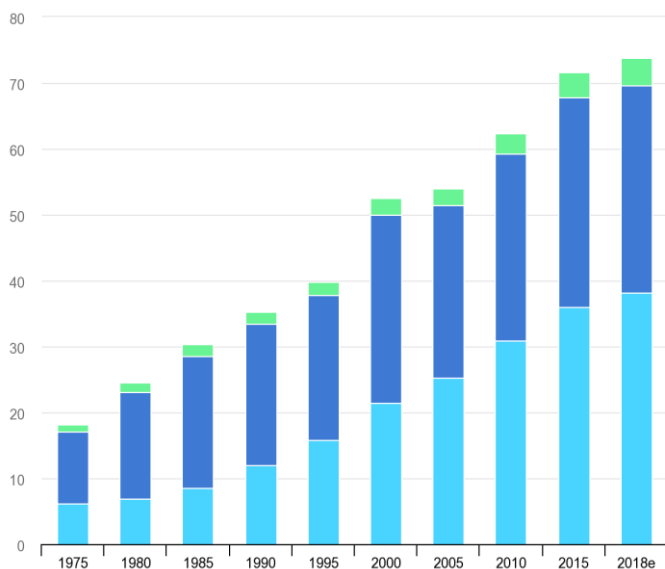
науковою спільнотою. Чудова співпраця між існуючими Спільними підприємствами, присвяченими водневим паливним клітинам та екологічній авіації, ілюструє необхідність тісної взаємодії між двома секторами, коли ми спільно працюємо над амбіційними цілями відновлення після COVID та Європейською зеленою угодою.

Водень сьогодні користується безпрецедентним імпульсом. Світ не повинен втратити цей унікальний шанс зробити водень важливою частиною нашого чистого та безпечного енергетичного майбутнього.

Постачання водню промисловим споживачам зараз є основним бізнесом у всьому світі. Попит на водень, який з 1975 року зріс більш ніж утричі, продовжує зростати - майже повністю постачається з викопного палива, при цьому 6% світового природного газу та 2% світового вугілля спрямовуються на виробництво водню.

Як наслідок, виробництво водню відповідає за викиди CO<sub>2</sub> близько 830 мільйонів тонн вуглекислого газу на рік, що еквівалентно викидам CO<sub>2</sub> у Сполученому Королівстві та Індонезії разом.

### Світовий попит на чистий водень, 1975-2018



Переробка

Аміак

Інший

Зростає кількість країн із політикою, яка безпосередньо підтримує інвестиції у водневі технології, разом із кількістю секторів, на які вони націлені.

Сьогодні існує близько 50 цілей, мандатів та політичних стимулів, які безпосередньо підтримують водень, причому більшість зосереджена на транспорті.

За останні кілька років глобальні витрати на дослідження, розробку та демонстрацію водневої енергії національними урядами зросли, хоча вони залишаються нижчими за пік у 2008 році.

### **Виробництво водню**

Водень можна видобувати з викопного палива та біомаси, з води або з їх суміші. В даний час природний газ є основним джерелом виробництва водню, на який припадає близько трьох чвертей щорічного глобального виробленого водню близько 70 мільйонів тонн. На це припадає близько 6% світового споживання природного газу. За газом слідує вугілля, завдяки його домінуючій ролі в Китаї, і невелика частка виробляється з використання нафти та електроенергії.

На виробничі витрати водню з природного газу впливає цілий ряд технічних та економічних факторів, причому ціни на газ та капітальні витрати є двома найбільш важливими.

Витрати на паливо - це найбільша складова витрат, на яку припадає від 45% до 75% виробничих витрат. Низькі ціни на газ на Близькому Сході, в Росії та Північній Америці породжують одні з найнижчих витрат на виробництво водню. Імпортери газу, такі як Японія, Корея, Китай та Індія, повинні боротися з вищими цінами на імпорт газу, а це обумовлює більші витрати на виробництво водню.

Хоча сьогодні менше 0,1% світового виробленого водню відбувається за рахунок електролізу води, зменшуючись витрати на відновлювану електроенергію, зокрема на сонячну фотоелектричну базу та вітер, зростає інтерес до електролітичного водню.

Настав час скористатися потенціалом водню, щоб зіграти ключову роль у чистому, безпечному та доступному енергетичному майбутньому.

Водень може допомогти вирішити різні критичні енергетичні проблеми. Він пропонує способи декарбонізації цілого ряду секторів, включаючи перевезення на великі відстані, хімікати, чорну металургію, де важко істотно зменшити викиди. Це також може сприяти покращенню якості повітря та посиленню енергетичної безпеки. Незважаючи на дуже амбітні міжнародні кліматичні цілі, глобальні викиди CO<sub>2</sub>, пов'язані з енергетикою, досягли найвищого рівня у 2018 році. Забруднення зовнішнього повітря також залишається актуальною проблемою: близько 3 мільйонів людей передчасно помирають щороку.

Гідроген універсальний. Вже сьогодні доступні технології дозволяють водню виробляти, зберігати, переміщувати та використовувати енергію різними способами. Найрізноманітніші види палива здатні виробляти водень, включаючи відновлювані джерела енергії, ядерну енергію, природний газ, вугілля та нафту. Його можна транспортувати у вигляді газу трубопроводами або у рідкому вигляді на кораблях, подібно до скрапленого природного газу (СПГ). Він може трансформуватися в електроенергію та метан для живлення будинків та кормової промисловості, а також у паливо для автомобілів, вантажних автомобілів, кораблів та літаків.

1.5. Дозвукові реактивні лайнери, такі як Boeing 737, живляться від турбовентиляторів, які використовують механічну енергію, що отримується від газової турбіни, для прискорення повітря назад за допомогою каналного вентилятора. Сучасні газові турбіни можуть спалювати водень із відносно невеликими модифікаціями. "Ви можете майже просто впустити водень у сучасні двигуни", - говорить Анселл. Сімпсон порівнює процес перетворення з пристосуванням пропан-гриля для роботи з природним газом. Але хоча він не буде виробляти CO<sub>2</sub> або сажі, водень буде утворювати забруднюючі оксиди азоту (завдяки присутності азоту в повітрі) та водяну пару. Парниковий газ, водяна пара на великих висотах залишається в атмосфері довше, ніж на нижчих висотах, де випадає у вигляді дощу.

Паливні елементи з протонообмінною мембраною (ПЕМ), що працюють на водню, не мають викидів, якщо водень надходить з джерел, що не містять вуглецю, і їх відпрацьована вода може конденсуватися перед викидом. Однак ПЕМ забезпечують лише половину потужності 3,7 кВт / кг на одиницю ваги сучасних газових турбін, що спалюють звичайне паливо, не враховуючи ваги палива або бака. Тим не менш, це на порядок поліпшення порівняно з 0,3 кВт / кг 15 років тому, і, ймовірно, тривалий прогрес.

Сучасні паливні елементи PEM повинні конкурувати з поршневіми авіаційними двигунами в питанні літаків від чотирьох до шести пасажирів. Але їх співвідношення енергії та ваги набагато нижче, ніж у турбогвинтових установок та турбін.

Вентилятор турбовентилятора забезпечує близько 80% загальної тяги двигуна, а решта подається згорянням. Сподіваємось, що системи паливних елементів можуть бути розроблені, щоб забезпечити всю потужність турбовентилятора електричним струмом. Як варіант, паливні елементи можуть бути доповнені акумулятором під час зльоту та підйому.

"Ми, мабуть, ніколи не будемо конкурувати з питомою потужністю газової турбіни", - каже Дейв Тью, керівник програми для систем електричного польоту Департаменту енергетичних агентств перспективних дослідницьких проєктів - енергетики (ARPA-E). Але надія полягає в тому, що ефективність використання паливних елементів та електроприводних систем може бути настільки поліпшена, щоб відповідати або перевищувати співвідношення енергії до ваги турбіни та палива разом узятих.

Airbus розробив три концепції авіалайнерів, що працюють на водню, місткістю до 200 пасажирів та дальністю 2000 морських миль (3700 км) або більше. Пропонується, щоб кожен з них працював на гібридній системі турбін згоряння та двигунів з приводом від паливних елементів. У турбоелектричній конфігурації газова турбіна, що працює на водні, приводить в дію електричний генератор, а вентилятор приводиться в дію від електродвигуна.

"Ми думаємо, що на відстані від 1000 до 2000 миль будуть потрібні турбіни, але ми побачимо, що, проходячи заточку олівця", - говорить Сімпсон. «Ми вже бачили, як деякі країни Європи заявляють, що повітряні судна в їхніх кордонах повинні мати нульові викиди [вуглецю]. Чи буде [цих вимог] достатньо для запуску більшого літака, про який ми говоримо, ще залишається цікавим для наших клієнтів.

1.6 Водень є носієм енергії і може бути отриманий із самих різних джерел. Його ринок добре налагоджений, на сьогодні глобальний попит становить близько 8–10 екзаджулей (ЕДж), більшість з яких споживається у хімічному секторі. В даний час приблизно 95% світового виробництва водню походить з викопного палива.

Водень з відновлюваних джерел може вироблятися різними шляхами, найбільш відомим є використання відновлюваної електроенергії для розщеплення води на водень та кисень в електролізері. Звіт IRENA, " Водень з відновлюваної енергетики: перспективи технологій для енергетичного переходу" , дає огляд електролізерних технологій та висвітлює технічний потенціал для спрямування великої кількості відновлюваної електроенергії до секторів, декарбонізація в іншому випадку є складною - наприклад, промисловість, будівлі та транспорт, а також у нішевих додатках, таких як віддалені місця. Роблячи це, водень з відновлюваних джерел енергії може безпосередньо витіснити водень, що виробляється з викопного палива, одночасно замінюючи викопне паливо як вихідну сировину в декількох процесах. Крім того, водень - це перспектива відновлюваної енергетики - опублікована в 2019 році на другому засіданні міністрів з водневої енергетики в Японії - розширює попередній звіт, надаючи розуміння кроків, необхідних для розробки водню з відновлюваних джерел, а також відповідні прогнози виробничих витрат.

Робота IRENA щодо водню з відновлюваних джерел енергії зосереджена на оцінці її ролі в енергетичному переході як можливості для інтеграції більшої частки відновлюваної енергії в енергетичний сектор та кінцеві види використання, такі як транспорт та виробництво. У цьому контексті IRENA FlexTool використовується для

оцінки впливу виробництва водню на енергосистеми та його потенціал для покращення їх гнучкості.

Під час десятої сесії Асамблеї IRENA у січні 2020 року Агентство організувало круглий стіл на рівні міністрів з питань зеленого водню. На заході країни-члени та зацікавлені сторони приватного сектору обговорили потенціал водню з відновлюваних джерел енергії для декарбонізації глобальної енергетичної системи та її значення у різних національних енергетичних контекстах. Учасники поділилися думками про те, як вони уявляли свою роль у розвитку глобального ланцюга постачання водню. Серед учасників були представники високого рівня з Австрії, Німеччини, Індії, Італії, Японії, Марокко, Саудівської Аравії, Об'єднаних Арабських Еміратів та США, а також Європейської комісії, Міжнародного партнерства з питань водню та паливних клітин Міжнародне енергетичне агентство та Глобальний морський форум.

Водень з відновлюваних джерел енергії може стати ключовим рушієм енергетичного переходу, вирішуючи різні найважливіші енергетичні проблеми.

Паливний елемент поєднує водень і кисень, виробляючи електроенергію, тепло і воду. Паливні елементи часто порівнюють з акумуляторами. Обидва вони перетворюють енергію, вироблену в результаті хімічної реакції, у корисну електричну енергію. Однак паливний елемент буде виробляти електроенергію до тих пір, поки подається паливо (водень), ніколи не втрачаючи заряду.

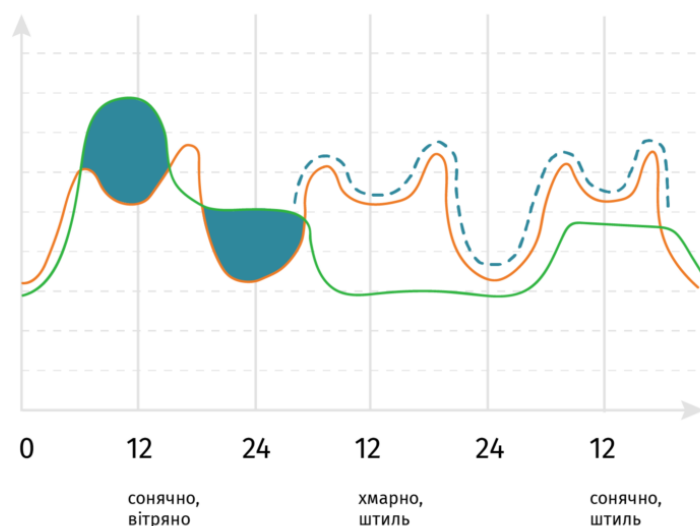
Основна характеристика, що робить водень привабливою альтернативою традиційному паливу, – це його здатність горіти (точніше – окислюватися з виділенням енергії) без утворення CO<sub>2</sub>. Теоретично, ним можна замінити усе інше паливо, яке людство сьогодні спалює для отримання енергії. Наявні технології дозволяють виробляти водень без викидів CO<sub>2</sub>, використовуючи лише воду й електрику. Друга важлива характеристика – у формі водню енергію можна зберігати довше, ніж в акумуляторах. За потреби, ця енергія може бути знову перетворена в електрику, або ж спалена у формі газу, замість викопного палива. Споживання електрики залежить від потреб споживачів, які змінюються протягом доби та року.

Генерація електрики від сонячних та вітрових електростанцій (зараз це основні потужності ВДЕ) залежить від мінливої погоди, сонце та вітер не можна вмикати чи вимикати. Для безаварійної роботи електричних мереж генерація та споживання у будь-який момент часу мають збігатися. Тому зі зростанням частки ВДЕ, країни все більше зусиль витрачають для балансування електромереж. Для цього застосовують різні інструменти: нижчі ціни вночі; резервні електростанції, які вмикаються у період найбільшого споживання; та інші. Гідроаккумуляційні електростанції (ГАЕС) забезпечують збереження 95 % від усієї електрики, що акумулюється для балансування. У періоди надмірної генерації станції закачують воду у водосховище з нижньої течії річки, а коли виникає потреба – спускають, генеруючи електрику. Зазвичай, при цьому страждає екосистема річки. Крім того, ГАЕС розміщують на річках зі значною течією, яких небагато і які уже дуже зарегульовані. Інший спосіб зберігання – літій-іонні батареї. Відомий приклад – станція на 100 МВт, яку Ілон Маск побудував в Австралії за 100 днів. Виробляючи водень у період надлишку потужностей і конвертуючи водень в електроенергію в моменти “провалу”, водень допомагає пристосувати непрогнозовану генерацію електрики від ВДЕ до можливостей мереж та потреб споживачів (див. рис. нижче)

### Генерація / споживання

- генерація водню, коли ВДЕ більше, ніж попит
- попит на електроенергію
- генерація від ВДЕ, сонячні і вітрові станції
- скоригована завдяки водню генерація від ВДЕ

Час / умови



*Типові графіки генерації та споживання електрики протягом доби, та очікуваний вплив водню на них.*



У промисловості водень використовують із середини ХХ століття. Зараз більшість водню отримують із газу. При такому виробництві на 1 кг водню утворюється 9,3 кг CO<sub>2</sub>. Також водень можна отримувати з газифікованого вугілля, але в процесі виходить більше викидів CO<sub>2</sub>.

1.7. Гідроген дорожчий гасу на кВт-год основа: без урахування витрат на зберігання, середнє виробництво витрати складають 0,14 дол. США / кВт-год для "зеленого" водню і 0,05 USD / кВт-год для "сірого" водню. Останній нарівні з гас, але як "зелений" водень був би необхідний для "справжнього нуля" або "нульового вуглецю" стійкої авіації, ціна цих методів виробництва повинна падати, щоб конкурувати за вартістю. В основі загальних виробничих витрат лежить "від мережі до крила" ефективність. За виробництво водню часто критикують вимагає занадто багато кроків перетворення енергії, кожен з яких зменшити загальну ефективність виробництва (і збільшити вартість). Наприклад, перетворення електрики у водень може здатися зайвим кроком, щоб просто перетворити його назад в електрику в паливному елементі. Навпаки, працевлаштування батарея для живлення літака здавалася б простішою і більш ефективний. Однак, якщо покращити акумулятор плато в точці, недостатній для польоту на середні та далекі відстані, водень може залишатися єдиним "нульовим вуглецем" або "істинним нульовий" варіант. Крім того, питання виробництва ефективність швидко вирішує питання лише вартості: якщо спалювання водню може коштувати дешево, чи має значення, як багато кроків? Знову ж таки, рішення можуть запропонувати інші сектори. Як попит на водень з інших транспортних секторів збільшується, а пропозиція зростає відповідно до відновлюваної енергії потужності, витрати, ймовірно, впадуть. Наприклад, проекти є в стадії розробки в Австралії, Саудівській Аравії та на півночі Африка, де "зелений" водень, як очікується, буде коштувати так само мало 0,07 дол. США / кВт-год у майбутньому. Удосконалення технологій в електролізаторах і способи стиснення водню є також, ймовірно, сприятиме подальшому зменшенню витрат, як підвищення ефективності таких процесів зменшить споживання енергії на тонну виробленого водню.

Важливіше, ніж зменшення вартості водень може бути зростаючою вартістю вуглецю. Якщо посилені санкції щодо викидів проти авіації, такі як ETS та CORSIA, експлуатаційні витрати на спалювання реактивне паливо підніметься. Отже, авіаційна промисловість повинна будувати обережні, щоб відстежувати цінові тенденції як на водень і гас, як інверсія в диференціалі витрат між двома видами палива покращило б ділову ситуацію для інвестування у водень.

Хоча більшу частину існуючої газової мережі можна використовувати повторно зі 100% воднем, усунення природного газу з такої великої території, як Великобританія, потребує величезних інвестицій. Перехід від природного газу до низьковуглецевого опалення є більш дорогим, якщо витрати вуглецю на природний газ не відображаються в його ціні.

Потужність електростанції, яка зараз не використовується вночі, може бути використана для отримання зеленого водню, але цього буде недостатньо; тому бірюзовий водень, що не забруднює піроліз метану, або блакитний водень із захопленням та зберіганням вуглецю необхідний, можливо, після автотермічного риформінгу метану, а не парового метану.

Станом на 2020 рік зелений водень коштує від 2,50-6,80 доларів за кілограм, а бірюзовий водень - 1,40-2,40 доларів за кг або синій водень - 1,40-2,40 доларів за кг у порівнянні з високовуглецевим сірим воднем - 1-1,80 долара за кг. Розгортання водню може забезпечити економічно вигідний варіант витіснення забруднюючих вуглець викопних видів палива в тих випадках, коли скорочення викидів в іншому випадку було б непрактичним та / або дорогим. [136] Сюди можуть входити тепло для будівель та промисловості, переробка електростанцій, що працюють на природному газі, та паливо для авіації та, що особливо важливо, важких вантажівок.

В Австралії Австралійське агентство з відновлюваних джерел енергії (ARENA) інвестувало 55 мільйонів доларів у 28 водневих проектів, починаючи від досліджень та розробок на ранніх стадіях і закінчуючи випробуваннями та впровадженням на ранніх стадіях. Заявленою метою відомства є отримання водню

шляхом електролізу за ціною 2 долари за кілограм, про що заявив міністр енергетики та викидів Ангус Тейлор у Заяві про технології низьких викидів до 2021 року.

Тренд 2021 року – розвиток водневої інфраструктури на території аеропортів. Так, найбільший оператор водневих станцій Великобританії ITM Power і англійський аеропорт Лідс-Бредфорд (LBA) у лютому підписали угоду про виробництво водню для транспортних засобів аеропорту.



Передбачається, що в Лідс-Бредфорд буде створено водневий транспортний вузол, в якому швидкі зарядні пристрої для електромобілів будуть приводити в дію автомобільний парк летовища. Роботи зі створення енергетичного вузла можуть початися вже в 2022 році.

Ще глобальніша подія сталася у Франції – також в лютому компанії Airbus і Air France-KLM, Groupe ADP (власник аеропортів Шарль де Голль, Орлі і Ле Бурже) і агентство Choose Paris Region створили консорціум, мета якого – перетворення аеропортів французької столиці в водневі транспортні вузли.

1.8. Очікується, що водень відіграватиме ключову роль як енергоносіє у майбутніх енергетичних системах світу. У міру того, як постачання викопного палива стає дедалі меншим, а екологічні проблеми зростають, водень, швидше за все, стає

все більш важливим хімічним носієм енергії і з часом може стати основним хімічним носієм енергії. Коли більшість світових джерел енергії стануть не викопними, водень та електроенергія, як очікується, будуть двома основними енергетичними носіями для надання послуг кінцевого споживання. У такій «водневій економіці» два взаємодоповнюючі носії енергії, водень та електроенергія, використовуються для задоволення більшості потреб споживачів енергії. Перехідна ера заповнить розрив між сьогоднішньою економікою викопного палива та економікою водню, в якому водень, що не отримується з викопних матеріалів, буде використовуватися для продовження життя викопного палива у світі - наприклад, шляхом модернізації важких нафтопродуктів - і інфраструктура, необхідна для підтримки водневої економіки, поступово розвивається.

Більшість розчинів на основі водню, що розробляються, використовують паливні елементи ніж горіння, і ми детально розглядаємо, що саме може запропонувати кожен варіант. Однак перехід до водню як палива для авіації не позбавлений проблем. Ми обговорюємо наслідки для конструкції літаків та двигунів, необхідність ефективних рішень для зберігання водню, потреба у виробництві водню у сталий спосіб, необхідна інфраструктура, та пов'язані з цим витрати. Це проблеми, яких інсайдери галузі не повинні - справді, повинні не - недооцінюють. Але ми бачимо чіткий потенціал для водневих літаків, особливо у вузьких тілах / Літаки середнього класу, які, ймовірно, стануть полем битви між воднем та гібридно-електричні технології. Про майбутнє Гідрогену повідомлятимуться рішення щодо інвестицій у технології, багато з яких мають бути зроблено дуже скоро - це сформує майбутнє галузі. Таким чином, керівники галузі повинні залишатися бути в курсі останніх подій та знати про питання, про які йдеться, щоб сформувати майбутнє галузі.

На сьогоднішній день рідкий водень дорожчий у чотири рази, ніж звичайне реактивне паливо. Протягом найближчих десятиліть очікується зниження ціни, оскільки інфраструктура розширюється та стає більш ефективною. Але за даними британського Королівського товариства та управлінської консалтингової групи

McKinsey , найімовірніше це буде залишатися щонайменше вдвічі дорожчим за викопне паливо протягом наступних кількох десятиліть.

Ці фактори та інші створюють паузу для деяких основних гравців авіації. Шон Ньюсум, директор з питань екологічної стратегії в Boeing Commercial, головний конкурент Airbus, нещодавно сказав Financial Times : "Ми віримо, що знадобиться деякий час, поки всі технології та елементи рушія водню будуть відпрацьовані, перш ніж ми зможемо дістатися до ... комерційне використання ". І ключовий дорадчий орган уряду Великобританії також має сумніви. "Перехід на прямий водень додає десятиліть переходу", - говорить Девід Джоффе з Комітету з питань зміни клімату, дорадчого органу уряду Великобританії.

То які альтернативи? У вересні 2020 року група з авіаційного транспорту, що базується в Женеві, виступає від імені світової авіаційної галузі, опублікувала ряд сценаріїв, які передбачають, що, навіть якщо обсяг повітряного руху збільшиться, це стане можливим для глобальної авіації досягти нульових викидів двоокису вуглецю - але лише приблизно через десять років, ніж до 2050 року. Згідно з цими сценаріями, пряме використання водню буде грати лише незначну роль, але зміною гри стане те, що називають "стійким авіаційним паливом" , або СВС.

Цей загальний термін охоплює цілий ряд продуктів, таких як біопаливо, що призводить до низького чистого викиду вуглекислого газу та інших забруднювачів, пов'язаних із звичайним реактивним паливом. Прихильники ВПС стверджують, що вони мають ряд очевидних переваг перед чистим воднем. Оскільки вони хімічно ідентичні існуючим реактивним паливом, їх, в принципі, можна "впустити" в існуючі системи з незначним або зовсім не переробленим дизайном, без затримки, і без значних допоміжних вкладень, необхідних для конструкцій водневих планерних конструкцій та їх допоміжної інфраструктури. Пол Штейн, керівник відділу технологій у виробництві двигунів Rolls Royce, стверджує, що вони є ключем до більш стійкого майбутнього. "Якщо виробництво САФ можна збільшити - а авіація потребує 500 мільйонів тонн на рік до 2050 року - ми можемо зробити величезний внесок для нашої планети", - говорить він.

Біопаливо є однією альтернативою викопному паливі для авіації, але для вирощування їм потрібні великі масиви землі

САФ можна розділити на дві категорії. Перше - це біопаливо, отримане шляхом хімічної або термічної обробки біомаси, таких як сільськогосподарські залишки та інші відходи. Друга категорія - це електропаливо, або "Е-паливо". Завдяки цим видам палива, які також відомі як "потужність до рідини", водень може врешті-решт відігравати ключову роль в авіації.

Е-паливо отримують шляхом взаємодії водню з вуглекислим газом, утворюючи "синтетичний газ". Потім він перетворюється за допомогою так званого процесу Фішера-Тропша в "електронну сировину" - замітник сирої нафти, який можна переробляти на реактивне паливо та інші види палива. Якщо велика кількість енергії, необхідна на кожному етапі виробництва, надходить із нульових джерел вуглецю, то весь процес може бути нейтральним до вуглецю, при цьому в атмосфері після польоту не буде більше вуглекислого газу, ніж до виготовлення палива.

Використовуючи технологію прямого захоплення повітря, розроблену швейцарською компанією Climeworks для отримання CO<sub>2</sub> та водню, що виробляється з води з відновлюваною енергією, компанія Norsk e-Fuel, що базується в Осло, має на меті відкрити перший у світі промисловий завод Е-палива Негюа, Норвегія, у 2023 році, виробляючи 10 мільйонів літрів палива на рік для норвезького та європейського ринків. Наступним кроком у 2026 році стане завод, здатний виробляти 100 мільйонів літрів на рік. Повнорозмірна установка може забезпечити половину пального для п'яти найкращих маршрутів польотів у Норвегії, зменшивши їх викиди наполовину, говорить Карл Хауптмайер, керуючий директор Norsk e-Fuel.

## **РОЗДІЛ 2. Недоліки і взаємодія лазерного матеріалу з воднем**

2.1. Виникає питання, чи можна виробляти водень у масштабі та за конкурентоспроможною ціною, не маючи при цьому великого вуглецевого сліду

Недоліки починаються з фізики та хімії. Водень має більшу енергетичну енергію, ніж реактивне паливо, але має меншу енергетичну енергію. Така менша щільність енергії обумовлена тим, що це газ із типовим атмосферним тиском та температурою. Газ потрібно стиснути або перетворити в рідину, охолодивши його до надзвичайно низьких температур (-253C), якщо він буде зберігатися в достатній кількості. "Резервуари для стисненого газу або рідини складні та важкі", - говорить Фінлі Ашер, колишній конструктор авіаційних двигунів у Rolls-Royce та засновник Green Sky Thinking, платформи, що досліджує стійку авіацію.

А є й інші виклики. Щільність енергії рідкого водню становить лише приблизно чверть енергії у реактивного палива. Це означає, що для однакової кількості енергії йому потрібен накопичувальний бак у чотири рази більший за розмір. Як наслідок, літакам може бути доведено перевезти менше пасажирів, щоб звільнити місце для резервуарів, або стати значно більшим. Перший варіант, який застосовується до перших двох концептуальних літаків Airbus, означав би зменшення доходу від квитків за інших рівних умов. Другий варіант, втілений у третій концепції Airbus, вимагає більшого планера, який піддається більшому опору. Крім того, для транспортування та зберігання водню в аеропортах потрібно буде створити цілу нову інфраструктуру.

*Кафедра авіоніки*

НАУ 19 14 47 000 ПЗ

<i>Виконав</i>	<i>Петренко Є.А</i>				<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушіє</i>
<i>Керівник</i>	<i>Землянський В.М</i>						
<i>Консульт.</i>					<b>6.051103 «Авіоніка»</b>		
<i>Н-контр.</i>	<i>Левківський В.В</i>						
<i>Зав. каф.</i>	<i>Павлова С.В.</i>						

Крім того, виникає питання, чи можна виробляти водень у масштабі та за конкурентоспроможною ціною, не маючи при цьому великого вуглецевого сліду. Переважна частина водню, що використовується сьогодні в промисловості, створюється з використанням викопного палива метану, що виділяє вуглекислий газ як відхідний продукт. Водень може вироблятися з води за допомогою процесу, що називається електролізом, що рухається за рахунок відновлюваної енергії, але цей процес наразі є дорогим і вимагає великої кількості енергії. В даний час таким чином утворюється лише близько 1% водню.

### **Водень леткий**

Через високий вміст енергії газоподібний водень є легкозаймистою і летючою речовиною, що робить його ризикованим паливом для роботи.

### **Водневу енергію виробляти дорого**

Реформування парометану та електроліз є дорогими процесами, що заважає багатьом країнам взяти участь у масовому виробництві. Зараз проводяться дослідження та випробування, щоб спробувати знайти дешевий та стійкий спосіб отримання достатньої кількості водню, не вносячи більше вуглецю в атмосферу.

### **Водневу енергію важко накопичувати**

Водень - набагато легший газ, ніж бензин, що ускладнює його зберігання та транспортування. Щоб мати можливість зберігати його, нам потрібно стиснути його в рідину і зберігати при низькій температурі. Високий тиск, необхідний для зберігання водню, ускладнює транспортування палива у великих кількостях.

### **Водень може бути небезпечним**

Водень неймовірно легкозаймистий, що робить його небезпечним паливом, якщо з ним поводитись неправильно. Також не пахне воднем, тому для виявлення витоків потрібні датчики.





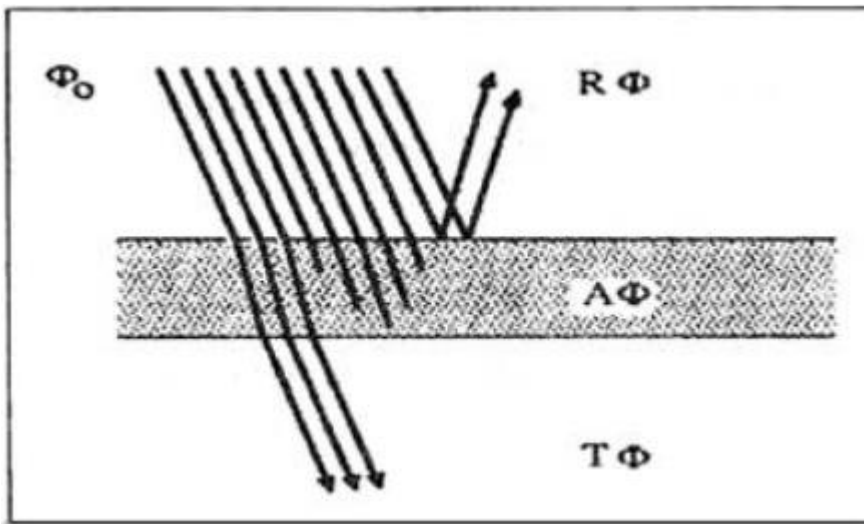
Водневе паливо створює проблеми для конструкторів з точки зору вимог до маси та обсягу, а також щодо управління паливом та зберігання на борту літаків. Високі об'ємні та енергетичні характеристики рідкого водню (LH<sub>2</sub>) вимагають, щоб водневі літаки перевозили більший об'єм палива порівняно із звичайним паливом. Конструкція успішного водневого літака в основному зосереджена на визначенні оптимальної конфігурації резервуара, щоб забезпечити необхідну кількість LH<sub>2</sub>. Серед промисловості було визначено кілька проектних пропозицій. Конфігурації резервуарів можна виділити як не інтегральні, так і цілісні. Нецілісні конфігурації танка є зовнішніми для фюзеляжу літака. Зазвичай вони встановлюються або на планерах, вище або під крилом. Не інтегральні резервуари повинні мати можливість справлятися з аеродинамічними та інерційними навантаженнями, крім навантажень, що містять паливо.

Цілісні резервуари, розташовані всередині фюзеляжу, отже їх форма та розміри взаємозалежні від конструкції фюзеляжу. Цілісні резервуари не витримують аеродинамічних навантажень, а з іншого боку можуть підвищувати структурну цілісність фюзеляжу, збільшуючи стійкість до згинальних та зсувних сил. Цілісні танки являють собою більш реалістичну та здійсненну конструкцію літальних апаратів для широкофюзеляжних або далеких літаків. Проект "Кріоплан" схилився до цілісної конструкції літаків, що працюють на LH<sub>2</sub>, головним чином через криогенні температури, необхідні для утримання LH<sub>2</sub>, і необхідність забезпечити необхідну ємність резервуара для далеких рейсів. Довжина і ширина фюзеляжу збільшаться,

щоб вмістити цілісні резервуари LH2. Усунення крилових танків зменшує пов'язане напруження зсуву та зменшення моменту згинання. Для компенсації необхідно приблизно збільшити структуру крила на 37%, що призведе до загального збільшення ваги на 6% для підтримки та кріплення цілісних танків LH2, але це посилить безпеки, оскільки резервуари додатково захищені підтримуючою та жорсткою структурою фюзеляжу. Проблеми, пов'язані зі збільшенням опору та викидання, також враховуються, оскільки вони впливають на діапазон та експлуатаційні витрати. З цієї причини значна частина проекту Cryoplane включала оцінку різних можливих конфігурацій танків. Також розглядалися танки над фюзеляжем і поперек крила. Хоча ці конфігурації покращили загальний обсяг експлуатації та досягнули ємність резервуара, утримуючі навантаження LH2 суттєво вплинули на структурні ваги. Таким чином, кращим був сферичний або циліндричний дизайн. Сферична конструкція резервуара мінімізує відношення поверхні до об'єму, а отже, і пасивну передачу тепла через стінку резервуара, мінімізуючи швидкість кипіння. З цих причин сферичні або квазісферичні танки часто застосовуються в космічних ракетах-носіях та транспортних засобах. Однак він передбачає більшу фронтальну площу на той самий об'єм порівняно з циліндричною конструкцією резервуара. Циліндричний бак також забезпечує більшу об'ємну ефективність завдяки максимальному використанню простору у фюзеляжі. Однак навантаження під тиском палива надзвичайно неоднорідні в чисто циліндричному резервуарі. Отже, ідеальним компромісом є циліндричний резервуар з підставами, сформований у напівсферичну конструкцію, оскільки така конструкція приймає найкращі характеристики як циліндричної, так і сферичної форми. Для регіонального авіалайнера LH2 можливі декілька конструкцій. Одне розташування включає єдиний бак у задній частині фюзеляжу, що забезпечує найбільші переваги з точки зору показників ваги. Однак ця конструкція часто може призвести до проблем із вагою та рівновагою, що, в свою чергу, може вимагати збільшення ваги та розмірів хвостових площин. У другому розглянутому компонованні баки LH2 можуть розташовуватися як в кормі, так і в передній частині фюзеляжу. Однак це створює проблеми з точки зору доступу екіпажу до і з кабіни пілота, які можуть бути виправлені шляхом впровадження

проходу в рамках цієї конструкції. Нарешті, танки LH2 можуть бути сконфігуровані вздовж верхньої частини фюзеляжу над пасажирами у поєднанні з баком у задній частині фюзеляжу, впливаючи на зберігання багажу. В даний час авіація переживає перехід до більших літаків великої дальності, щоб зменшити затори та підвищити ефективність (Поточний прогноз ринку 2014-2033). Літаки великої дальності, як правило, мають конструкцію з широким корпусом, використовуючи кілька проходів у пасажирській кабіні. Тому можливі конструкції майбутніх водневих літаків далекої дальності можуть надалі використовувати збільшення поперечного перерізу фюзеляжу, включаючи триповерховий літак з танками LH2, розташований у кормі та перед фюзеляжем. Для цієї конструкції паливний бак у передній частині літака містить приблизно 40% загального палива, щоб задовольнити вимоги до ваги та балансу. Крім того, в порівнянні з сучасним еквівалентом на звичайному паливному літаку, такому як Airbus 380 та Boeing 747, показники розміру значно різняться. Наприклад, у випадку з діаметром фюзеляжу триповерховий літак LH2, ймовірно, матиме ширину до 8,5 м порівняно з меншими ширинами планера 7,14 м і 6,1 м, як це видно на A380 та B747-8 відповідно.

2.2. Лазер - це пристрій, який генерує когерентний промінь світла. Аббревіатура LASER стоїть для світла, посиленого стимульованим випромінюванням. Лазери використовуються в різних додатків у повсякденному житті. Вплив лазера на тверді речовини досліджувались у різних областях контексти, включаючи мас-спектрометрію лазерної десорбції, лазерне зварювання та хірургію, та лазерно-індуковане плавлення напівпровідників. Поряд з розробкою лазерів, лазер абляція матеріалів зазвичай використовувалась дослідниками через деякі внутрішні властивості, а саме високої монохроматичності, когерентності та спрямованості. Лазерна абляція вперше був використаний в 1965 році з використанням рубінового лазера. Однак лише в 1980-х роках привернули занадто багато уваги в дослідницьких лабораторіях.



Для того, щоб зрозуміти, як може створюватися лазерна взаємодія вугілля у воді потрібно вивчити водень, властивості лазера та взаємодії лазерного матеріалу. Один з найважливішим фактором імпульсних взаємодій лазер-матеріал є тепловий та ударний ефект на поверхні. Лазери забезпечують можливість точної доставки великої кількості енергії в обмежені ділянки матеріалу для досягнення бажаних умов. Наприклад, лазер може генерувати умови високої температури і високого тиску, необхідні для вугілля газифікація. Змінні, які контролюють взаємодію між лазером та матеріалом, можуть класифікуються на три групи: ті, що стосуються матеріалів, лазерні та інші середовища, в якому відбувається опромінення. Параметри, що регулюють лазерний матеріал взаємодії будуть розглянуті в цьому розділі. Такі параметри лазера, як довжина хвилі, енергія на імпульс, тривалість імпульсу, розмір пучка та швидкість повторення сприяє виробленню тепла та ударних хвиль на цільовому матеріалі. Довжина хвилі лазера визначає енергію фотона, чим коротша довжина хвилі чим вище енергія фотона. Наприклад, ІЧ-фотони можуть генерувати тепло з матеріалом взаємодія, оскільки вони взаємодіють з вібрацією та режимами обертання матеріалу, поки ультрафіолетові (УФ) фотони можуть безпосередньо розривати хімічні зв'язки. Було показано, що Pd наночастинки, виготовлені за допомогою Q-лазерного лазера Nd: YAG (1064 нм), демонструють ідеальне сферичної морфології, тоді як ті, що зумовлені ArF-ексимерним лазером (193 нм), зазнають фрагментарні форми. Ефективність поглинання органічної хімічної сполуки була повідомляється в експериментах із плоскою ціллю, опромінених лазером, з різними

довжинами хвиль лазера (1,06, 0,53 та 0,26 мкм) і було встановлено, що поглинання ефективно на коротших довжинах хвиль. Енергія імпульсу - ще один важливий параметр, який визначає лазерний матеріал взаємодія. Наприклад, більшість матеріалів демонструють лінійну динаміку при низькій щільності енергії.

Однак, коли щільність енергії досягає певної точки, процес стає сильно нелінійний. Показано, що щільність енергії лазера визначає кінцеву кристалічну структуру та вміст азоту при імпульсному лазерному нанесенні NbN. Вибір оптимального лазерного імпульсу енергія та розмір пучка також виявляються важливими для мікроструктури та діелектрика властивості полікристалічних плівок. Тривалість імпульсу важлива, оскільки вона визначає високу пікову інтенсивність потужності результат короткої тривалості імпульсу. Чим коротший імпульс, тим швидше енергія розподіляється, запобігаючи розсіюванню тепла всередині матеріалу. Як результат – лазерні імпульси можуть генерувати високі температури протягом дуже коротких часових діапазонів, дозволяючи матеріалу залишатися при низьких температурах. Витратоміри використовуються також для проведення науково-дослідних робіт, управління виробничим процесом, для контролю роботи енергетичних установок, управління літаками і космічними апаратами, контролю роботи зрошувальних систем в сільському господарстві і в багатьох інших випадках. Без витратомірів неможливо забезпечити нормальний режим роботи важливих технологічних процесів в таких галузях промисловості, як енергетика, металургія, нафтогазова, хімічна, целюлознопаперова, харчова та інші. Без цих приладів не можна також і автоматизувати відповідні процеси і забезпечити при цьому максимальний ефект виробництва. Витратоміри сприяють підвищенню якості виготовлення продукції, ліквідації браку і економії вихідних матеріалів. Річний економічний ефект від впровадження витратомірів в масштабах всієї країни вимірюється мільйонами грн. В теперішній час на борту літального апарату використовуються витратоміри палива в яких в якості первинного перетворювача застосовується крильчатка. Таким є турбінний перетворювач витрат палива. До його складу входить гідравлічна крильчатка, вісь обертання якої рівнобіжна напрямку потоку. Основним недоліком цього перетворювача являється вплив моменту тертя в осях крильчатки на точність

вимірювання витрат. До числа порівняно нових, але таких що швидко розвиваються, методів вимірювання локальних швидкостей потоку і витрати відносяться методи, засновані на застосуванні оптичних квантових генераторів-лазерів (ОКГ). Перевагами цих методів є: безконтактність, висока чутливість, мала інерційність, великий діапазон вимірювань швидкостей і витрат незалежно від фізичних властивостей вимірюваного середовища (як рідин, так і газів), за винятком вимоги її прозорості в діапазоні довжин хвиль, випромінюваних квантовими генераторами.

Найбільш перспективним є використання оптичних методів в експериментальній гідродинаміці, особливо в області турбулентних явищ, вивчення яких традиційними способами (наприклад, за допомогою

термоанемометрів) вже не дає бажаних результатів через недостатню точність приладів і, головне, внесення ними спотворень в досліджувану структуру потоку. Крім того, лазерні витратоміри використовують при вимірюванні витрати агресивних, високо- і низькотемпературних (кріогенних) рідин і газів.

В даний час поширення набули дві конструктивні різновиди оптичних (лазерних) витратомірів, які відрізняються покладеними в їх основу фізичними явищами: витратоміри, засновані на ефекті розсіювання світла рухомими частинками (доплерівські витратоміри), і витратоміри, засновані на ефекті Фізо-Френеля. В оптичному витратомірі, що реалізує перший ефект, випромінювання лазера, розсіяне рухомими в потоці природними або штучно введеними частинками, набуває частотний зсув, пропорційний середній швидкості руху частинок.

Існує ряд методів вимірювання витрати палива. До найбільш поширених, які мають поширення в авіації можна віднести:

- об'ємний;
- гідродинамічний (змінного перепаду тиску);
- метод постійного перепаду тисків;
- відцентровий;

- турбінний;
- тепловий;
- ультразвуковий;
- електромагнітний (індукційний)
- оптичний.

Об'ємний метод заснований на пропусканні контрольованого потоку рідини через трубопровід частинами певного об'єму. В якості датчика об'ємного витратоміра використовуються обертові насоси рідини - дискові, чашкові, лопатеві, гвинтові та ін.

Перевага об'ємного методу полягає в тому, що в'язкість рідини не впливає на роботу датчика, а недоліком є можливість засмічення лінії при заклинюванні датчика. Гідравлічний метод заснований на залежності перепаду тиску, що відбувається на дросельному елементі, встановленому в трубопроводі, від витрати палива. В якості дросельного елемента використовується трубка або діафрагма Вентурі. Метод постійного падіння тиску заснований на збалансуванні ваги рухомої частини витратоміра з гідравлічним тиском, який чиниться на цю систему потоком рідини. Залежно від конструкції рухомої частини побудовані цим методом витратоміри поділяються на ротаметричні, поршневі, дискові. Недолік цього способу перешкоджає його застосуванню на літальних апаратах, спостерігається ефект прискорення на рухомій частині витратоміра. Відцентровий метод заснований на залежності потоку рідини від відцентрової сили, що виникає, коли рідина тече по криволінійній траєкторії. Побудований цим методом витратомір складається з труби, зігнутої на кільці, до якого підключений диференціальний манометр. Турбінний (швидкісний) метод заснований на залежності швидкості обертання ненавантаженого осьового або тангенціального робочого колеса (турбіни), розташованого в трубопроводі, від потоку рідини. Перевагою методу є пропорційна залежність швидкості обертання робочого колеса від потоку рідини. Мірою миттєвого потоку є швидкість обертання, а мірою загального потоку за певний інтервал часу - загальна кількість оборотів, які зробить робоче колесо за цей час. Тепловий метод заснований

на залежності тепла, що втрачається нагрітим тілом, від швидкості потоку рідини, що оточує це тіло. Чутливим елементом витратоміра є провідник, який нагрівається електричним струмом, температура якого залежить від швидкості потоку. Ультразвуковий метод заснований на тому, що швидкість ультразвукових коливань, що поширюються в потоці рідини щодо трубопроводу, дорівнює векторній сумі швидкості ультразвуку відносно середовища та швидкості середовища щодо трубопроводу. Вимірювання швидкості потоку може бути здійснено шляхом вимірювання різниці у часі поширення ультразвукових коливань у потоці та проти нього за допомогою двох п'єзоелектричних елементів, розташованих один за одним у потоці рідини і є випромінювачами та приймачами ультразвуку. Електромагнітний (метод індукції) заснований на індукції електрорушійної сили в електропровідній рідині під час потоку рідини через трубу, перетинану зовнішнім магнітним полем. Найбільш поширеними на літаку були турбінні або іншим чином вимірювачі швидкості.

Витратоміри широко використовуються у всіх галузях промисловості, де потрібно виміряти витрату рідини або газу.

Найпоширенішими галузями промисловості є:

- видобуток корисних копалин та додаткових продуктів (наприклад, попутний нафтовий газ - ПНГ);
- транспортування рідин і газів по магістралі або розподіл трубопроводи;
- дозування рідин або газів у технологічних процесах;
- циркуляція рідин і газів;
- технологічні вимірювання (наприклад, холодоагент у системах охолодження та теплопостачання);
- промислові викиди та переробка.



В даний час основним споживачем витратомірів є нафтова і газова промисловість.

У нафтовій і газовій промисловості витратоміри використовуються для обліку виробництва, транспортування, переміщення продукції на території переробних підприємств і за її межами тощо.

Окрім нафтогазової галузі, споживачами витратомірів можна визначити наступні ключові галузі:

- хімічна промисловість;
- теплові, електричні та комбіновані станції;
- водопідготовка, водопостачання та водовідведення;
- Харчова промисловість;
- фармацевтична промисловість;
- мікроелектронна промисловість;

#### 9. Поршневий рух. Пружинна діафрагма

Від 200 до 350 ° С Можна використовувати із забрудненими рідинами. Рідини та газу.

Лопати. Відхилення демпфера

Від 25 до 120 ° С Рідини та газу.

- целюлозно-паперове виробництво;
- металургія;
- машинобудування;
- Сільське господарство.

Найбільш універсальними з точки зору застосування є масові витратоміри, оскільки вони дозволяють вимірювати витрату практично будь-якої рідини,

включаючи в'язку. Однак через високу вартість їх використовують переважно в нафтовій і газовій промисловості.

Електромагнітні витратоміри є стандартом промислової автоматизації і використовуються в більшості процесів. Однак їх не можна використовувати на найбільшому ринку - ринку нафти.

Ультразвукові витратоміри мають ряд особливостей і застосовуються переважно спільно з газами та невязкими рідинами; вихрові витратоміри - майже виключно з газами.

2.3. Технологія лазерної обробки - це вдосконалене та високоефективне виробництво метод. Застосовується в авіаційній промисловості, оборонній промисловості, автомобілебудуванні промисловість, механічна промисловість та матеріальна промисловість та ін. Завдяки надзвичайно високій густині вихідної потужності лазера (більше  $10^4$  Вт / см<sup>2</sup>), надзвичайно швидка швидкість нагрівання і швидкість самоохолодження ( $10^3$  -  $10^6$  °C / с) на поверхні матеріалу, процес взаємодії лазера і матеріалу розглядається як дуже складний теплофізичний процес за взаємодії між температурою, фазовим перетворенням та напругою-деформацією.

Це стосується лазера, матеріалу, теплофізики, динаміки та багатьох інших наукових поля. Після взаємодії лазерного променя з матеріалом відбувається деформація матеріалу результат термічної деформації та трансформації деформаційного співробітництва. Остаточний стрес матеріального інтер'єру - це накладення теплових напружень та перетворення стреси. Коли напруження перевищують межу пружності матеріалу, матеріал буде виробляють пластичну деформацію. Якщо матеріал тонший, такий як листовий метал, він отримає корисну пластична деформація, яка полягає в лазерному згинанні листового металу. Якщо матеріал є досить товстий, він не призведе до явної пластичної деформації, ця напруга зберігається в матеріалу і розглядається як залишкова напруга. Залишковий напруга матиме великий вплив на властивості використання матеріалу. Ми очікуємо, що залишковий стиск напруги створюється на поверхні матеріалу з метою покращення несучої здатності матеріал.

Затвердіння лазерним перетворенням на матеріалі поверхні та лазерному металевому металі вигин - це два різних сфери застосування при обробці поверхні, що не плавиться, лазером. Хоча експерти провели багато досліджень з теорії та експериментів, належним чином відсутність досліджень термофізичного процесу взаємодії лазера з матеріалом, поведінка та регулярність напруженого напруження під час процесу не були зрозумілі чітко. Технологічні параметри, вибрані методом спроб і помилок, забезпечити не можуть оптимальну якість обробленої поверхні і отримання форми та напрямку деформації очікуваний.

У цій роботі представлений новий метод технології вимірювання в реальному часі дослідити теплофізичний процес взаємодії лазера з матеріалом під час лазерної обробки поверхні, що не плавиться. У напрямку товщини зразка, розподіл температури вимірювали за допомогою термовізійної інфрачервоної системи в реальних-час. Динамічну мікро-деформацію зразка досліджували за допомогою лазера системи підсилювача рефлекторного променя. Результати експерименту виявляють теплофізичний процес взаємодії лазерного матеріалу і закладають основу подальших досліджень на процес обробки лазером. Лазер CO<sub>2</sub> потужністю 1800 Вт використовується в режимі безперервної хвилі, його щільність потужності розподіл - TEM<sub>00</sub>. Довжина хвилі лазерного променя становить 10,6 мкм, довжина фокусу лінзи 254 мм. Лазерний промінь направляється через волоконно-оптичний кабель від контролера до головки лазерного променя. Вимикач увімкнення / вимкнення, вихідна потужність та імпульс тривалість його та рух x - y таблиці контролюються програмою з ЧПУ.

Точність блоку управління з ЧПУ становить 0,005 мм. Зразок затискається на одному кінці як консольний промінь і поставте 21 мм під фокусну точку лінзи (діаметр променя на ЛАЗЕРНО-МАТЕРІАЛЬНА ВЗАЄМОДІЯ 145 поверхня зразка - 2 мм). Зразок опромінюється посередині лазером пучка, тривалість імпульсу триває 0,782 с. Невеликий шматочок оргскла є застряглим на верхній стороні вільного кінця. Лазерний мікрометр опромінює оргскло і відображає на екрані, приклеєному шматочком координатного паперу для посилення деформація зразка. Камера, що

використовується на частоті 24 Гц, фіксує процес рух світлової точки під час взаємодії лазер-матеріал. Телевізор підключено з відео відображається рух світлової точки, записаний камерою. В той же самий час термовізійної інфрачервоної камери, що використовується на частоті зображення 6,25 Гц розподіл температури в реальному часі в напрямку товщини зразка в нагрівається область. Комп'ютер відображає зображення, записані за допомогою інфрачервоного випромінювання камери У процесі взаємодії лазера та матеріалу розподіл температури зображення в напрямку товщини зразка в нагрітій області показано в вказують на зміну розподілу температури протягом процесу взаємодії лазера з матеріалом. Цей процес складається з двох фаз, фаза нагрівання та фаза охолодження. Коли лазер опромінює поверхню зразка, світлова енергія за дуже короткий час перетворюється на теплову, а потім переходить у зразок дуже швидко. Коли лазерний промінь вимикається, зразок дуже охолоджується швидко. Але завдяки тепловіддачі ефект межі можна побачити очевидно: тепло передача енергії на нижню бічну поверхню відображається в зразку.

Наприкінці тривалості імпульсу зображення розподілу температури в напрямку товщини зразка в нагрітій області показані у, вказуючи розподіл максимальних температур, записаних під час процесу взаємодії лазер-матеріал. Очевидно, що оскільки товщина зразка скінченна, теплова енергія, що відводиться на нижню бічну поверхню, відображається у зразку і визначає температуру напрямку товщини зразка в одному положенні досягти максимуму. Це положення максимальної температури залежить від енергії, поглиненої зразком. Під час процесу взаємодії лазера та матеріалу змінюється температура в залежності від часу у напрямку товщини зразка вказує на те, що записана максимальна температура зростає із покращення вихідної потужності лазера, але положення максимальної температури інакший. Для матеріалу St14 положення максимальної температури рухається до нижньої сторони. Це означає, що чим більше енергії поглинається матеріалом, тим більша глибина теплопровідності всередині матеріалу. В той самий час, чим більше відбивається теплова енергія, яка проводить до нижньої бічної поверхні зразка, ближче до нижньої сторони положення максимальної температури записаний є. Однак для матеріалу C45 положення максимальної температури є майже постійною.

Це причина, чому фазове перетворення відбувається в матеріал. За тривалості імпульсу потреби аустенітного перетворення поглинають тепло. Чим більше енергії поглинається матеріалом, тим більше тепла поглинається аустенітним перетворенням. Змінення динамічної мікродеформації від часу протягом лазерного матеріалу взаємодія показано вказує, коли лазерний промінь опромінює поверхню зразка, деформується від лазерного променя через теплове розширення. При постійній тривалості імпульсу деформація стає все більшою і більшою. Але завдяки теплопровідності, тепла енергія, яка проводить до нижньої поверхні, відбивається на зразка і покращує температуру внутрішньої частини зразка. Це зменшується деформація і робить криву постійним значенням протягом короткого часу після тривалість імпульсу закінчується. Після лазерний промінь вимикається, оскільки температура падає, зразок стискається і деформація зразка подалі від лазерний промінь зменшується поступово. Для матеріалу St14 зразок деформується в напрямку нарешті лазерний промінь. Але для матеріалу C45, завдяки мартенситному перетворенню, об'ємне розширення зменшує деформацію до лазерного променя і робить зразок деформується остаточно від лазерного променя. Значення і напрямок фіналу деформації залежать від енергії, поглиненої зразком. Очевидно, що чим вище вихідна потужність лазера, тим більша деформація.

Основними факторами, що впливають на взаємодію лазера та матеріалу, є вихідна енергія лазера, особливості складу матеріалу та товщини зразка. Їх наслідки виражаються як різний розподіл температури та різний динамічний мікро- розподіли деформацій. Експерименти показують коливання температури і динамічна мікродеформація в залежності від часу під час взаємодії лазер - матеріал під стан різної вихідної потужності лазера, матеріалу та товщини зразка. детальний аналіз показаний наступним чином.

Вплив вихідної потужності лазера на розподіл температури і динамічні мікродеформації показані на вказує, що чим більша вихідна потужність лазера, тим вища максимальна зафіксована температура. Це означає, що енергія поглинається зразком визначає температурне значення зразка. Крім того, позиція максимальна

температура рухається до нижньої сторони завдяки покращенню глибина передачі тепла в матеріал всередині і теплова енергія, яка проводить до нижньої бічної поверхні відображається у зразку і показує, що чим більша вихідна потужність лазера, тим більший зразок

деформація при взаємодії лазер-матеріал становить. Це є причиною того, що значення теплового розширення залежить від розподілу температури в зразку. Однак деформація зразка залежить від величини теплового розширення.

Вплив складу матеріалу на розподіл температури та динамічну мікродеформацію зображено на 150 X. WANG та ін.10 вказує, що при однакових технологічних параметрах положення максимальної температури матеріалу C45 знаходиться ближче до верхньої сторони. Це тому фазове перетворення відбувається в матеріалі. За тривалості імпульсу, аустенітна трансформація потребує поглинання тепла. 11 показує, що за однакових технологічних параметрів склад матеріалу має великий вплив на остаточну деформацію зразка.

Для матеріалу St14 зразок нарешті деформується в напрямку лазерного променя. Крім матеріалу C45, внаслідок мартенситного перетворення об'ємне розширення зменшується деформація в напрямку лазерного променя і може спричинити деформацію зразка подалі від лазерного променя, нарешті.

Це також показує, що за однакових технологічних параметрів, чим тонше зразка, тим більше теплової енергії передається в нижню поверхню і відображається в зразку. Тож відповідна температура вища. Біля в той же час відносно положення до товщини максимальної температури становить ближче до нижньої сторони. вказує, що при однакових технологічних параметрах тонший чим зразок, тим більша деформація зразка. Це є причиною того, що чим тонший зразок, тим менший момент перерізу зразка. Отже зразок виробляє більше деформації за тієї ж енергетичної взаємодії. Але якщо зразок досить тонкий, під час лазерного матеріалу виникає сильна вібрація взаємодія. Результат експерименту впливає Результати експерименту показують, що теплофізичний процес взаємодії лазера і матеріалу поділяється на фазу нагрівання та фазу охолодження.

- Фаза нагрівання

Коли лазерний промінь опромінює поверхню зразка, температура вмикається верхня поверхня в нагрітій області швидко збільшується (не перевищуючи плавлення пункт матеріалу). Сильні градієнти температури в основному виникають у товщі напрямом зразка. Завдяки великому тепловому розширенню і низькій границі текучості на верхній поверхні при високій температурі утворюється нагріта область матеріалу стискаюча пластична деформація і призводить до накопичення матеріалу. Отже зразок деформується від променя лазера. При постійній тривалості імпульсу, деформація все більша і більша. Але завдяки теплопровідності теплова енергія, що веде до нижньої поверхні, відображається у зразку і робить температура внутрішньої частини зразка покращується. Це зменшує деформацію

і робить криву деформації зразка постійною для а короткий час після закінчення тривалості імпульсу. Кут деформації дорівнює  $\alpha$  як показано. Це залежить від градієнта температури в товщі напрямом та обмеження геометрії зразка.

- Фаза охолодження

Після вимкнення лазерного променя температура на верхній поверхні падає дуже швидко. Матеріал стискається так, що частина накопичуваного матеріалу відновлюється і стискаюче напруження зменшується. З розвитком охолодження внаслідок теплопровідності нижній шар зразка розширюється постійно і робить його подовженим. Отже, деформація віддаляється від променя лазера зменшується поступово. Наскільки матеріал має фазове перетворення властивість, мартенситне перетворення може спричинити збільшення обсягу так, що деформація від лазерного променя збільшується. Тому кут  $\beta$  деформації є результатом термічної деформації та перетворення деформаційна співпраця.

2.4. Літак, що працює на LH2, відкриває захоплюючі перспективи для авіаційної промисловості, не тільки усуваючи викиди CO2 від експлуатації, але й потенційним покращенням експлуатаційних витрат авіакомпаній. Однак для точної оцінки потенціалу та наслідків літаків LH2 необхідний поглиблений аналіз усіх

факторів, що виходить за рамки сучасних знань. Це включає, але не обмежується, традиційні показники ефективності літальних апаратів, такі як корисне навантаження та можливості дальності. Усі прямі та непрямі експлуатаційні витрати, пов'язані з такими літаками, повинні враховуватися, включаючи логістичні та технічні наслідки. Останні п'ять років продемонстрували тенденцію до зростання цін на авіаційне паливо. Нещодавні стрибки цін на реактивне паливо змусили його стати найбільшою прямою експлуатаційною вартістю для більшості авіалайнерів. Тенденції свідчать про коливання цін на паливо для авіакомпаній, що спричиняє понад 30% операційних витрат (Факти: паливо, 2014). Для того, щоб боротися з такими тенденціями, операторам літаків і, зокрема, авіакомпаніям надається обмежений вибір. Найбільш стійким рішенням для боротьби з витратами пального є зменшення використання традиційних видів палива на основі викопних матеріалів. Історичні знання показують, що якщо дії не будуть опосередковані з точки зору субсидування, альтернативне паливо одного разу досягне тієї ж ціни, що і паливо, з яким воно безпосередньо конкурує. Впровадження палива, такого як LH2, в авіації може мати ключове значення для зменшення експлуатаційних витрат, пов'язаних з паливом. Наприклад, ціна гасу в 5 дол. США за галон дозволить LH2 бути на 0,7 дол. США дорожчою для отримання тих самих прямих експлуатаційних витрат, що і звичайне реактивне паливо, що дозволяє на 50% збільшити витрати на придбання та обслуговування на ранніх стадіях впровадження. Переваги використання палива на основі LH2 також пов'язані з його чудовим енерговитратами (ESFC) порівняно зі звичайними паливами для літаків. Високий ESFC LH2 може дозволити легші двигуни, що може призвести до непрямой економії енергії на 3%. Подібні результати були висвітлені в ряді інших робіт, що забезпечують підтримку енергоефективності двигунів LH2. Прийняття палива LH2 може призвести до зростання. до зниження ваги бруто на 30%, зумовленого нижчою масою LH2 порівняно з гасом. Хоча експлуатаційна порожня вага (OEW) обох літаків була б однаковою, літак на великій дальності, що працює на паливі LH2, швидше за все, був би приблизно на 7 метрів довше. У поєднанні з двопалубним фюзеляжем і меншим розміром крила, у порівняльного літака LH2 спостерігатиметься зменшення приблизно на 15% середнього коефіцієнта підйому до



опору. Однак цьому збільшенню опору буде протидіяно покращення на 11% щодо енергоспоживання, дещо зменшивши прямі експлуатаційні витрати. Очікується також, що економія прямих експлуатаційних витрат буде зменшена на ранніх стадіях завдяки прогнозованому зростанню закупівельної ціни на повітряне судно, технічного обслуговування та обслуговування порівняно зі звичайними літаками (Verstraete, 2013). Авіап перевезення мають все більше значення для прибутковості маршрутів авіакомпаній. Для того, щоб скористатися нею, на додаток до вимог багажу пасажирів має бути спеціальна вантажомісткість. У порівнянні між звичайними літаками, що працюють на гасі, та літаками LH2 звичайної конфігурації, стає очевидним, що звичайні літаки мають більшу об'ємну ємність для корисного навантаження. Цей потенційно економічний недолік може бути переважений завдяки можливості розширеної дальності літаків LH2. Вагові та енергетичні переваги LH2 дозволяють цим літакам літати на більші відстані, ніж у звичайних гасових літаків.

Авіабудівна компанія Airbus презентувала три концепти пасажирського літака, який працюватиме на водні замість авіаційного палива і тому не забруднюватиме довкілля викидами.

Airbus планує ввести водневий літак в експлуатацію у 2035 році. У компанії вірять, що майбутнє екологічних технологій – за воднем.

Концепт ZEROe має три версії – усі працюють на водні.

*Перша передбачає турбореактивні двигуни. Такий літак вміщуватиме 120-200 пасажирів і може долати понад 3700 кілометрів, тобто здійснювати міжконтинентальні перельоти.*



*Друга версія має турбогвинтові двигуни. Літак розрахований на 100 пасажирів і менше, і може здійснювати рейси завдовжки приблизно 1850 кілометрів (тисячу морських миль).*



*Третя версія має дизайн із плавним переходом від крила до фюзеляжу (blended-wing body). Така конфігурація надає більше можливостей для зберігання рідкого водню. Місткість літака – до 200 пасажирів, дальність польоту – приблизно 3700 кілометрів, як і в першому концепті.*



В Airbus зазначають, що перехід на водневі літаки вимагатиме переоблаштування всієї авіаційної інфраструктури. Такі амбітні плани неможливо буде реалізувати без підтримки з боку держави.

## 2.5. Висновок

Хоча воднева енергетика має багато чудових переваг, вона насправді не є переважно чистим та дешевим джерелом енергії для більшості урядів та компаній. У газоподібному стані це досить летюче.

Хоча його мінливість дає перевагу перед іншими джерелами енергії з точки зору виконання численних завдань, вона однаково робить ризикованим використання та обхідні шляхи. До деяких недоліків енергії водню належать:

### **1. Воднева енергія дорога**

Електроліз і паровий риформінг, два основні процеси видобутку водню, надзвичайно дорогі. Це справжня причина, через яку він широко не використовується у всьому світі. Сьогодні енергія водню в основному використовується для живлення більшості гібридних транспортних засобів .

Потрібно багато досліджень та інновацій, щоб знайти дешеві та стійкі способи використання цієї форми енергії. До цього часу воднева енергія залишалася б виключно для багатих.

### **2. Ускладнення зберігання**

Однією з властивостей водню є те, що він має меншу щільність. Насправді він набагато менш щільний, ніж бензин. Це означає, що його потрібно стискати до рідкого стану і зберігати так само при більш низьких температурах, щоб гарантувати його ефективність та ефективність як джерела енергії .

Ця причина також пояснює, чому водень повинен постійно зберігатися та транспортуватися під високим тиском, тому транспортування та загальне використання далеко не здійсненне.

### **3. Це не найбезпечніше джерело енергії**

Потужність водню зовсім не слід недооцінювати. Хоча бензин є трохи небезпечнішим за водень, водень є легкозаймистою та летючою речовиною, яка часто робить заголовки потенційних небезпек. У порівнянні з газом, водню не вистачає

запаху, що робить виявлення витоків практично неможливим. Щоб виявити витoki, потрібно встановити датчики.

#### **4. Хитро пересуватися**

Це надзвичайно важке завдання - блискуче транспортувати водень завдяки його легкості. Нафту можна транспортувати безпечно, оскільки вона в основному просувається по трубах.

Вугілля можна зручно перевозити на самоскидах. Водень також представляє труднощі при розгляді можливості переміщення його у великих кількостях, саме тому він переважно транспортується лише невеликими партіями

#### **5. Це залежить від викопного палива**

Воднева енергія є відновлюваною і має мінімальний вплив на навколишнє середовище, однак для її відділення від кисню потрібні інші невідновлювані джерела, такі як вугілля, нафта та природний газ. Викопне паливо все ще потрібно для виробництва водневого палива.

#### **6. Воднева енергія не може підтримувати населення**

Незважаючи на те, що водень є щедрим у постачанні, витрати на його використання обмежують широке використання. Як ви розумієте, порушити статус-кво досить складно.

Енергія з викопного палива все ще править світом. Також не встановлено жодних рамок для забезпечення дешевої та стійкої водневої енергії для звичайного власника автомобіля в майбутньому.

Навіть якби водень зараз став дешевим, потрібні були роки, щоб стати найбільш використовуваним джерелом енергії, оскільки самі транспортні засоби та СТО повинні бути налаштовані відповідно до вимог водню. Це зажадало б значних капітальних витрат.

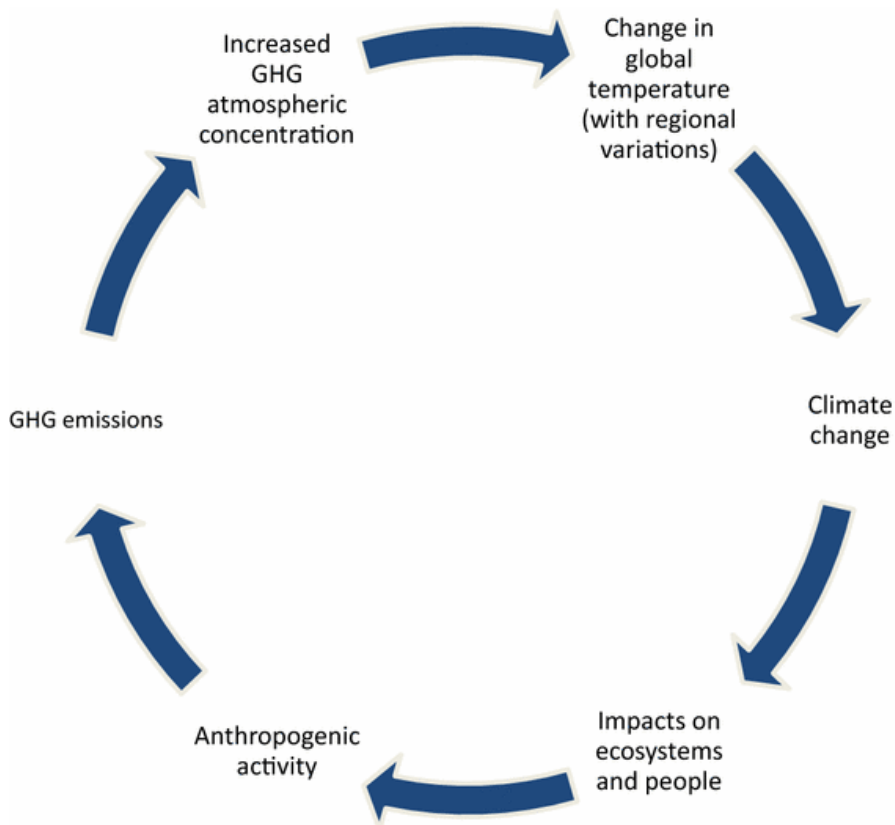
**Розділ №3** Вплив логістичних потоків на надійність авіаційного транспорту та техніки

3.1. Енергетичні системи спричиняють вплив на навколишнє середовище, що змушує багато країн та регіонів проводити великі екологічні оцінки перед затвердженням та впровадженням нових енергетичних систем або основних модифікацій існуючих. Вплив на навколишнє середовище включає, зокрема, зміну клімату, виснаження озону стратосфери, кислотні опади та смог.

Багато хто продемонстрував, що зміна клімату є значним ризиком для людства, і, таким чином, стала проблемою для політиків та громадськості. Діяльність, яка призводить до зміни клімату, показана на рис. 2, де видно, що викиди парникових газів (ПГ) від антропогенної діяльності є головним фактором і що можливий вплив парникових газів на екосистеми та людей може стимулювати діяльність щодо пом'якшення та / або адаптуватися до змін клімату. Значні кількості вуглекислого газу, найважливішого парникового газу, є результатом спалювання викопного палива, на яке припадає переважна більшість споживання енергії у всьому світі. Цей пункт підтверджується Таблицею 2, яка показує минуле та передбачуване збільшення глобального споживання енергії та CO<sub>2</sub> викидів.

<b>Кафедра авіоніки</b>				<b>НАУ 19 14 47 000 ПЗ</b>			
<b>Виконав</b>	<i>Петренко Є.А</i>				<b>Літ.</b>	<b>Арк.</b>	<b>Акрушів</b>
<b>Керівник</b>	<i>Землянський В.М</i>						
<b>Консульт.</b>							
<b>Н-контр.</b>	<i>Левківський В.В</i>				<b>6.051103 «Авіоніка»</b>		
<b>Зав. каф.</b>	<i>Павлова С.В.</i>						

Характеристика джерел вуглекислого газу допомагає проілюструвати причини кліматичних змін. Минулі глобальні викиди CO<sub>2</sub> наведені в останніх чотирьох рядках Таблиці 2 з розбивкою за джерелами палива. Минулі та прогнозовані майбутні викиди CO<sub>2</sub> наведені в рядках 9–12 таблиці 2 для кількох соціально-економічних категорій: країни, що розвиваються, країни з перехідною економікою та ОЕСР.



*Дії, які ведуть до зміни клімату та можуть спонукати до їх пом'якшення. Цикл починається з антропогенної діяльності, що призводить до викидів парникових газів. Потенційний вплив на екосистеми та людей може стимулювати антропогенну діяльність до пом'якшення та / або адаптації до змін клімату*

Водень є корисним носієм енергії. Його можна зберігати і транспортувати, а також використовувати як паливо або перетворювати в електричну енергію в таких пристроях, як паливні елементи. Водень може бути доброякісним для навколишнього середовища, оскільки, залежно від джерела енергії, з якого він отриманий, він може вироблятися з води і повертається назад у воду після окислення.

Є багато причин, чому водень є логічним та доцільним вибором як хімічного палива для заміни сучасних викопних видів палива. Основна причина полягає в тому, що водень є додатковим носієм енергії до електроенергії. Обидва носії енергії необхідні, оскільки кожен може задовольнити цілий ряд запитів на енергетичні послуги, деякі з яких не можуть бути задоволені іншими. Переваги та недоліки водню як хімічного палива впливають з його властивостей та характеристик. Основні переваги водню, як зазначають кілька дослідників, перелічені нижче:

**Продуктивний.** Водень можна отримувати з вуглеводневих та, що більш важливо, неуглеводневих джерел енергії. Вода, широко доступний товар, є єдиним необхідним кормом.

**Використовуваний .** Водень може використовуватися як хімічне паливо та як хімічна сировина у багатьох промислових процесах, таких як переробка металевих руд та модернізація важких масел та смол, а також у транспорті , і житлові та комерційні програми.

**Зберігається.** Водень, на відміну від електрики, може зберігатися у великих кількостях у різних формах. Вибір, у якій формі водень найкраще зберігатись для даного застосування, залежить від кількох факторів, таких як те, для чого буде використовуватися водень.

**Транспортабельний .** Існує багато способів транспортування водню (наприклад, автомобільним, залізничним, судновим). Крім того, він транспортується на великі відстані, використовуючи традиційну технологію трубопроводів, з втратами, меншими за втрати, пов'язані з транспортуванням електроенергії за допомогою високовольтних електропроводів. Таким чином, енергія з неуглеводневих джерел енергії, розташованих на великій відстані від споживачів енергії, може бути використана для виробництва водню, а потім легко транспортується.

**Екологічно доброякісний .** Утилізація водню передбачає окислення, і єдиним безпосереднім основним продуктом окислення водню є вода. При спалюванні водню

у повітрі виділяється невелика кількість оксидів азоту, але ними можна керувати за допомогою ретельної конструкції двигуна. Вплив на довкілля з іншими фазами життєвого циклу водневої системи подібний до впливу інших енергетичних технологій і може бути невеликим або великим, головним чином залежно від джерела водню.

**Переробляється.** Водень підлягає переробці як носій енергії, завдяки чому водень окислюється у воду, яка може відокремлюватися з утворенням водню.

**Синергетичний.** Водневі енергетичні системи зазвичай містять багато синергізмів. Тобто, використовуючи водень як енергоносій, можна задовольнити й інші вимоги системи. Наприклад, виробництво водню з використанням електроенергії, виробленої з ядерних реакторів CANDU (канадський дейтерій-уран), може отримати побічний продукт важкої води за допомогою комбінованого процесу каталітичного обміну електролізом (CECE). Важка вода, в свою чергу, може подаватися в реактор, де вона потрібна як сповільнювач і охолоджуюча рідина.

Водень також має деякі небажані характеристики, деякі з яких наведені нижче:

Водневі накопичувачі мають щільність накопичення енергії, меншу ніж у бензинових сховищ як на масі, так і на обсязі. На масовій основі найвища щільність накопичення енергії водню досягається за допомогою накопичувача рідкого водню, щільність зберігання енергії якого становить приблизно 80% щільності накопичувача бензину. За об'ємною основою найвища щільність накопичення енергії водню досягається за допомогою типу сховища гідридів металів, щільність енергії якого приблизно 35% від енергії зберігання бензину. Загалом, жоден варіант зберігання водню не має високої щільності зберігання енергії як на масі, так і на обсязі. Це особливо проблематично в автомобільному застосуванні водню як палива.

Через низьку щільність та малий молекулярний розмір він може витікати з резервуарів.

Водень може спричинити проблеми з деякими матеріалами. Наприклад, у присутності водню деякі сплави, як правило, стають крихкими.



Виробництво водню може бути дорогим для використання в якості енергоносія, особливо порівняно з вартістю викопного палива в даний час.

Завдяки вдосконаленій техніці можна вирішити більшість небажаних характеристик водню.

Однією з характеристик водню, про яку вже багато років дискутували, є те, наскільки безпечно можна використовувати водень. "Синдром Гінденбурга", для якого характерний страх перед усім, у чому грає роль водень, був названий фразою після аварії Гінденбурга, що відбулася 1937 року в Лейкхерсті, штат Нью-Джерсі. Водень, як і будь-яке паливо, має небезпечні властивості, але побоювання громадськості щодо водню часто виникають головним чином із страху перед невідомим. Окрім небезпечних властивостей, водень має ще й деякі безпечні. Результати багатьох досліджень наслідків безпеки водню вказують на те, що небезпека водню не здається гіршою, ніж бензин, природний газ або будь-яке інше паливо, а лише різниться. Врахування температури полум'я, енергії вибуху та коефіцієнта випромінювання полум'я водню свідчить про те, що він безпечніший за метан та бензин. Через свою нетоксичність витік водню не завдає шкоди навколишньому середовищу, і водень швидко розсіюється, оскільки піднімається від джерела через низьку щільність, зменшуючи ризик пожежі чи вибуху. Крім того, багато груп, такі як Національне управління з питань авіації та космосу США (NASA) та нафтохімічна промисловість, безпечно використовують водень протягом багатьох років. Загалом, більшість людей, які працюють з воднем або вивчають його, дійшли висновку, що водень можна використовувати безпечно.

Попередні обговорення припускають, що водень може відігравати визначну роль як носій енергії в майбутньому. Шлях від сьогодення до майбутнього можна розбити на три епохи. Світ еволюціонує від нинішньої "ери викопного палива", ери, коли викопне паливо та електроенергія є основними енергоносіями, а водень по суті не використовується як енергоносіє, до "епохи водню", ери, в якій існують будуть лише двома основними енергоносіями: воднем та електрикою. «Перехідна ера» пов'яже еру викопного палива з епохою водню.

Перехідна ера характеризуватиметься поступовим заміщенням хімічних носіїв енергії. Легкі вуглеводні, такі як нафта та природний газ, поступово будуть замінені важкими вуглеводнями, такими як вугілля, сланці та піски та смоляні піски. Вони, в свою чергу, будуть замінені воднем. Скотт ( 2007) зазначає, що ключовою особливістю такої перехідної ери буде інтеграція джерел енергії та енергоносіїв. Якщо в епоху викопного палива одне джерело енергії часто використовується для виробництва одного енергоносія (наприклад, урану для виробництва електроенергії або природного газу для виробництва тепла), то в перехідну еру частіше використовуватимуть набір джерел енергії для отримання набору енергоносіїв. Наприклад, метанол, водень, електроенергія та низькосортне тепло вироблялися з природного газу, урану та води на демонстраційній установці в місті Юліх, Німеччина. Ця інтеграція в основному буде спрямована на затримку моменту, коли викопне паливо не може бути економічно відновлене, та зменшення впливу на навколишнє середовище.

Інший тип інтеграції передбачає використання водню, отриманого з неуглеводневих джерел, у процесах переробки. Кількість продуктів із нафтопереробних процесів значно збільшується, якщо такий водень додавати до важких вуглеводнів, замість того, щоб видаляти вуглець. Наприклад, в Онтаріо, Канада, були зроблені пропозиції використовувати електроенергію, вироблену з атомних електростанцій, для виробництва водню для модернізації важких нафтопродуктів у товарну суміш рідкого палива.

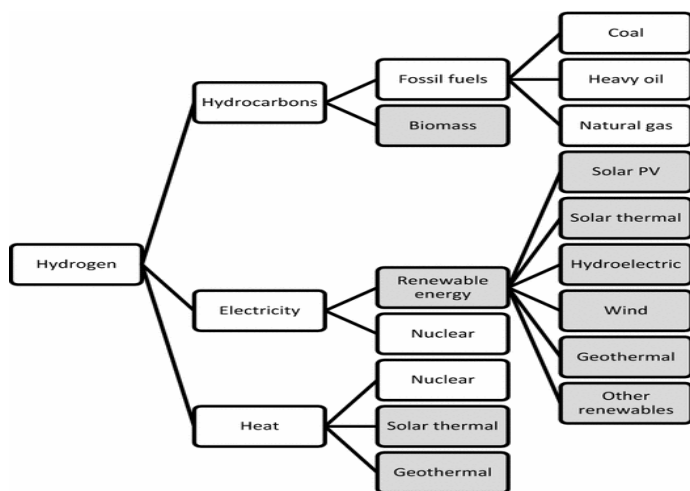
Воднева ера буде досягнута після того, як викопне паливо стане занадто дорогим для економічного відновлення та / або екологічні чи інші необхідні умови спричинять модифікації наших енергетичних систем. Водень виробляється з відновлюваних джерел енергії за допомогою недорогих екологічно чистих процесів. Потім він буде використовуватися як енергоносієм таким чином, щоб використовувати його унікальні властивості, і буде створена інфраструктура, необхідна для підтримки водневої ери. Технології кінцевого використання, особливо паливні елементи, будуть широко поширені. Тривалість водневої ери передбачається великою. За словами

Скотта, після встановлення, воднева ера триватиме стільки, скільки триватиме розвинена цивілізація.

3.2. На сьогоднішній день виробництво водню вимагає значних зусиль для розвитку, оскільки (а) деякі найскладніші технологічні проблеми пов'язані з процесами виробництва водню, і (б) технології зберігання, розподілу та перетворення не застосовуватимуться, якщо економічні методи отримання водню не будуть вперше розроблені. До виробництва водню входять процеси отримання та очищення водню, а також процеси зрідження або стиснення водню, де це можливо. Що стосується безпеки постачання та викидів парникових газів, будь-яка перевага від використання водню залежить від способу отримання водню.

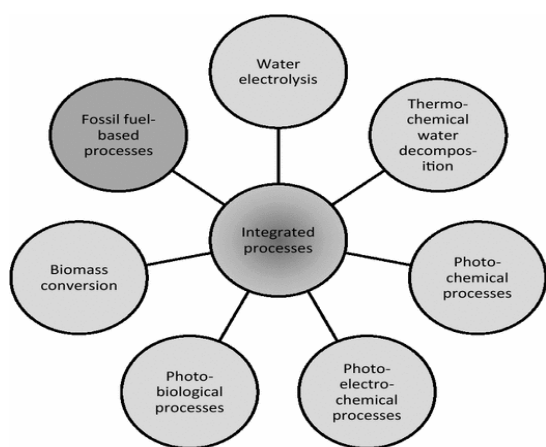
Основні процеси виробництва водню включають паровий риформінг природного газу, каталітичне розкладання природного газу, часткове окислення важкої нафти, газифікацію вугілля, електроліз води, термохімічне розкладання води, а також фотохімічні, електрохімічні та біологічні процеси. Перші чотири процеси базуються на викопному паливі.

Основні джерела енергії для виробництва водню показані на рис. 3, де показано дві основні категорії джерел енергії: вуглеводні та неуглеводні (електроенергія та тепло). Для процесів виробництва водню з використанням вуглеводнів, таких як викопне паливо та біомаса, водень отримують із водню в самому вуглеводні та води. Водень отримують із водню у воді для процесів виробництва водню, що рухаються електричною та тепловою енергією.



*Основні джерела енергії для виробництва водню. Для процесів отримання водню з використанням вуглеводнів ( верхня група ) водень отримують із водню в самому вуглеводні та води. Для процесів виробництва водню з використанням електрики та тепла ( дві нижчі групи ) водень отримують із водню у воді.*

Основні процеси виробництва водню узагальнені на рис . Виділено три основні категорії процесів: процеси на основі викопного палива, процеси, що не на основі викопного палива, та інтегровані процеси, що вигідно поєднують один або кілька процесів виробництва водню.



*Основні процеси отримання водню. Процеси, не засновані на викопному паливі, показані праворуч ( з градієнтним затіненням ), тоді як процеси на основі викопного палива показані зліва ( з простим затіненням ). Різні інтегровані процеси, представлені незатіненим вузлом у центрі діаграми , можливі завдяки поєднанню різних процесів виробництва водню.*

Окрім виробництва водню за допомогою різних згаданих вище методів, водень може забезпечуватися також у хімічній промисловості, де він виробляється як побічний продукт. Прикладом таких процесів є хлорно-лужний процес, де водень утворюється як побічний продукт в електрохімічній камері, що виробляє хлор та гідроксид натрію. За наявності таких ацидолужних електрохімічних комірок визнано дешевими методами виробництва водню, які можуть відігравати певну роль для стійкого перетворення та зберігання енергії та утилізації відходів.

### **Зберігання та розподіл водню**

Однією з основних причин, чому водень добре доповнює електроенергію як енергоносіє, є те, що водень може зберігатися протягом тривалого періоду часу. Крім того, виробництво водню з періодично відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні джерела енергії, життєздатне лише за умови інтеграції системи зберігання водню з виробництвом. Реверсивне зберігання водню є значною проблемою, особливо для використання водню як палива в автомобільних цілях. Водень має низьку щільність енергії на об'ємній основі в порівнянні з іншими видами палива, що вимагає набагато більшого паливного бака для автомобіля, що працює на водні, а не на бензині / дизелі. Крім того, водень є найлегшим з усіх елементів і важче розріджується, ніж метан і пропан. Завдяки своїй низькій щільності, а також малим молекулярним розмірам, він може витікати із судин, що утримують. В додаток, для використання водню в автомобільних цілях система зберігання повинна мати можливість витягувати / вставляти водень з досить швидкими швидкостями. На сьогодні розроблено лише відносно невеликі сховища; однак розробляється кілька великомасштабних сховищ для задоволення майбутніх вимог щодо зберігання, які, як очікується, будуть набагато більшими, ніж нинішні. Нові матеріали з поліпшеними характеристиками або нові підходи до синтезу та / або переробки існуючих матеріалів дуже бажані для використання водню як транспортного палива. Бажані характеристики матеріалів для зберігання водню досліджені Yang et al. ( однак розробляється кілька великомасштабних сховищ для задоволення майбутніх вимог щодо зберігання, які, як очікується, будуть набагато більшими, ніж нинішні. Нові матеріали з поліпшеними характеристиками або нові підходи до синтезу та / або переробки існуючих матеріалів дуже бажані для використання водню як транспортного палива. Бажані характеристики матеріалів для зберігання водню (однак розробляється кілька великомасштабних сховищ для задоволення майбутніх вимог щодо зберігання, які, як очікується, будуть набагато більшими, ніж нинішні. Нові матеріали з поліпшеними характеристиками або нові підходи до синтезу та / або переробки існуючих матеріалів дуже бажані для використання водню як транспортного палива. Бажані характеристики матеріалів для зберігання водню, з

урахуванням вимог до транспортних засобів на паливних елементах. Водень можна зберігати навалом у різних формах і використовуючи безліч технологій:

- як стиснений газ у трубчастих банках;
- у вигляді криогенної рідини (при 20,3 К) у добре ізольованих резервуарах;
- у вигляді змішаної фази, званої водневою сльозою;
- як газ у підземних водоймах та кавернах (оскільки в даний час зберігається велика кількість природного газу);

в хімічних зв'язках з іншими матеріалами, такими як гідриди металів, які дозволяють великій кількості газоподібного водню термічно адсорбуватися та десорбуватися в хімічних зв'язках з поверхнею певних металів;

слабкою адсорбцією молекул  $H_2$  пористим матеріалом, таким як скляні мікросфери, які дозволяють проникнути великій кількості газоподібного водню у невеликі (діаметром 5–200 мкм) скляні сфери; порівняно з гідридами металів, скляні мікросфери мають подвійну ємність для зберігання на одиницю маси і половину ємності для зберігання на одиницю обсягу; і

з використанням кріоадсорбентних технологій, які дозволяють адсорбувати та десорбувати великі кількості газоподібного водню з поверхонь матеріалів, що адсорбуються, при їх низьких температурах (80 К).

Більш детально про різні технології зберігання водню представлені Niaz та співавт. Хоча деякі типи зберігання, такі як адсорбційне зберігання, вже досягли майже своїх можливих меж зберігання, жодна із згаданих вище технологій зберігання водню ще не досягла задовільного рівня ефективності. Всі технології накопичення водню, що включають поглинання або виділення тепла, стикаються з проблемами управління теплом, і їх ефективність залишається обмеженою. Системи зберігання під тиском, такі як рідкий водень та стиснений водень, а також деякі адсорбційні системи зберігання мають втрати ефективності під час стиснення та охолодження; для стиснення газу потрібно до 20% енергетичного вмісту водню, а для зрідження -

до 40%). Крім того, існує безліч невирішених питань безпеки, пов'язаних із використанням водню під тиском. Оглядають різні методи зберігання водню, включаючи зберігання високого тиску та криогенні рідини, адсорбційне зберігання на адсорбентах з високою поверхнею, зберігання хімічних речовин у гідридах металів та складних гідридах та зберігання у боранах. Вони вважають, що зберігання рідкого водню та тиску є найбільш життєздатними рішеннями для великого та малого зберігання водню в даний час відповідно. Хімічні системи зберігання водню мають багато можливостей для вдосконалення, оскільки нові матеріали досліджуються. Однак необхідні значні інвестиції, перш ніж ці системи зберігання стануть економічно вигідними для використання в промислових масштабах.

Окрім технологій зберігання водню існує кілька технологій розподілу водню. Багато методів розподілу водню використовують технології, що використовуються також для зберігання. Наприклад, останні три перераховані вище технології зберігання водню також є технологіями розподілу водню. Крім того, водень можна транспортувати навалом:

- трубопровід як газ, або, можливо, на невеликі відстані, як рідина;
- вантажівка або залізниця як сильно стиснений газ у трубчастих цистернах; і
- вантажівка чи залізниця або корабель у вигляді рідини.

Загалом, вибір способу зберігання та розподілу залежить від таких факторів, як (а) в якій формі в кінцевому підсумку буде використовуватися водень, (б) які обмеження, такі як обсяг або маса, існують, (в) які технології є комерційними доступні (гідриди металів, скляні мікросфери та кріоадсорбенти знаходяться на стадії досліджень та розробок) та (д) які технології є економічно вигідними. Враховуючи вартість водню для кінцевих споживачів, в деяких випадках децентралізоване місцеве виробництво водню з використанням метан-риформінгу або електролізу води стає економічно доцільним.

Якщо світовий прогрес до водневої ери повинен йти плавно і швидко, необхідно вирішити всі питання, пов'язані з використанням водневої енергії. Як

зазначалося раніше, водневі технології повинні розроблятися до тієї стадії, коли вони будуть економічно та комерційно вигідними. Це завдання включає подолання будь-яких існуючих проблем безпеки та розбудову інфраструктури, можливо, поступової, необхідної для підтримки водневих енергетичних систем. Однак є багато соціальних та політичних питань навколо водневої енергії, які слід розуміти. Зараз обговорюється декілька з цих питань.

Численні соціальні та політичні наслідки переходу до водневої ери досліджували уряди, університети та приватні галузі. Взагалі, вступ водню підпорядковується цілям країни, деякі з яких є

- здоровий рівень зайнятості
- досить хороші темпи економічного зростання
- розумна стабільність цін
- життєздатний платіжний баланс
- справедливий розподіл зростаючих доходів.

Відповідно до цих цілей існує декілька факторів, які мають важливе значення у формуванні водневої політики для країни. Наприклад, важливі питання розробки та встановлення національної водневої енергетичної політики для Канади вивчалися протягом багатьох років і включають наступне:

Канадські енергетичні системи слід поступово віддаляти від вуглеводнів у довгостроковій перспективі, що було рекомендацією Парламентського спеціального комітету з енергетичних альтернатив ще у 1981 році (Лефевр та ін., 1981 ). Таким чином, Канада могла б (а) уникнути екологічних проблем, що супроводжують постійне широкомасштабне використання вуглеводнів, (б) зберегти залишки вуглеводнів для неенергетичних потреб, таких як хімічне виробництво, та (в) зменшити використання іноземної нафти поставок.

- Канада має безліч джерел вуглеводневої енергії, що включає велику кількість природного газу, вугілля, важких масел та нафтових пісків.



- Канада має безліч неуглеводневих джерел енергії, які призводять до великої кількості електроенергії, що виробляється з гідро- та ядерної енергії.
- Водневі технології, деякі з яких розробляються в Канаді, можуть сприяти прискоренню використання неуглеводневих ресурсів при збереженні вуглеводневих ресурсів.
- Розробляючи водневі технології, Канада не тільки допоможе вирішити власні енергетичні проблеми, але й розвине нові канадські високотехнологічні галузі.

Визнаючи ці проблеми, багато досліджень протягом кількох десятиліть давали рекомендації щодо збільшення фінансування водневих проектів. Наприклад, у Канаді такі дослідження проводили Спеціальний комітет з питань альтернативної енергетики та заміщення нафти (обговорювалося раніше) та органи провінцій в Онтаріо та Квебеку. У Канаді послідувало кілька обнадійливих подій у галузі водневої енергетики, зокрема, наприклад, створення Ради з водневої промисловості, до складу якої входили представники користувачів та виробників, та Інституту водневих систем в Онтаріо. Суспільне уявлення, яке часто стосується витрат і вигод, впливає на значні ринкові та поведінкові моделі нових технологій. Розуміння суспільного сприйняття, отже, є вирішальним кроком у керуванні переходом до нових технологій. Для виконання цього завдання потрібні методології, які можуть ефективно обробляти виявлення знань, подання та міркування.

Громадська підтримка та спротив громадськості впливають на впровадження водневих технологій. Тому громадське сприйняття водневої економіки часто аналізується, щоб допомогти політикам розробити стратегії, які могли б допомогти поліпшити суспільне сприйняття та впровадити водневі технології. Це часто робиться за допомогою опитувань та математичних інструментів, таких як нечітке когнітивне картографування, для аналізу когнітивних структур, що лежать в основі вірувань, пов'язаних з низьковуглецевим майбутнім (Kontogianni et al. 2013). Фінансові вигоди, екологічні проблеми, безпека та знання про нову технологію, здається, є одними з факторів, які часто аналізуються при вивченні сприйняття громадськістю будь-якої

нової технології, включаючи відновлювані та водневі технології. Одне дослідження показує, що готовність платити за участь у проектах, що сприяють використанню транспортних засобів на паливних елементах, незважаючи на поточні обмеження транспортного засобу (тобто зменшений запас ходу та обмежені можливості заправки), здається, зумовлена головним чином очікуванням користувачів на особисті фінансові прибутки (тобто, зниження експлуатаційних витрат). У таких випадках фінансово привабливий пакет є важливим для просування водню серед користувачів. Здається, серед деяких користувачів не виникає великих проблем з безпекою щодо керування транспортними засобами, що працюють на водню. Здається, що у високорегульованих галузях, де проводяться суворі випробування для забезпечення безпеки, користувачі можуть бути не так занепокоєні безпекою використання водню. У деяких дослідженнях виявлено, що екологічні міркування впливають на готовність користувачів платити за водневі технології. Це може означати, що підвищення обізнаності громадськості про такі технології та забруднення повітря сприяє використанню цих технологій у майбутньому. Навпаки, в деяких дослідженнях користувачі, які мають кращі знання технології, більше наголошують на труднощах майбутнього водню.

Huijts та співавт. досліджують психологічні детермінанти підтримки чи підтримання громадянами технології водневих АЗС. Вони пропонують, щоб особи, що розробляють політику, залучали громадян до відносно ефективних, простих та оцінених заходів підтримки, щоб отримати підтримку від користувачів. Вони також показують, що дії користувачів, що виступають проти, відбуваються тоді, коли вони мають меншу довіру до галузі. Тому здобуття та збереження довіри здається важливим для мінімізації опозицій проти водневих технологій (Huijts et al. 2014).

Аргументи, що ведуть до висновку про те, що світ неминуче рухається до водневої ери, часто непевні щодо однієї важливої деталі: часу. Корисно знати, коли водень почне грати роль енергоносія, а коли стане основним хімічним носієм енергії. Виходячи з обговорень у цій главі технічних, економічних, соціальних та політичних

факторів, що впливають на енергію водню та світовий прогрес до водневої ери, можна поставити запитання, поставлене Маркетті ( 1985 ): Коли прийде водень?

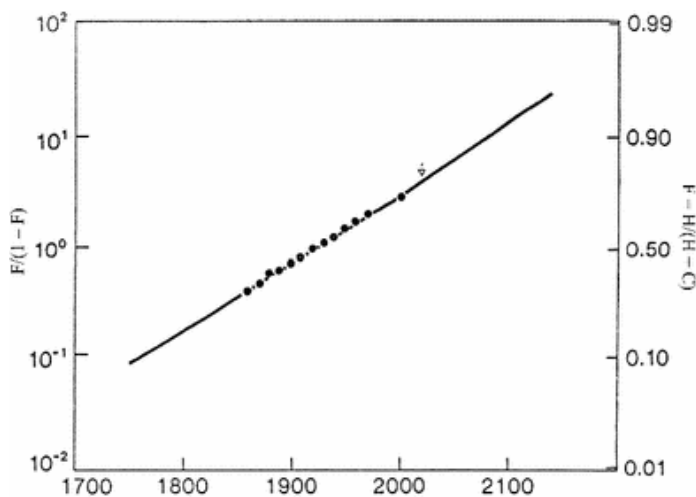
Загально визнано, що енергія водню стане важливою в різних країнах у різний час. Отже, відповідаючи на питання, коли прийде водень, треба також відповісти на питання: Куди прийде водень? Більшість прогнозів зроблено для розвинених країн. Це пов'язано з тим, що вони, ймовірно, будуть першими країнами, яким водень потрібен як енергоносіє. Це не означає, що країни, що розвиваються, не потребуватимуть водню. Навпаки, їм, швидше за все, буде потрібен водень так само, як будь-якій розвиненій країні, якщо вони сподіваються продовжувати розвиватися. Однак вступ країн, що розвиваються, до перехідної ери майже напевно буде слідом за розвинутими. Отже, більшість наступних дискусій стосуються розвинутих країн.

Намагаючись передбачити, коли і куди прийде водень, було використано багато аргументів, починаючи від інтуїтивних оцінок і закінчуючи детальними розрахунками. На початку 1980-х багато дослідників передбачали, коли вони очікують, що водень почне ставати «важливим» як енергоносіє. Цей час приблизно відповідав би початку перехідної ери, дотримуючись термінології, використаної в цій роботі. Загалом, прогнозовані значення для багатьох різних розвинених країн коливались в межах 1990 - 2020 років.

Деякі з найбільш інтригуючих методів міркування, що використовуються для прогнозування важливості водню, були представлені Маркетті. У своїй роботі 1973 року Маркетті представив концепцію «енергетичного острова», маленького острова, на якому буде вироблятися величезна кількість ядерної енергії. Ця енергія буде розподілена серед світових користувачів у вигляді водню. Використовуючи те, що він назвав "мрійливими здогадками", Марчетті передбачив, що енергія водню стане важливою в 1991 році.

Згодом Маркетті ( 1985 ) розробив два незалежні та більш суворі аргументи, які він використовував, щоб передбачити, коли водень почне проникати на світові енергетичні ринки. У першому аргументі він показав, що з часом ринок вимагав більше рідкого палива, палива, яке має постійно зростаючі атомні відношення водню

до вуглецю ( $H/C$ ). Тобто деревину ( $H/C = 0,1$ ) замінили вугіллям ( $H/C = 1$ ), яке замінили нафтою ( $H/C = 2$ ), яке остаточно замінило природним газом ( $H/C = 4$ ). Ця еволюція проілюстрована, використовуючи той же формат сюжету. На рис., Маркетті склав графік  $H/C$  у світовій суміші палива як функцію від часу, і, після моделювання даних, прогнозований  $H/C$  у світовій суміші палива в підсумку буде більшим ніж чотири. Але оскільки жоден інший вуглеводень не має відношення водню до вуглецю більше 4, Маркетті дійшов висновку, що  $H/C > 4$  у світовій паливній суміші означає, що як паливо повинен використовуватися чистий водень. Екстраполюючи криву на рис. до  $H/C = 4$ , Маркетті передбачав, що чистий водень почне проникати на світовий ринок як паливо приблизно в 2000 році.



*Зміни в часі атомного відношення водню до вуглецю ( $H/C$ ) у світовій паливній суміші з точки зору співвідношення  $H/(H + C)$  (адаптоване за Marchetti (1985)). Співвідношення  $H/C$  становить приблизно 4 для природного газу, 2 для нафти, 1 для вугілля та 0,1 для деревини. Трикутник позначає точку, в якій  $H/C = 4$*

У другому аргументі Маркетті показав, що для багатьох технологій час випуску на ринок нової технології («інновація») цілком упорядковано відповідає часу, коли працював перший успішний прототип («винахід»). Відзначаючи існування певних діючих прототипів технології водню та застосовуючи до них це «відношення», Маркетті передбачив проникнення водню на ринок приблизно в 1995–2000 роках.

Трохи пізніше Скотт (1987) використовував аргументи Маркетті та інших, щоб передбачити, що між 1990 і 2015 роками всі розвинені країни досягнуть точки,

коли щонайменше 0,5–2,0% своїх енергетичних операцій буде включати водень, що не отримується з вуглеводнів цей документ, цей час приблизно відповідав би початку перехідної ери). Спостерігаючи, що в деяких розвинених країнах, таких як Німеччина, Франція та Японія, (а) електроенергія, що виробляється ядерною енергією, буде насичувати ринки електроенергії, і (б) технології водневих енергетичних систем активно розробляються, Скотт передбачив, що країни почнуть виробництво не викопного водню до 1990 року. Тобто вони вступлять до перехідної ери до 1990 року. Тоді Скотт передбачав, що між 2000 і 2010 роками більшість інших розвинених країн вступлять у перехідну еру, і до 2015 року всі розвинені країни вступлять у перехідну еру. Однак він зазначає, що країни, що в'їжджають після 2000 року, можуть використовувати технології, імпортовані з провідних країн, що займаються технологією водню.

Інші звіти (наприклад, Marchetti ( 1985 )) передбачали на початку 1980-х років, що протягом наступних кількох десятиліть Канада, Японія та декілька членів Європейського Співтовариства (наприклад, Німеччина, Франція та Бельгія), швидше за все, запровадять водневі технології у спеціальних програмах. Скотт ( 1987 ) детально вивчив Канаду і дійшов висновку, що деякі регіони Канади вступлять до перехідної ери до 1990 року. Деякі характеристики Канади, які підтверджують цей висновок, включають наступне:

- унікальна енергетична матриця, що включає велику потужність виробництва атомної енергії;
- велика та не повністю розвинена гідравлічна потужність генерування енергії;
- передові електролізерні технології; і
- деякі з найширших у світі, але важко добути вуглеводневих ресурсів.

Скотт ( 1987 ) зазначив, що з усіх регіонів Канади Онтаріо, мабуть, буде першим, хто увійде в перехідну еру, зазначивши, що ринки електроенергії Онтаріо були насичені ядерною електроенергією з 1980 року.

Деякі стверджують, що ці прогнози підтвердились і що деякі країни або регіони вступили в перехідну еру. Інші вважають, що незрозуміло, чи досягнута перехідна ера. Звичайно, коливання цін на енергоносії та стурбованість навколишнім середовищем протягом останніх чотирьох десятиліть вплинули на прогнози. Але їх загальні передумови та висновки, як видається, залишаються дійсними якісно, навіть якщо прогнози дат не були точними.

## **Висновки**

Світові запаси викопного палива, таких як вугілля, нафта та природний газ, стають дедалі рідшими, і занепокоєння щодо впливу на навколишнє середовище, пов'язаного з їх використанням, зростає. Викопне паливо поступово замінюється не викопними джерелами енергії, такими як сонячна, вітрова та атомна енергія. Хоча викопні джерела енергії також є носіями енергії, не викопні джерела енергії повинні бути перетворені на енергоносії. Використовуючи сучасну технологію, не викопні джерела енергії перетворюються майже виключно на електроенергію. Незважаючи на те, що споживачам енергії потрібна електроенергія, щоб задовольнити деякі їх енергетичні потреби, їм також потрібне хімічне паливо для певних застосувань, таких як транспорт. Логічним вибором цього хімічного палива є водень, оскільки, серед інших причин,

В даний час технології, необхідні для водневих енергетичних систем, отримують багато зусиль для досліджень та розробок. Існує багато комерційних процесів отримання водню з викопних джерел, таких як паро-метановий риформінг та часткове окислення важких масел. Крім того, існує кілька процесів отримання водню з не викопних джерел, що існують або знаходяться в стадії розробки, наприклад, електроліз та термохімічне розщеплення води. Технологіям зберігання та розподілу водню також приділяється велика увага. Водень можна зберігати та транспортувати у вигляді стисненого газу або у вигляді криогенної рідини, або за допомогою методів, за допомогою яких водень поглинається на поверхні або проникає у спеціально підібрані речовини. Технології використання водню в певних

промислових процесах, такі, як модернізація важких масел та виробництво метанолу та аміаку, є на місці; розробляються технології використання водню як енергоносія, переважно в транспортних цілях.

Сьогодні вартість виробництва водню є найважливішим фактором загальних витрат на використання водню; витрати на утилізацію, зберігання та розподіл відносно невеликі, за винятком витрат на зрідження, що може збільшити вартість поставленого водню приблизно на 60%. Економічна оцінка декількох десятиліть тому, прогнозована для Онтаріо, що водень, вироблений з виробництва атомної енергії, буде економічно конкурентоспроможним водню, виробленому паро-метановим риформінгом (нині економічний метод), до 2000 року, тоді як нові оцінки прогнозують дати, що варіюються від 2020 до 2050 року. Таким чином, водень, що не отримується з викопних матеріалів, може використовуватися в майбутньому в таких областях, як модернізація продуктів нафтопереробної промисловості, де він може замінити водень, що випускається в даний час за допомогою паро-метанового риформінгу.

Багато країн отримують вигоду від впровадження водневих енергетичних технологій, перш за все тому, що ці технології допоможуть стабілізувати проблеми постачання викопного палива багатьох країн сьогодні. Очікується, що ці проблеми погіршаться в майбутньому. Однак для реалізації вигод політика впровадження водневих технологій в енергетичну інфраструктуру країни повинна бути розроблена та політично підтримана. У Канаді політичні зусилля витрачаються на розробку такої політики, і багато регіонів Канади, особливо Онтаріо, мають користь від впровадження водневих технологій.

Більшість дослідників сходяться на думці, що водневі технології будуть впроваджені спочатку в розвинених країнах. Хоча це важко зробити, попередні підрахунки того, коли ці країни почнуть використовувати водень як енергоносії, коливаються в період з 1990 по 2020 рік. Такі країни, як Німеччина, Франція, Японія та Канада, здаються найбільш просунутими по шляху до водневої енергетики. Однак ці прогнози мають велику невизначеність. Технологічні, економічні, соціальні та

політичні фактори і надалі впливатимуть на перспективи водню як енергоносія. Тим не менше, цілком ймовірно, що світ врешті-решт перейде до ери, коли водень та електроенергія є двома головними енергетичними носіями у світі.