

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

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач випускової кафедри

_____ А.Г. Галстян

« _____ » _____ 2020 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

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

Тема: «Перспективи використання водню в авіаційній наземній техніці»

Виконавець: **Євтушенко Д.С.** студент групи АП-204М групи _____

Керівник: **Матвєєва О.Л.** к.т.н., професор _____

Консультант розділу «Охорона праці»: _____ **Халмурадов Б.Д.**

Консультант розділу «Охорона навколишнього середовища»:

_____ **доц. Гай А.Є.**

Нормоконтролер: _____ **доц. Максимюк М.Р.**

(підпис) (П.І.Б)

КИЇВ 2020

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ А.Г. Галстян

“ ___ ” _____ 2020р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Свтушенка Дмитра Сергійовича

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Перспективи використання водню в авіаційній наземній техніці» затверджена Наказом ректора від 02.10.2020р. №1897/ст
2. Термін виконання роботи: з 05.10.2020 по 31.12.2020 р.
3. Вихідні дані до роботи: водень, двигун внутрішнього згорання, стиснений водень, екологічність палива.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Розділ 1. Аналіз використання водневого палива в наземному транспорті. Розділ 2. Особливості водневого палива та його використання для наземного транспорту. Розділ 3. Перспективи використання водню в авіаційній наземній техніці. Розділ 4. Охорона навколишнього середовища. Розділ 5. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел.

5. Календарний план – графік

| № п/п. | Завдання | Термін виконання | Відмітка про виконання |
|--------|--|---------------------|------------------------|
| 1. | Одержання теми. Пошук та аналіз літератури за темою кваліфікаційної роботи. | 05.10.20 – 28.10.20 | |
| 2. | Опрацювання літературних джерел. | 28.10.20 – 17.11.20 | |
| 3. | Визначення фізичних та фізико–хімічних характеристик водневого палива. | 17.11.20 – 02.12.20 | |
| 4. | Опрацювання одержаних результатів. | 02.12.20 – 14.12.20 | |
| 5. | Проведення аналізу охорони навколишнього середовища та охорони праці. | 14.11.20 – 25.12.20 | |
| 6. | Узагальнення матеріалу, оформлення кваліфікаційної роботи, підготовка доповіді та презентації. | 25.12.20 – 31.12.20 | |

6. Консультанти з окремих розділів

| Розділ | Консультант (посада, П.І.Б.) | Дата, підпис | |
|----------------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| Охорона навколишнього середовища | доц. Гай А.Є | | |
| Охорона праці | к.м.н., доц. Халмурадов Б.Д. | | |

Дата видачі завдання: «5» жовтня 2020 р.

Керівник кваліфікаційної роботи: _____ к.т.н., проф. Матвєєва О.Л.

Завдання прийняв до виконання: _____ Євтушенко Д.С.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Перспективи використання водню в авіаційній наземній техніці»: 108 с., 14 рис., 5 табл., 62 використаних джерел.

Мета кваліфікаційної роботи. Дослідити особливості використання водневого палива в авіаційній наземній техніці, причини переходу до альтернативних джерел енергії на транспорті, переваги використання водню як моторного палива.

Об'єкт дослідження. Використання водню в авіаційній наземній техніці.

Предмет дослідження. Водневе паливо, авіаційна наземна техніка.

Методи дослідження. Статистичні, узагальнення, аналіз, літературний пошук та систематизація, SWOT – аналіз.

Досліджено особливості використання водневого палива в авіаційній наземній техніці, проаналізовано причини переходу до альтернативних джерел енергії, показано переваги використання водню як моторного палива.

ВОДЕНЬ, ПАЛИВО, НАЗЕМНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕКОЛОГІЧНІСТЬ,
АЛЬТЕРНАТИВНЕ ПАЛИВО, ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ,
ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ЕЛЕКТРОДИВГУН.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 8 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА В НАЗЕМНОМУ ТРАНСПОРТІ | 10 |
| 1.1. Передумови переходу до альтернативних джерел енергії на транспорті..... | 10 |
| 1.2. Аналіз негативного впливу на навколишнє середовище традиційних видів вуглеводневих палив..... | 12 |
| 1.3. Світовий досвід використання водневої енергетики на транспорті | 16 |
| 1.4. Екологічні показники водневої енергетики..... | 18 |
| 1.5. Проблеми видобутку водневого палива у промислових масштабах..... | 20 |
| 1.6. Висновки до розділу..... | 31 |
| РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА ТА ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТУ | 32 |
| 2.1 Переваги використання водню у якості палива для наземного транспорту..... | 32 |
| 2.2. Експлуатаційні та технологічні показники водневого палива..... | 42 |
| 2.3. Дослідження властивостей водню, як палива для транспортних засобів | 47 |
| 2.4. Малодосліджені питання небезпек водневого палива..... | 56 |
| 2.5. Вибухонебезпечність водневого палива та можливі шляхи його подолання..... | 62 |
| 2.6. Висновки до розділу..... | 65 |

| | |
|--|------------|
| РОЗДІЛ 3. Перспективи використання водню в авіаційній наземній техніці..... | 66 |
| 3.1. Аналіз авіаційного наземного транспорту аеропорту та можливість експлуатації на водневому паливі | 66 |
| 3.2. Інфраструктура забезпечення використання водню в авіаційній наземній техніці | 72 |
| 3.3 Рекомендації що до організаційно технологічних заходів впровадження використання водню в авіаційній наземній техніці | 81 |
| 3.4. . Висновки до розділу | 81 |
| РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА..... | 83 |
| 4.1 Вплив поліетилену на навколишнє середовище..... | 83 |
| 4.2 Економічні інструменти регулювання утворення поліетилену..... | 84 |
| 4.3. Вибухонебезпечність палива | 87 |
| 4.4. Висновки до розділу..... | 90 |
| РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ..... | 92 |
| 5.1. Вступ..... | 93 |
| 5.2. Аналіз умов праці на робочому місці | 93 |
| 5.2.1. Організація робочого місця..... | 96 |
| 5.2.2. Мікроклімат виробничих приміщень..... | 98 |
| 5.3. Пожежна безпека..... | 98 |
| 5.4. Розробка заходів з охорони праці..... | 98 |
| 5.5. Вибір засобів пожежної сигналізації | 99 |
| 5.6.Висновки до розділу..... | 100 |
| ВИСНОВКИ..... | 101 |
| СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 103 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ДВЗ – Двигун внутрішнього згоряння;

ТП – Традиційне паливо;

АП – Альтернативне паливо;

ТЗ – Транспортний засіб;

ОТ – Обслуговуючий транспорт;

ТДК– Транспортно-дорожній комплекс;

ВП – Водневе паливо;

ПП – Промисловий процес;

ВС – Вибухонебезпечна суміш;

АНТ – Авіаційна наземна техніка.

ВСТУП

Актуальність теми. Проблема захисту навколишнього середовища в даний час набуває глобального характеру, зокрема серйозну стурбованість викликає швидке і практично некероване зростання споживання традиційних палив для ДВЗ.

Невичерпність ресурсної бази та її екологічна чистота є визначальними перевагами за умов зменшення ресурсів органічного палива та зростаючих темпів забруднення довкілля.

Проблема забруднення повітря відпрацьованими газами автомобілів є глобальною. У всьому світі кількість автомобілів із кожним днем збільшується у геометричній прогресії, що не може не позначитися на рівні забруднення оточуючого середовища, а особливо атмосферного повітря, вихлопними газами. Транспортно-дорожній комплекс вважається одним з найбільших джерел забруднення довкілля (шумове та теплове забруднення є найбільш поширеними), а особливо в густонаселених мегаполісах, де скупчення автомобілів набагато вище за приміські зони.

Відомо, що на даний час основним видом автотранспорту (пасажирського або вантажного) є автомобілі з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ), джерелом енергії для яких є рідкі або газоподібні вуглеводневі палива. У зв'язку з посиленням вимог щодо збереження клімату планети та скорочення негативного впливу від викидів автотранспорту в навколишнє середовище виникає нагальна необхідність пошуку альтернативної заміни традиційних нафтопродуктів.

Мета кваліфікаційної роботи. Дослідити особливості використання водневого палива в авіаційній наземній техніці, причини переходу до альтернативних джерел енергії на транспорті, переваги використання водню як моторного палива.

Об'єкт дослідження. Використання водню в авіаційній наземній техніці.

Предмет дослідження. Водневе паливо, авіаційна наземна техніка.

Методи дослідження. Статистичні, узагальнення, аналіз, літературний пошук та систематизація, SWOT – аналіз.

Практичне значення одержаних результатів - полягає в майбутній розробці АЗК на території аеропорту для заправки обслуговуючого транспорту водневим паливом для зменшення викидів в атмосферу, зменшення використання традиційних палив. Переобладнання двигунів для водневого палива та впровадження нових технологій в масове виробництво для використання в повсякденному житті та в етапах масових, технологічних, промислових сферах.

Особистий внесок студента у роботу. Проведено загальний аналіз водню як палива, проведено порівняння водневого палива з традиційними енергоносіями, зроблено SWOT-аналіз водневого палива, визначено позитивні, негативні сторони водню як палива, а також його можливості і ризики використання. Запропоновано рекомендації що до використання водню в авіаційній наземній техніці.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА В НАЗЕМНОМУ ТРАНСПОРТІ

1.1. Передумови переходу до альтернативних джерел енергії на транспорті

На сьогодні суспільство розглядає використання альтернативних джерел енергії як один із перспективних шляхів вирішення зростаючих проблем енергозабезпечення [4]. Невичерпність ресурсної бази та її екологічна чистота є визначальними перевагами за умов зменшення ресурсів органічного палива та зростаючих темпів забруднення довкілля.

Проблема забруднення повітря відпрацьованими газами автомобілів є глобальною. У всьому світі кількість автомобілів із кожним днем збільшується у геометричній прогресії, що не може не позначитися на рівні забруднення оточуючого середовища, а особливо атмосферного повітря, вихлопними газами. Транспортно-дорожній комплекс вважається одним з найбільших джерел забруднення довкілля (шумове та теплове забруднення є найбільш поширеними), а особливо в густонаселених мегаполісах, де скупчення автомобілів набагато вище за приміські зони.

Відомо, що на даний час основним видом автотранспорту (пасажирського або вантажного) є автомобілі з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ), джерелом енергії для яких є рідкі або газоподібні вуглеводневі палива. У зв'язку з посиленням вимог щодо збереження клімату планети та скорочення негативного впливу від викидів автотранспорту в навколишнє середовище виникає нагальна необхідність пошуку альтернативної заміни традиційних нафтопродуктів.

За результатами аналізу даних загальних викидів вуглекислого газу (CO₂) у світі, можна зробити висновок, що спостерігається тенденція збільшення вмісту даної речовини в атмосферному повітрі. Найбільш високі показники вмісту CO₂ в біосфері спостерігаються в країнах Азії, Європи та Північної Америки (рис. 1.1). У 2019 році кількість вуглекислого газу в повітрі майже досягла значення 35 тис. тонн

[4]. У зв'язку зі зростанням вмісту в атмосфері техногенного діоксиду вуглецю за рахунок спалювання викопних видів органічного палива автомобільними двигунами спостерігається посилення парникового ефекту. Внаслідок людської діяльності парниковий ефект може значно збільшитися й призвести до глобального потепління. Підвищення температури може викликати цілу низку таких явищ як підвищення рівня моря та зміни в локальних кліматичних умовах, що, в свою чергу, може негативно вплинути на соціально-економічний розвиток багатьох країн. Глобальне потепління може викликати непередбачені зміни в довкіллі. Навіть незначна зміна складових радіаційного балансу може спричинити зміни напрямків вітру та течій океану, що значно змінить існуючі кліматичні умови та може привести до непередбачених наслідків. В результаті цього населенню Землі та більшості її еко

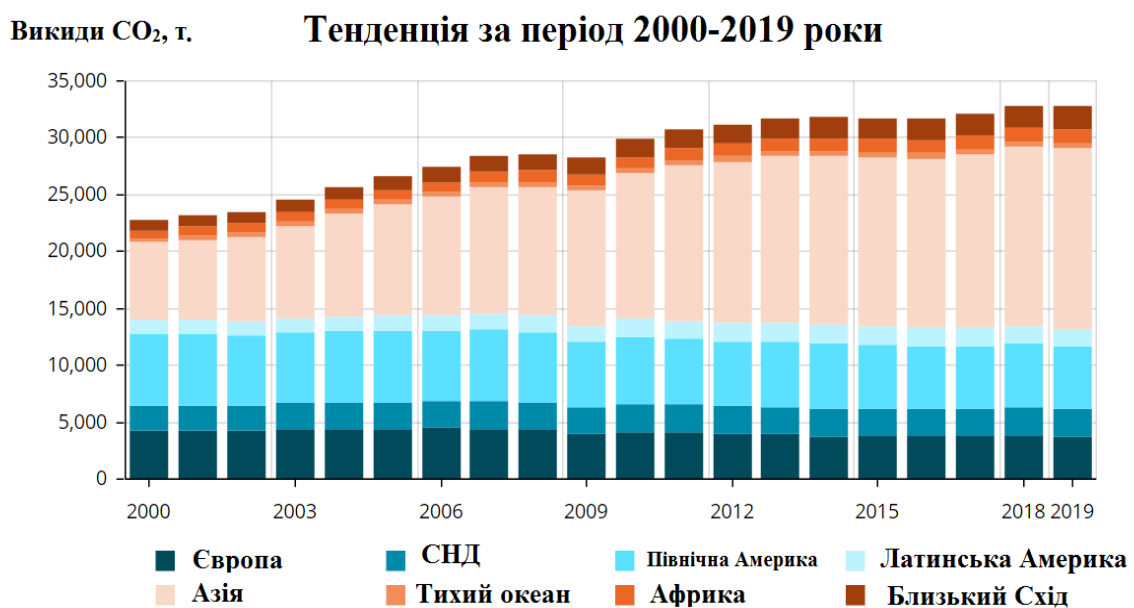


Рис. 1.1 – Динаміка викидів в атмосферу вуглекислого газу у світі за 2000-2019 роки.

Друга і, напевно, головна проблема полягає в тому, що існуючі джерела енергії обмежені. Вважається, що нафти та газу вистачить не більше ніж на 100 років, вугілля – приблизно на 400 років, ядерного палива – трохи більше ніж на 1000 років. Для того щоб мати паливо, коли на Землі будуть вичерпані запаси нафти і газу, а також з метою вирішення екологічних проблем, необхідно переходити до нових джерел енергії та мати «чисту енергетику» [5].

Світові тенденції розвитку автомобільного транспорту на перспективу найближчих десятиліть показують, що основними конкурентами масового заміщення традиційних моторних палив (бензину та дизельного палива) стають електроенергія і водень (використання водню в якості основного енергоносія та паливних елементів як генераторів електроенергії). Таким чином, скоротиться споживання викопних палив, тому що водень можна отримувати з води, розкладаючи її на водень та кисень. Енергію для даного процесу будуть надавати ядерна енергетика і поновлювані джерела.

В деяких країнах в двигунах внутрішнього згорання використовується природний газ. Також починають освоюватися технології отримання синтетичних моторних палив з природного газу, вугілля та інших палив у вигляді традиційних бензинів і дизпалива або деяких спиртів, таких як етанол, метанол та ін. Крім того, з'явилися нові технології як альтернатива ДВЗ: електромобіль та паливний елемент (ПЕ), енергоносіями для яких служать не традиційні рідкі або газоподібні вуглеводні, а інші системи отримання енергії (принцип електромагнітного поля, створюваного в електродвигуні). При цьому джерелом електроенергії в таких системах може виступати як енергосистема зі своїми електростанціями, від якої заряджається електроаккумулятор, встановлений на борту автомобіля, або індивідуальний електрохімічний генератор електроенергії (паливний елемент), розташований на борту автомобіля, який працює на водні, попередньо отриманому тим чи іншим способом. В кінцевому підсумку електромобіль та автомобіль з ПЕ мають однакове джерело рушійної сили, хоча доставка електроенергії до електромоторів досягається різними способами.

1.2. Аналіз негативного впливу на навколишнє середовище традиційних видів вуглеводневих палив

Важливість атмосферного повітря у житті людини важко переоцінити. Це джерело кисню для дихання та вуглекислого газу для процесу фотосинтезу зеленими рослинами, воно визначає кліматичні і погодні умови, є носієм світла,

тепла, вологи. Проте якість повітря з кожним роком погіршується. Зростають обсяги викидів парникових газів, токсичних речовин, що, в першу чергу, позначається на стані здоров'я людей.

Найбільша частина шкідливих речовин, що виділяються двигуном автомобіля, припадає на частку відпрацьованих газів – продукт неповного згоряння використовуваного палива, у складі яких містяться різноманітні хімічні сполуки, у тому числі і небезпечні для здоров'я людини та шкідливі для оточуючого середовища.

У структурі викидів автомобільного транспорту переважає оксид вуглецю, а також оксиди азоту та леткі органічні сполуки – по 10%. Висока концентрація транспортних засобів має вирішальний вплив на стан довкілля у містах. Токсичність відпрацьованих газів бензинових двигунів зумовлена переважанням оксидів вуглецю та азоту. А дизельних – оксидом азоту і сажі. При згорянні 1 кг бензину у повітря виділяється 300-310 г токсичних речовин, а при згорянні 1 кг дизельного палива – 80-100 г [7].

За науково-лабораторними аналізами відпрацьованих газів автомобілів встановлено, що в їх складі знаходиться майже 200 компонентів. Склад відпрацьованих газів залежить від роду застосовуваних палив, присадок і масел, режимів роботи двигуна, його технічного стану, умов руху автомобіля, тощо (таблиця 1.1) [7].

Таблиця 1.1

Склад відпрацьованих газів автомобілів, %

| Забруднююча речовина | Бензиновий двигун | Дизельний двигун |
|----------------------|-------------------|------------------|
| Вуглекислий газ | 5,0-12,0 | 1,0-10,0 |
| Діоксид вуглецю | 5,0-14,0 | 1,0-12,0 |
| Оксид вуглецю | 0,1-10,0 | 0,01-0,3 |
| Оксид азоту | 0,1-0,5 | 0,001-0,4 |
| Альдегіди | 0-0,2 | 0-0,009 |

Продовження таблиці 1.1

| | | |
|--------------------------------|------------|------------|
| Вуглеводні | 0,2-3,0 | 0,01-0,5 |
| Сірчаний газ | 0-0,002 | 0-0,03 |
| Оксид сірки | 0-0,003 | 0-0,015 |
| Свинець, мг/м ³ | 0-60,0 | - |
| Сажа, г/м ³ | 0-0,4 | 0,01-1,1 |
| Бенз(а)пірен, г/м ³ | до 0,00002 | до 0,00001 |

Усереднений вміст забруднюючих речовин у відпрацьованих газах, що викидаються автотранспортом, представлений на діаграмі (рис. 1.2) та вказує на те, що найбільшу частину викидів становить вуглекислий газ.

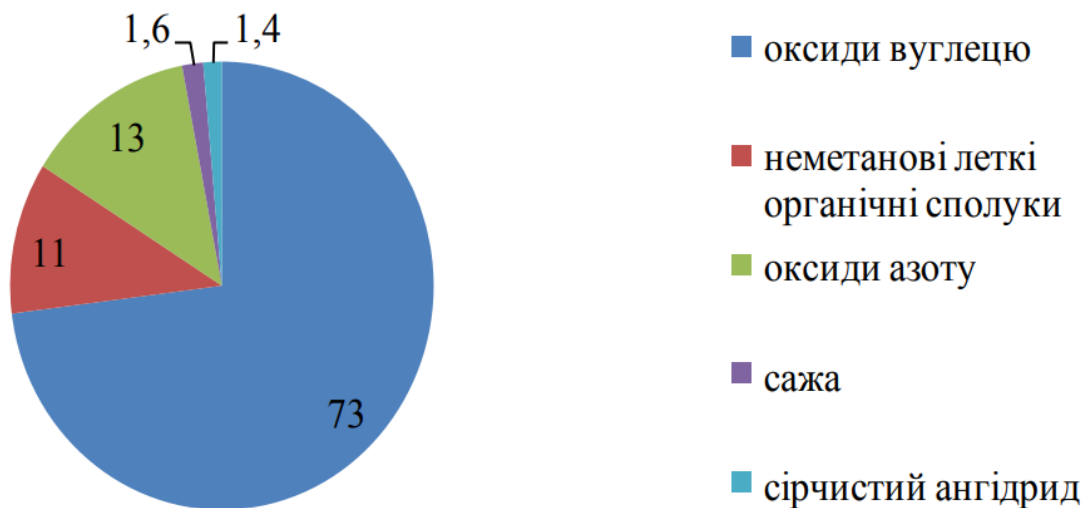


Рис. 1.2. Склад вихлопних газів, які викидаються автотранспортом

Встановлено, що більш токсичними є викиди від карбюраторних ДВЗ за рахунок більшого вмісту CO, NO_x, C_mH_n. Дизельні ДВЗ у великих кількостях викидають сажу, яка є не токсичною у чистому вигляді, але її частки, володіючи високою адсорбційною активністю, несуть на своїй поверхні токсичні речовини, у тому числі канцерогенні. Сажа має здатність тривалий час знаходитися в зваженому

стані в повітрі, тобто час впливу токсикантів на людину збільшується. Застосування етилованого бензину призводить до потрапляння в довкілля свинцю (75% бензину – етилований бензин, який містить від 0,15 до 0,5 г Рb/л), що є отрутою кумулятивної дії. Автомобіль, який працює на етильованому бензині викидає 30-540 мг діоксинів у діоксиновому еквіваленті на кожен кілометр пройденого шляху. Близько 70% Рb, доданого в пальне, потрапляє в атмосферу. З них 30% осідає на землю відразу за зрізом вихлопної труби, 40% залишається в повітрі [8].

Випаровуваність палива визначається складом. При полегшенні палива погіршується пуск дизелів, так як легкі фракції мають гіршу в порівнянні з важкими фракціями самозаймистість. Тому пускові властивості дизельних палив для автомобілів в деякій мірі визначає температура википання 50% палива. Температура википання 96% палива регламентує вміст у паливі найбільш важких фракцій, збільшення яких погіршує сумішоутворення, знижує економічність, підвищує нагароутворення та димність відпрацьованих газів.

У результаті окиснення під дією сонячних променів окремих компонентів відпрацьованих газів автомобільних двигунів, пари бензину та інших речовин, утворюється фотохімічний смог, який призводить до ушкодження посівів сільськогосподарських культур, лісових насаджень, а також сприяє корозії металів тощо. Слід зазначити, що кількість загальних викидів автотранспорту залежить від стану дорожнього покриття та організації руху транспортних засобів. У випадку інтенсивного руху на 100-200 метрів від краю проїжджої частини ґрунт стає непридатним для вирощування сільськогосподарських культур. Нафтопродукти потрапляють у навколишнє середовище від автомобілів також внаслідок підтікання мастил від агрегатів та від зовнішньої мийки автомобілів.

Найбільшу шкоду завдає автомобільна дорога флорі та фауні, внаслідок перетину шляхів міграції та місць проживання тварин, територій та об'єктів природно-заповідного фонду. Зона впливу автомобільної дороги поширюється на відстань до 3 км від краю проїжджої частини в залежності від інтенсивності дорожнього руху, складу транспортних засобів, а також від метеорологічних, кліматичних та топографічних умов місцевості.

Визначено, що автотранспорт впливає на екосистеми наступним чином:

- Забруднення токсичними викидами атмосфери, ґрунтів та водних об'єктів, змінюється хімічний склад ґрунтів і мікрофлори, утворюються виробничі відходи. Також забруднювальні речовини, окрім шкідливого впливу на навколишнє середовище, негативно впливають на створені людиною об'єкти: історичні архітектурні та скульптурні пам'ятники та інші витвори мистецтва (викликають корозію металів, псування шкіряних та текстильних виробів);
- виділення теплової енергії у навколишнє середовище під час роботи ДВЗ та установок, в яких спалюють паливо;
- створення високого рівня шуму та вібрації [9-10].

1.3 Світовий досвід використання водневої енергетики на транспорті

Водень може використовуватися у двигунах внутрішнього згорання (ДВЗ) за кількома напрямками. Найвідоміший з них – це спалювання водню, подібно до газового палива, у звичайних ДВЗ. Причому модифікація двигунів для роботи на водневому паливі мало відрізняється від уже відомого переходу їх на стиснений природний або зріджений нафтовий газ. Зазначимо, що в цьому разі збільшення маси автомобіля дає лише воднева паливна система, тоді як у автомобіля на паливних комірках (ПК) приріст маси (ПК, паливна система, електромотори, перетворювачі струму, потужні акумулятори) істотно перевищує «економію» від видалення ДВЗ і його механічної трансмісії. Втрата корисного простору в автомобілі з водневим ДВЗ менша, хоча водневий бак є і в тому, і в іншому варіантах. Водень також характеризується набагато ширшим порівняно з бензином діапазоном пропорцій змішування його з повітрям, коли ще можливий процес горіння суміші. Водень згоряє повніше, навіть поблизу стінок циліндра, де у бензинових двигунах зазвичай залишається незгоріла робоча суміш.

Наприклад, автомобільні фірми «BMW» і «Мазда» запропонували поступовий перехід автотранспорту (гібридна схема) на водень. Такі автомобілі можуть водночас використовувати і водень, і бензин. Ближче всіх до серійного виробництва

паливні системи з баками, у яких водень зберігається у газоподібному стані під високим тиском (30-35 МПа) або в рідкому стані – за порівняно невисокого тиску, але низької температури (-253 °С). У першому випадку потрібен балон, розрахований на високий тиск, а в другому – надійна теплоізоляція [11].

Перший варіант менш безпечний, однак у такому баку водень може зберігатися досить довго. У другому випадку безпека вища, але у разі збільшення тиску у баку запобіжний клапан почне стравлювати водень до навколишньої атмосфери. Фірма «Mazda» вибрала варіант із баком високого тиску, а «BMW» – з рідким воднем. «BMW» обрала оригінальну систему зберігання: коли автомобіль експлуатується, то з навколишнього середовища виробляється скраплене повітря й прокачується у проміжок між стінками водневого бака та зовнішньою теплоізоляцією.

Важливим питанням є спосіб надходження палива у двигун. Пропонується впорскування газоподібного водню у впускні колектори перед клапанами. Автомобілі «BMW» з восьмициліндровим двигуном розвивають потужність на водні 184 к.с. і здатні пройти 300 км на 170 л водню і ще 650 км – на бензині (в автомобілі стандартний бак). Фірма «Мазда» використовує роторний двопаливний двигун, де не може статися випадкового передчасного запалення водню від «зустрічного вогню», і форсунки для впорскування працюють у завжди сприятливій зоні мотора.

Перспективними споживачами водню на транспорті вважаються паливні комірки. Сьогодні вже створено кілька типів автомобілів, які працюють на ПК. Так, фірма Даймлер-Крайслер провела успішні шляхові випробовування автомобіля NECAR-5, що має такі характеристики, як тривалість дії двигуна внутрішнього згоряння з низькою витратою палива, низький рівень шуму та безпечний для навколишнього середовища вихлоп. У цій моделі використано ПК, принцип дії якої ґрунтується на реакції окиснення водню на мембранному каталізаторі з утворенням води і генеруванням електричного струму.

До анода ПК підводиться водень, а до катода – кисень із повітря. Роль електроліту між ними виконує мембрана, що забезпечує перенесення протонів. Мембрану виготовлено з протонопровідного полімеру, покритого тонким шаром

благородного металу. Гази подають під тиском в 1,5-2,7 атм. За оцінками фірми, масовий випуск автомобілів цього класу планується через 10 років.

Фірми «Ford» та «Mitsubishi» створили комбіновані моделі, які поєднують традиційний двигун із двигуном нового покоління, що працює на ПК. Для отримання водню використовують прямогінний бензин.

Перспективними є також спирти (метиловий, етиловий), що безпосередньо на борту автомобіля переводяться у газ (H_2, CO_2), збагачений воднем. При цьому як побічний продукт утворюється CO . Цей оксид, який є не тільки токсичною сполукою, а й отрутою для каталізаторів ПК, нейтралізують у блоці газового очищення шляхом його селективного окиснення. Оскільки в газовій суміші за великого вмісту водню концентрація CO досить мала (до 0,5%), то каталізатори, які використовуються для очищення водню, в цьому процесі мають характеризуватися високою активністю та селективністю.

Отже, розробка високоефективних каталізаторів очищення водню від CO є найважливішою проблемою сучасного каталізу при створенні ПК для екологічно чистого автомобіля. Нанесені на тверді носії каталізатори – благородні метали (Au, Pt, Rh тощо) та їхні сполуки (наприклад, кластери і нанокластери металів Au, Pt, Pd) – пропонуються як найперспективніші для реакції селективного окиснення CO . Розв'язання проблеми одержання чистого водню є важливим кроком сучасної хімії у реалізації однієї зі складних стадій технологічного ланцюжка – створення екологічно чистого автомобіля нового покоління.

1.4 Екологічні показники водневої енергетики

Водневі паливні елементи широко рекламують як екологічно чисту альтернативу, звичайному викопному паливі. Окислюючи молекулярний водень, єдиним прямим побічним продуктом їх виробництва є вода, а це означає, що вони можуть значно зменшити забруднення та техногенні парникові газы. Але група дослідників із США вважає, що паливні елементи самі по собі можуть згубно впливати на навколишнє середовище. Трейсі Тромп та його колеги з

Каліфорнійського технологічного інституту використали моделі атмосфери, щоб показати, що неминучі викиди, що виробляються технологією паливних елементів, можуть суттєво пошкодити озоновий шар (Т. Tromp et al. 2003 Science 300 1740) [12].

Повністю ефективна система виробництва, зберігання та транспортування водню в принципі не повинна призвести до небажаних викидів газу. Але дослідники Caltech зазначають, що така система буде дорогою, і що насправді близько 10-20% водню буде виходити в атмосферу. Вони кажуть, що якби водневі паливні елементи замінили всі сучасні технології згоряння на основі нафти та газу, такі втрати подвоїли б або навіть потроїли загальний водень, що осідає в атмосфері на поверхні Землі [13].

Тромп та його колеги зазначають, що водень буде окислюватися, потрапляючи до стратосфери, що охолоджує стратосферу та створює більше хмар. Це затримало б розпад полярного вихору на північному та південному полюсах, зробивши діри в озоновому шарі більшими та довговічнішими. За їхніми оцінками, надлишок водню призведе до 5-8% зростання викиду озону на північному полюсі та від 3 до 7% на південному полюсі. Однак точний масштаб цього додаткового руйнування озону залежить від ряду невідомих величин. На додаток до невизначеності щодо масштабів викидів водню в майбутньому, мало що зрозуміло про те, як ґрунт поглинає водень з атмосфери. Дослідники кажуть, що цілком можливо, що цей процес може компенсувати всі нові антропогенні викиди [14].

Україна також серед тих країн, що прагнуть здійснити енергетичний перехід до 2050 року. Відповідну концепцію Міністерство екології та захисту довкілля оприлюднило у грудні цього року. Є у ній згадка і про водень. Однак було би доцільно розглядати водень як магістральний напрям енергетичного переходу для країни. Для нас водень – це перспектива економічного зростання, здобуття енергетичної незалежності та водночас побудови "зеленого" майбутнього. Разом із Українською водневою радою було зроблено дослідження про потенціал відновлюваних джерел енергії в Україні, цифра дуже велика. Потенціал вітру і сонця близько 800 гігават. Це у 18 разів більше, ніж споживає Україна, і це можна

перевести в 500 млрд кубометрів водню", — заявив під час прес-конференції "Енергетичний перехід: роль водневих технологій і рішення кліматичних проблем" у лютому цього року директор Інституту відновлюваної енергетики НАН, професор Степан Кудря [14].

Він зауважив, що мова не лише про енергетику, накопичувачі і балансування. Решту можна інтегрувати в транспорт, металургію, домашнє господарство. За прогнозами фахівців НЕК "Укренерго", до кінця 2020 року встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики у країні зросте мінімум до 7,4 ГВт, а в 2030-му – до 11,2 ГВт. Згідно із Концепцією "зеленого" енергетичного переходу України, нам "цілком під силу та економічно доцільно до 2050 року досягнути 70% частки ВДЕ у виробництві електроенергії". І це без врахування такої перспективної технології виробництва чистого водню, як газифікація біомаси. Хоча зараз вироблений таким шляхом водень не прийнято називати "зеленим", цей спосіб є екологічним, до того ж, вирішує проблему накопичення транспортних відходів [15].

1.5. Проблеми видобутку водневого палива у промислових масштабах

Серед альтернативних палив при сучасному рівні знань найбільш перспективним є водень, який має великі потенційні можливості використання. Він вносить значний вклад у вирішення трьох найбільш важливих завдань, що стосуються використання енергії: зниження емісії парникових газів, підвищення енергетичної безпеки та зниження забруднення повітря.

Водень є найпоширенішим елементом у Всесвіті (93% (ат.) і одним з найпоширеніших на Землі (15,52% (ат.%)). Основним джерелом водню на Землі є вода і органічні сполуки, включаючи нафту, природний газ і біомасу [1]. Він є в надлишку і поширений у світі без урахування національних кордонів.

У природі водень у вільному стані не зустрічається і, таким чином, не є прямим джерелом енергії, а подібно електрики, є енергоносієм. Але на відміну від електрики, яка є носієм електронів, водень є джерелом хімічної енергії і потенційно більш ефективний як засіб накопичення енергії, особливо при

використанні в енергосистемах з відновлюваною енергією, таких як енергія сонця і вітру.

Ні використання водню як енергоносія, ні розгляд водневої енергетики не є новими. Аж до 1960-х рр. водень використовувався в багатьох країнах у формі побутового газу для освітлення вулиць, а також для домашніх потреб (приготування їжі, обігрів і освітлення приміщень). До сих пір велика частина одержуваного водню використовується в хімічній (гідрокрекінг сирової нафти) і харчовій (гідрування рослинних масел) промисловостях, а також в ряді інших галузей, що засновано на здатності водню вступати при підвищених температурах в каталітичні реакції гідрування.

Відновлювальні властивості водню використовуються в хімічній технології, порошковій металургії, машинобудуванні, мікроелектроніці. Завдяки тому, що серед усіх відомих газів водень має найвищу теплопровідність ($0,182 \text{ Вт}\cdot\text{м} / \text{К}$ при кімнатній температурі і атмосферному тиску) і саму низьку в'язкість (коефіцієнт динамічної в'язкості газоподібного H_2 в тих же умовах становить $8,92 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$), він ефективно застосовується для зменшення тертя в рухомих частинах установок (наприклад, в турбогенераторах в тепловій і атомній енергетиці) [17].

Особливий інтерес водень викликає як багатообіцяюче паливо майбутнього, так як є найлегшим паливом з найбільшою енергією на одиницю маси (табл. 1.2), яке легко може бути перетворене в хімічну, механічну або електричну енергію.

Теплота згоряння різних палив [18]

| Паливо | Енергія, ккал/г |
|----------|-----------------|
| Водень | 34,0 |
| Нафта | 10,3-8,4 |
| Вугілля | 7,8 |
| Кетамін | 9,4 |
| Деревина | 4,2 |

До теперішнього часу в світі склалася думка, що завдяки необмеженості ресурсів, високою енергонасиченістю, технологічною гнучкістю та екологічною чистотою процесів перетворення енергії за участю водню його слід розглядати як найбільш перспективний енергоносіє майбутнього [19].

Хоча водень є одним з найбільш поширених елементів у світі, в вільному стані він майже не зустрічається (в атмосфері він присутній в концентраціях менше однієї частини на мільйон). В основному водень знаходиться в зв'язаному стані у формі хімічних сполук, тому для широкомасштабного застосування він повинен бути витягнутий з них. Оскільки в процесах вилучення споживається значна кількість енергії, то водень слід розглядати не як джерело енергії, а як енергоносіє. Крім того, в найближчому майбутньому він може стати середовищем для зберігання енергії, зокрема, електроенергії [3]. Одна з його переваг заснована на тому, що майже будь-яке джерело енергії може бути конвертоване у водень [3], даючи можливість його виробництва для локального використання в різних регіонах Землі.

В даний час загальна щорічне виробництво водню в світі становить близько 368.1012 м³ (за станом на 2018 р) [3]. З цієї кількості близько 40% використовується в хімічній промисловості, 40% - на нафтопереробних заводах,

а решта 20% - в різноманітних процесах, включаючи і використання водню як енергоносія [3].

Слід зазначити, що тільки 62% водню виробляється як цільовий продукт, інші 38% є побічним продуктом інших виробництв (нафтопереробка, коксохімія і т.п.). До таких належить майже весь електролітичний водень, одержуваний в даний час при виробництві хлору і каустичної соди [1].

З виробленого в даний час значного обсягу водню тільки 5% є комерційним продуктом. Як правило, великі споживачі водню самі виробляють його для власних потреб [4], що обумовлено економічними факторами (високі ціни на товарний водень), а також технологічними труднощами, пов'язаними зі зберіганням і транспортуванням великих кількостей водню.

Розробка ефективних, економічно вигідних, конкурентноспроможних і безпечних технологій виробництва водню є основою майбутнього водневої енергетики. Вибір методів виробництва водню буде залежати від наявності промислової сировини або ресурсів, а також необхідної якості та чистоти виготовленого продукту.

В даний час існує багато методів промислового виробництва водню, що є одним з головних переваг водневої енергетики, так як підвищує енергетичну безпеку і знижує залежність від окремих видів викопної сировини.

Існуючі в даний час технології виробництва водню поділяються на три категорії [18]:

- термохімічні процеси;
- електролітичні процеси;
- фотолітичні процеси.

До термохімічних процесів виробництва водню відносяться:

- паровий риформінг природного газу;
- часткове окислення метану;
- газифікація вугілля і біомаси.

До електролітичних процесів виробництва водню відносяться:

- електроліз води;

- оборотні паливні елементи / електролізери.

До фотолітичних процесів виробництва водню відносяться:

- фотоелектроліз;
- фотобіологічні процеси.

Сьогодні паровий риформінг природного газу, газифікація вугілля і електроліз води є добре відпрацьованими технологіями виробництва водню і використовуються в промислових масштабах. У 2005 р 48% світового попиту на водень задовольнялося за рахунок парового риформінгу природного газу, близько 30% - риформінгу газів, що відходять до нафтохімічної промисловості, 18% - газифікації вугілля, 3,9% - електролізу води і 0,1% за рахунок інших джерел [20].

Основною технологією виробництва водню в світі в даний час є паровий риформінг природного газу (конверсія природного газу (головним чином) при впливі різних окислювачів (CO_2 , H_2O , O_2 , повітря та їх суміші) з утворенням продукту з високим вмістом H_2 і CO) [21]. За даної технології отримують близько 85% виробленого в світі (в США - 95%) водню, що обумовлено досить високою ефективністю процесу, прийнятною вартістю і налагодженою інфраструктурою транспортування вихідної сировини.

Вартість водню, отриманого паровим риформінгом природного газу, є найнижчою, порівняно з іншими методами виготовлення та істотно знижується в міру збільшення продуктивності риформера від 1,3 дол. / кг H_2 для порівняно малих промислових установок потужністю 270 тис.м³ H_2 / добу до 0,66 цента / кг H_2 для великих (потужністю 7-25 млн м³ H_2 / добу) [22].

Основним недоліком отримання водню з природного газу є залежність від поставок сировини, запаси якої розподілені між декількома регіонами (Ближній Схід - 40,8%, Росія -26,7%, Іран - 15,2%, Катар - 14,7%).

Серйозну проблему становлять і викиди в атмосферу великих кількостей CO_2 , утилізація якого вимагає значних капітальних витрат і експлуатаційних витрат, що істотно підвищує вартість водню.

Крім того, метод парової конверсії природного газу погано адаптується на установки малої продуктивності для децентралізованого виробництва водню (наприклад, заправних станцій, автономних енергосистем і т.п.). Ще одним недоліком цього методу є наявність у водні домішок CO, що висуває додаткові вимоги до його очищення, особливо при використанні в ТЕ.

Згідно з прогнозами фахівців, цей метод отримання водню буде використовуватися на початковій стадії переходу до водневої енергетики, що спростить вирішення проблеми, коли через відсутність інфраструктури немає попиту на «водневі» автомобілі, а при відсутності останніх не створюється інфраструктура [23].

Другим комерційним методом для виробництва водню з вуглеводнів є часткове окислення. Метан або деякі інші вуглеводневі копалини (наприклад, нафта) окислюються киснем з утворенням CO і H₂.

Реактор часткового окислення більш компактний, ніж паровий риформер, а його ККД відносно високий (70-80%) [23]. Хоча сам реактор часткового окислення дешевший, ніж паровий риформер, але робочий реактор і системи очищення водню дорожчі. З цієї причини при використанні даного методу для постійного виробництва водню потрібна розробка дешевих технологій його очищення [24-25].

Метод авто термального риформінгу є поєднанням парового риформінгу і часткового окислення природного газу. Температура на виході з реактора знаходиться в області 950-1100°C, а тиск газів може досягати більше 100 МПа. На відміну від парового, автотермальний риформінг не вимагає підведення тепла, оскільки реакція екзотермічна, що дозволяє спростити і здешевити автотермальні риформери.

Однак необхідність очищення вихідних газів все ж збільшує вартість виробництва водню і знижує ККД до 65-75% [26].

Слід зазначити, що з точки зору екології отримання водню з природної вуглеводневої сировини мало чим відрізняється від його безпосереднього спалювання. Якщо в останньому випадку шкідливі викиди в атмосферу

з'являються на стадії використання палива, то в першому отримують ті ж викиди, але на стадії виробництва водню. Тому основними складовими нових технологій виробництва водню з природних копалин є процеси уловлювання супутніх газів, в першу чергу CO₂. У цьому плані перспективним представляється отримання водню парогазової конверсією вугілля.

Водень можна отримувати з вугілля з допомогою різних процесів газифікації (наприклад, в нерухомому, рідкому шарі або газифікацією в потоці). На практиці переважають високотемпературні процеси газифікації в потоці, оскільки максимально збільшують перетворення вугілля в газ і, таким чином, дозволяють уникнути утворення значної кількості легкозаймистого залишку смоли і фенолів [27].

Дослідженню процесів отримання водню з твердих палив в даний час приділяється значна увага у всьому світі, оскільки запаси вугілля величезні (за даними корпорації British Petroleum, в 2018 р вони становили 826 млрд.т, в тому числі в Україні 339 млрд.т [29]) і знаходяться в багатьох частинах світу.

Наприклад, в США розробляється національна програма "Водень з вугілля", в якій зазначено, що впровадження водневих енерготехнологій в промисловість є прямим шляхом до скорочення емісії парникових газів в навколишнє середовище і збільшення енергетичної ефективності та екологічної чистоти промислового виробництва [28].

В даний час водень може бути отриманий парогазовою конверсією вугілля при вартості поставки 2-2,5 дол. / кг зі зниженням її до 1,5 дол. / кг в майбутньому

Водень може бути отриманий також розщепленням води за допомогою таких процесів [10]:

- електроліз;
- фотоелектроліз;
- високотемпературне розкладання;
- фотобіологічні методи.

В даний час найбільш перспективною технологією отримання водню є стандартний електроліз, який розкладає воду на її складові - водень і кисень.

Втрати електроенергії в процесі отримання водню електролізом води щодо помірні - ККД електролізерів середніх розмірів становить 65%, а великих - 80-85%.

Вартість одержуваного електролізом водню залежить від типу електролізера (і відповідно, від його ККД та капітальних витрат), а також від вартості спожитої електроенергії, яка вносить основний вклад (70-90%) в вартість електролітичного водню [29]. На відміну від методу отримання водню з природного газу, з ростом продуктивності електролізної установки ціна одержуваного водню істотно не знижується і основним фактором, що визначає конкурентоспроможність електролізера, є ефективність його роботи (ККД). У той же час при наявності дешевої електроенергії (наприклад, в «провальні» періоди її споживання) електролітичне отримання водню може стати рентабельним [30]. Нині ж цей метод використовується тільки на невеликих заводах, які виробляють 4000 м³/год з вартістю виготовлення 2,4-3,6 дол. / Кг H₂.

Вважають, що висока вартість електролітичного водню обмежить його вихід на ринки в найближчий і середній періоди.

Основна увага в сучасних розробках технологій отримання водню електролізом води слід направити на пошук нових електродних матеріалів і електролітів, які здатні підвищувати ефективність процесу за рахунок зниження енерговитрат. Серед таких матеріалів особливо перспективними є наноструктуровані електродні матеріали та каталізатори.

Як зазначалося раніше, основною проблемою при виробництві водню з води стандартним електролізом є висока вартість використовуваної електроенергії, тому необхідно розробляти такі технології генерування електроенергії, які дозволили б знизити її вартість, а, отже, і вартість отриманого водню. До таких технологій відносяться, в першу чергу, технології генерування електрики з альтернативних джерел енергії - сонця, вітру,

гідротермальної енергії та ін. Особливо перспективним є застосування сонячної енергії, що дозволить отримувати електрику і водень з повністю поновлюваних джерел - води і сонця.

«Сонячний» водень не є енергією, але є хімічним енергоносієм, який робить можливим вільне від втрат зберігання і транспортування з низькими втратами макроекономічно важливих кількостей вторинної енергії - теплоти і електрики. «Сонячний» водень відкриває можливість для сонячної енергії стати предметом торгівлі на світових енергетичних ринках.

Кількість сонячної енергії на Землі достатня, щоб постачати людству в тисячі разів більше енергії, ніж потрібно. Однак поставки цієї енергії або непостійні, або нерівномірно розподілені на земній кулі.

Сонячна енергія, накопичена в водні, є в наявності в будь-який час і в будь-якому місці на Землі, незважаючи на те, коли і де було перетворено сонячне випромінювання в енергію. «Сонячний» водень робить сонячну енергію, що зберігається і транспортується, але без негативного впливу на навколишнє середовище. Він поєднує переваги вуглеводнів (можливість зберігання та транспортування) з перевагами сонячної енергії (екологічна прийнятність, відновлюваність і низький ризик) і є сполучною ланкою між допромисловою сонячною ерою, першої сонячної цивілізацією, яка використовувала накопичену сонячну енергію в формі біомаси та гідроенергетики, і ерою після природних копалин - другою сонячною цивілізацією, що має в своїй основі водень як головне джерело енергії.

Серед способів отримання водню з використанням ядерної енергії найбільш перспективною для великомасштабного виробництва є термічна конверсія води. Вважають, що вартість поставки одержуваного цим способом водню складе 2,33 у.о./кг [30].

У промислових масштабах в даний час використовуються тільки парова конверсія природного газу, газифікація вугілля і електроліз води. Парова конверсія природного газу є найдешевшим методом і серед усіх інших методів виробництва водню з викопних палив має найнижче виділення CO₂. Електроліз

води є більш дорогим процесом і застосовується тільки для отримання водню високої чистоти. При передбачуваному збільшенні вартості природного газу газифікація вугілля стане альтернативним методом виробництва водню приблизно з 2030 р. Газифікація і піроліз біомаси для отримання водню в даний час все ще знаходяться на стадії досліджень і розробок, але очікують, що в найближче десятиліття ці технології стануть альтернативними технологіями для поставок водню з поновлюваних ресурсів.

Згідно з довгостроковим прогнозом International Energy Agency (IEA) (табл. 1.3), водень, отриманий газифікацією біомаси, стане цілком конкурентоспроможним за вартістю з воднем, отриманим з викопної сировини з поглинанням і відновленням вуглецю, і з найнижчою вартістю серед всіх методів отримання водню з поновлюваних джерел.

Газифікація біомаси відкриває найлегший і найбільш економічно вигідний шлях для виробництва поновлюваного водню. Вважають, що ця технологія в майбутньому стане домінуючою [31].

Отримання водню за допомогою поновлюваних джерел енергії (вітрової, сонячної, гідротермальної та ін.) є економічно вигідним в країнах з великими ресурсами відновлюваної енергії на базі або за відсутності природних копалин, для віддалених і малонаселених регіонів (наприклад, островів) або для накопичення надлишку електроенергії від переривчастої відновлюваної енергії.

Безсумнівно, що у віддаленому майбутньому водень потрібно проводити за допомогою процесів, що виключають або з мінімальними викидами CO₂. Поновлюваний водень, виготовлений електролізом із застосуванням електроенергії, генерується за допомогою сонця, вітру, гідротермальної енергії та ін., є максимальним варіантом, але не обов'язковою умовою для введення водню як енергоносія.

Таблиця 1.3. Вартість водню, отриманого різними методами, застосовується в довгостроковому прогнозі ІЕА [30].

Таблиця 1.3.

| Метод отримання водню | Ціна сировини (цент/долар) | Вартість сировини, у.о../ГДж H ₂ | Виробничі витрати, у.о../ГДж H ₂ | Транспортування, у.о../ГДж H ₂ | Заправка, у.о../ГДж H ₂ | Загальна вартість у.о../ГДж H ₂ |
|---|----------------------------|---|---|---|------------------------------------|--|
| Конверсія природного газу з CCS | 3-5 у.о./ГДж | 3,8-6,3 | 1,2-2,7 | 2 | 5-7 | 12-18 |
| Газифікація вугілля з CCS | 1-2 у.о./ГДж | 1,3-2,7 | 4,7-6,3 | 2 | 5-7 | 13-18 |
| Газифікація біомаси | 2-5 у.о./ГДж | 2,9-7,1 | 5-6 | 2-5 | 5-7 | 14-25 |
| Електроліз за допомогою енергії вітру з моря | 3-4 у.о /г | 9,8-13,1 | 5 | 2-5 | 5-7 | 22-30 |
| Електроліз за допомогою енергії вітру з берега | 4-5,5 у.о /г | 13,1-18,0 | 5 | 2-5 | 5-7 | 27-37 |
| Електроліз за допомогою сонячної та термічної енергії | 6-8 у.о /г | 19,6-26,1 | 5 | 2-5 | 5-7 | 32-42 |
| Електроліз за допомогою енергії сонячних батарей | 12-20 у.о /г | 39,2-65,4 | 5 | 2-5 | 5-7 | 52-82 |
| Електроліз за допомогою ядерної енергії | 2,5-3,5 у.о /ч | 8,2-11,4 | 5 | 2 | 5-7 | 20-27 |

Примітка: CCS - поглинання та консервування CO².

До тих пір, поки буде досягнута ця мета, водень з природних копалин буде переважати, але уловлювання та консервування CO₂ стає обов'язковою умовою, особливо з точки зору екологічної безпеки. У цей період питомі витрати на виробництво водню з використанням поновлюваних ресурсів (за винятком біомаси), очевидно, не конкуруватимуть з більшістю інших альтернативних методів [33].

1.6. Висновки до розділу

В умовах зростаючого світового попиту на енергетичні ресурси, вичерпання викопних видів палива та зростаючого рівня забруднення довкілля необхідним є ефективний пошук нових (альтернативних) енергетичних технологій, які б забезпечували прийнятний рівень забруднення і одночасно сприяли економічному зростанню країни.

Визначено, що наземний транспорт є одним із найбільших забруднювачів атмосферного повітря у світі. До основних та перспективних напрямків зниження обсягів викидів шкідливих речовин у атмосферне повітря слід віднести використання альтернативних джерела енергії, зокрема водню. Водень – штучне паливо, яке у чистому вигляді в природі відсутнє. Сировиною для виробництва водню можуть бути метан, інші вуглеводневі гази, нафта, вугілля, біопалива. Встановлено, що теплотворна спроможність водню у 3,2 рази менша за теплотворну спроможність природного газу. Він має набагато ширші межі запалювання та більшу швидкість розповсюдження полум'я у порівнянні з природним газом, характеризується високою проникністю та призводить до водневої корозії металів. Системи транспортування водню потребують спеціального проектування, а використання його як палива – особливих заходів безпеки.

Водень можна вважати паливом майбутнього. У багатьох країнах світу дослідження з водневої енергетики є пріоритетними напрямками розвитку науки. Вони забезпечуються фінансовою підтримкою і держави, і бізнесових структур. Основною метою розвитку водневих технологій є зниження залежності від традиційних енергоносіїв – нафти, газу і вугілля. Ключовою умовою переходу до водневої енергетики є пошук і створення надійних та економічно доцільних паливних елементів на основі водню. Воднева енергетика є саме таким напрямом, який завдяки високій технологічності та наукоємкості дозволить вийти на рівень розробок енергоефективних та екологічно чистих технологій майбутньо.

РОЗДІЛ 2

ОСОБЛИВОСТІ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА ТА ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТУ

2.1. Переваги використання водню у якості палива для наземного транспорту.

У цивільній авіації паливні елементи, що працюють на водні, розглядаються як потенційні постачальники енергії для літаків, оскільки вони вже деякий час подорожують у космосі, тому що на них літають деякі космічні кораблі. Таким чином, модулі паливних елементів можуть подавати електроенергію до електричної системи літака як аварійні генераторні установки або як допоміжний енергоблок. Оскільки паливні елементи виробляють електроенергію ефективніше, ніж авіаційні двигуни, у наземних операціях авіаційне паливо можна економити та зменшити викиди. Крім того, багатофункціональні паливні елементи можуть сприяти подачі води, зволоженню повітря та інертуванню палива [34].

Зовсім недавно електричну авіацію підсилив ряд невеликих демонстраційних літаків розміром безпілотних безпілотників, мотопланерів або малих спортивних літаків масою до 1,5 т (2015). Ці мініатюрні та малі гвинтові літаки були оснащені паливними елементами та літєвими батареями для приводу. Створені на замовлення електричні літаки змогли продемонструвати базову можливість використання паливних елементів, що працюють на водні, під час польотних операцій на короткі відстані. В авіації під наземним обслуговуванням, від англійської «aircraft ground handling» розуміють процедури догляду за повітряним судном під час перебування на землі як біля виходу аеропорту, так і на окремих його стоянках. Згідно ДАСУ (Державної авіаційної служби України) під наземним авіазабезпеченням розуміють комплекс прильотів, вильотів, переміщення, стоянки та обслуговування аеропортів, обслуговування пасажирів, екіпажів, багажу, пошти, вантажів та забезпечення авіаційних робіт [35].

Більшість авіакомпаній укладають договори наземного обслуговування (хелдінгу) безпосередньо з аеропорту, хендлінговими агентами. За найскромнішими оцінками експертів, авіакомпанії IATA здійснюють понад 50% всіх аутосорсингових операцій наземного обслуговування по всьому світу. Наземне обслуговування накладає значні вимоги до послуг у проміжок часу між прибуттям до гейту та часом відправлення. Оперативність, ефективність та пунктуальність важливі в наземному обслуговуванні, так як зменшують тривалість циклу обслуговування в аеропорту. Чим коротша операція хендлінгу, тим менш витратна. Сюди входить обслуговування салону, харчування, перонний сервіс. Особливо актуальним є перонний сервіс, який передбачає розвантаження багажу, заправка паливом, буксирування, живлення, злив санітарних стоків. Наземне обслуговування перонного сервісу включає:

- супровід повітряного судна на та з місця його стоянки (маршилінг);
- буксирування;
- евакуація санітарних стоків;
- заправлення технічною водою (непитна для туалетів);
- кондиціонування;
- запускання двигунів;
- розвантаження багажу на транспортерах та візках;
- доставка багажу по терміналу;
- обробка харчових вантажів;
- заправлення паливом;
- наземне електропостачання;
- пасажирські сходи або телетрап;
- підйомники для інвалідних візків;
- зовнішнє для інвалідних візків;
- зовнішнє гідравлічне живлення [36].

Інноваційні нововведення водневого палива має ряд своїх переваг у публічних місяцях, оскільки він має не шкідливі продукти розпаду. У кожному випадку водень поєднується з киснем, утворюючи воду. Це також є однією з

найважливіших його переваг, оскільки водневе паливо є екологічно чистим, що є дуже важливим а авіаційній системі, де є багато людей. Тепло у водневому полум'ї - це променисте випромінювання від новоутворених молекул води. Молекули води перебувають у збудженому стані при початковому формуванні, а потім переходять у основний стан; цей перехід, що виділяє теплове випромінювання. При згорянні на повітрі температура становить приблизно 2000 ° С (така ж, як і природний газ). Історично вуглець був найбільш практичним носієм енергії, оскільки водень і вуглець у поєднанні є більш об'ємно щільними, хоча сам водень має втричі більшу щільність енергії за масу як метан або бензин. Хоча водень є найлегшим елементом і, отже, має трохи вищу схильність до витікання з труб із природного газу, таких як із заліза, протікання з пластикових (поліетиленових PE100) труб буде дуже низьким - приблизно 0,001% [36].

Перехід транспорту, промисловості, побуту на спалювання водню - це шлях до радикального вирішення проблеми охорони повітряного басейну від забруднення оксидами вуглецю, азоту, сірки, вуглеводнями. Перехід на водневу технологію та використання води в якості єдиного джерела сировини для отримання водню може змінити не тільки водний баланс планети, але і водний баланс окремих її регіонів. Так, річна потреба енергетики такої високо-індустріальної країни, як Німеччина, може бути забезпечена за рахунок водню, отриманого з такої кількості води, яка відповідає 1,5% середнього стоку річки Рейн. Відзначимо попутно, що на наших очах стає реальною одна з геніальних здогадок великого фантаста Жуля Верна, який устами героя роману «Таємничий острів» (глава XVII) заявляє: «Вода - це вугілля майбутніх століть» [33].

Можливість використання водню як моторного палива розглядалася ще на самому початку XIX століття. Тоді франко-швейцарський винахідник де Риваз побудував перший прототип такого двигуна і навіть встановив його на праобраз автомобіля. Проте поступово про цю технологію забули і згадали лише в сучасні часи, коли інженери активно зайнялися пошуком альтернативних джерел енергії. В результаті екологічний бум привів до створення різних водневих машин, які відрізняються як по конструкції, так і за своїми характеристиками [37].

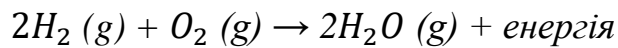
У 1841 році в Англії був виданий патент на двигун, що працює на суміші водню з киснем. В 1852 році у Мюнхені (Німеччина) був побудований двигун внутрішнього згоряння, в якому суміш водню з повітрям стискалася насосом до 2...8 Бар і запалювалась електричною іскрою. У 1923 році Р. Н. Рікардо проводив дослідження впливу складу суміші водень-повітря на детонацію двигуна, працюючого на водні [38].

У 1928 році двигуни внутрішнього згоряння компанії «Цепелін», що працювали на водні, використовувалися для дирижаблів. У 1935 році Сороко-Новицький В. І. та Куренин А. К. опублікували науково-дослідний звіт «Про використання можливості роботи двигуна на водні», в основі якого була робота, виконана в Московському механіко-машинобудівному інституті імені М. В. Ломоносова [38]. Проте практичне застосування водню як моторного палива почалося в 1941 році. У Велику Вітчизняну війну в блокадному Ленінграді технік-лейтенант Шелищ Б.І. запропонував використовувати водень, «відпрацьований» в аеростатах, як моторне паливо для двигунів автомобіля ГАЗ-АА [38].

Водневе паливо спалюється поряд з киснем, воно має різноманітні технологічні, фізико-хімічні переваги, оскільки його можна використовувати в паливних елементах або двигунах внутрішнього згоряння. Спочатку, водень почав використовуватися в паливних елементах або двигунах внутрішнього згоряння в комерційних засобах на паливних елементах, таких як пасажирські автомобілі, і вже багато років використовується в автобусах на паливних елементах. Він також використовується як паливо для руху космічних кораблів [30].

Станом на 2019 рік більшість водню, а це близько 95% виробляється з викопного палива шляхом парового риформінгу або часткового окиснення метану та газифікації вугілля лише незначною кількістю та альтернативними шляхами, такими як газифікація біомаси або електроліз води або сонячна термохімія, сонячне паливо без викидів вуглецю. Молекула водню складається з двох атомів гідрогену, який знаходиться в першій групі та в першому періоді в періодичній системі, тобто він має найменшу атомну масу, та саме він є найлегшим і першим елементом з всіх [40].

Оскільки молекулярна маса водню (H_2) дорівнює 2 г/моль, менша за повітря (середня молекулярна маса становить 29 г/моль), він піднімається в атмосфері і тому рідко зустрічається у чистому вигляді. У полум'ї чистого газоподібного водню, згоряючи на повітрі, водень (H_2) реагує з киснем (O_2) з утворенням води (H_2O) і виділяє енергію:



Якщо це відбувається в атмосферному повітрі замість чистого кисню, як це зазвичай буває, згоряння водню може давати невелику кількість оксидів азоту разом з водяною парою. Виділена енергія дозволяє водню діяти як паливо. В електрохімічній комірці ця енергія може використовуватися з відносно високою ефективністю. Якщо він використовується просто для нагрівання, застосовуються звичайні термодинамічні обмеження теплової ефективності [28].

Водень зазвичай вважається носієм енергії, як електрика, оскільки він повинен вироблятися з первинного джерела енергії, такого як сонячна енергія, біомаса, електроенергія (наприклад, у вигляді сонячної фотоелектричної батареї або за допомогою вітрових турбін), або вуглеводнів, таких як природний газ або вугілля. Звичайне виробництво водню з використанням природного газу спричиняє значний вплив на навколишнє середовище; як і при використанні будь-якого вуглеводню, виділяється вуглекислий газ. У той же час додавання 20% водню (оптимальна частка, яка не впливає на газові труби та прилади) до природного газу може зменшити викиди CO_2 , спричинені нагріванням та приготуванням їжі [50].

Оскільки, чистий водень природним чином не зустрічається на землі у великих кількостях, він зазвичай вимагає введення первинної енергії для виробництва в промислових масштабах. Водневе паливо може вироблятися з метану або шляхом електролізу води. Парометановий риформінг, сучасна провідна технологія отримання водню у великих кількостях, витягує водень з метану. Однак ця реакція вивільняє в атмосферу викопний діоксид вуглецю та оксид вуглецю, які є парниковими газами, екзогенними для природного кругообігу вуглецю, і таким чином сприяють зміні клімату. При електролізі електроенергія проходить через воду, щоб розділити атоми водню та кисню. Цей метод може використовувати

вітрові, сонячні, геотермальні, гідроенергетичні, викопні види палива, біомасу, ядерну енергію та багато інших джерел енергії. Отримання водню за допомогою цього процесу вивчається як життєздатний спосіб його внутрішнього виробництва за низькою вартістю [11].

Найбільшим у світі об'єктом з виробництва водневого палива вважається «Поле досліджень водневої енергетики у Фукусімі (FH2R)», підрозділ з виробництва водню класу 10 МВт, відкритий 7 березня 2020 року в Наміє, префектура Фукусіма. Ділянка займає 180 000 квадратних метрів землі, більшу частину якої займає сонячна батарея ; але енергія від мережі також використовується для проведення електролізу води для отримання водневого палива [43].

Щоб краще зрозуміти переваги водню, ми можемо спочатку переглянути деякі сучасні проблеми, що стосуються структури існуючої енергетичної економіки. Чотири реальності свідчать про те, що нинішня енергетична економіка не є стійкою:

1. Попит на енергію зростає, а сировина для економії викопного палива зменшується. Запаси нафти, вугілля та природного газу не поповнюються, оскільки вони споживаються, тому потрібно знайти альтернативу.

2. Більшість людей, які споживають викопне паливо, не живуть там, де видобувають паливо. Ця ситуація створює величезну економічну мотивацію для країн-споживачів, які намагаються здійснювати контроль над регіонами, що постачають паливо. Для багатьох людей та урядів світу конфлікти, що виникають, є неприйнятними.

3. Викиди від використання викопного палива значно погіршують якість повітря у всьому світі, особливо на північному сході США. Отримані вуглецеві побічні продукти суттєво змінюють світовий клімат. Для багатьох людей та урядів світу наслідки для здоров'я та клімату є неприйнятними.

4. Економіки країн третього світу особливо сприйнятливі при розробці енергетичних систем, необхідних для вдосконалення їх економіки. Економіка викопного палива ставить людей та країни під надмірний вплив постачальників енергії. Ця відсутність економічної незалежності є непринятною для багатьох підприємств та урядів [14].

Водень має три основні переваги, які вирішують проблеми з обслуговування наземного транспорту аеропортів, а саме:

1. Використання водню значно зменшує забруднення, що є і не мало важливим в аеропортах. Коли водень поєднується з киснем у паливному елементі, виробляється енергія у вигляді електрики. Ця електроенергія може використовуватися для живлення транспортних засобів, як джерела тепла та для багатьох інших цілей, що може зекономити енергетичні ресурси або спрямувати їх на щось інше. Перевага використання водню як носія енергії полягає в тому, що коли він поєднується з киснем, єдиними побічними продуктами є вода і тепло. В результаті використання водневих паливних елементів не утворюються парникові гази та інші тверді частинки.

2. Водень може вироблятися місцево, з численних джерел. Водень може вироблятися або централізовано, а потім розподілятися, або там, де він буде використовуватися. Водень можна отримувати з метану, бензину, біомаси, вугілля або води. Кожне з цих джерел приносить із собою різну кількість забруднення, технічні проблеми та енергетичні потреби.

3. Якщо водень виробляється з води, створюється стійка виробнича система. Електроліз – це метод розділення води на водень та кисень. Поновлювана енергія може використовуватися для живлення електролізерів для отримання водню з води. Використання відновлюваних джерел енергії забезпечує стійку систему, яка не залежить від нафтопродуктів і не забруднює навколишнє середовище. Деякі з поновлюваних джерел енергії, що використовуються для живлення електролізерів, - це енергія вітру, гідроенергії, сонячна енергія та припливи. Після отримання водню в електролізері його можна використовувати в паливному елементі для виробництва електроенергії. Побічними продуктами процесу паливних елементів є вода і тепло. Якщо паливні елементи працюють при високих температурах, система може бути створена як когенератор, а витрачена енергія використовується для опалення.

4. Водневий енергетичний центр спирається на переваги водню для реалізації сталої енергетичної економіки [45].

Окрім електролізу, виробництво водню здійснюється за допомогою каталітичної реакції відходів алюмінію. Кінцевими продуктами є водень та глинозем, які можна використовувати повторно для виготовлення алюмінію. Окрім виробництва водню, слід обережно вводити щоденне використання та прийняття водню. Сьогодні водень використовується для живлення комерційних автобусів як двигунами внутрішнього згоряння, що спалюють комбінацію водню та інших видів палива, так і виключно воднем, що використовується в паливних елементах. Водень використовується в багатьох комерційних цілях - від зварювання металу до виготовлення електроніки, пластмас та добрив. Коли можна буде досягти відновлюваного економічно вигідного процесу виробництва водню, переваги будуть розповсюджені на багато галузей. Деякі з доказових підстав для різних методів виробництва можуть бути розроблені на місцевому рівні, щоб забезпечити водень для цих галузей [45].

Відновлювані джерела енергії часто обмежені для комерційного використання через їх періодичну доступність. Іноді вітер не дме або сонце не світить, тому водень може бути найважливішою ланкою, що використовується як запасне середовище для живлення в ці періоди. Водень можна використовувати як мобільне джерело енергії для транспортування, стискаючи та зберігаючи в невеликих резервуарах для подібних застосувань, як бензин або пропан. Зі збільшенням використання водню та технічними досягненнями, витрати на виробництво, розподіл та виготовлення продукції ставатимуть доступними. Продовжуючи будувати партнерські відносини між бізнесом, урядом, університетами та некомерційними організаціями, водень буде основою стійкої енергетичної економіки, зокрема і транспорту [26].

У величезних кількостях водень замикається у воді, вуглеводнях та інших органічних речовинах. Однією з проблем використання водню як палива є можливість ефективного вилучення водню з цих сполук. Зараз на риформінг пари, який поєднує високотемпературну пару з природним газом, припадає більша частина виробленого водню. Цей спосіб отримання водню відбувається при температурах між 700-1100 ° C і має результуючу ефективність між 60-75% [26].

Водень також може вироблятися з води за допомогою електролізу, який є менш вуглецевим, якщо електроенергія, що використовується для стимулювання реакції, надходить не від електростанцій на викопному паливі, а навпаки, відновлюваної або атомної енергії. Ефективність електролізу води становить приблизно 70-80%, з метою поставити мету досягти ефективності 82-86% до 2030 року за допомогою електролізерів з протонообмінною мембраною (ПОМ). Отриманий водень може бути використаний приблизно так само, як природний газ - він може бути доставлений у паливні елементи для виробництва електроенергії та тепла, використаний у газовій турбіні з комбінованим циклом для виробництва більшої кількості централізовано виробленої електроенергії або спалений до запуску двигун внутрішнього згорання; усі методи, що не виробляють викидів вуглецю та метану [57].

Авіапаливозабезпечення авіаційних перевезень і робіт – комплекс заходів, спрямований на забезпечення експлуатації та обслуговування ПС (повітряних суден) кондиційними авіаційними і спеціальними рідинами, приймання, збереження, підготовку та видачу на заправлення, заправлення ПС авіаційними і спеціальними рідинами, здійснення контролю якості авіаційних послуг та інші заходи з контролю кількісних та якісних характеристик (властивостей) авіаційних заходів на етапах авіапаливозабезпечення авіаційних перевезень [18].

Наземна логістика в аеропортах (автонавантажувачі, платформи та візки для обробки багажу) може використовувати енергію водню, що зменшує забруднення та покращує якість обслуговування. Сьогодні авіація відповідає за 3,6% викидів парникових газів в ЄС. Сучасні літаки використовують гас як паливо, виділяючи шкідливий вуглекислий газ в атмосферу. Але що, якби був інший спосіб? Одне з можливих рішень - використання нового типу палива в літаках та наземному транспорті, що не виробляє шкідливих викидів - водню. Вже давно рекламований як стійке паливо, водень надає можливості для авіації, і вже проводяться випробування, щоб довести його ефективність. Як гібридні електричні та паливні літаки могли екологічно подорожувати [17].

Наприклад, літаки, що використовують водень, виділятимуть лише воду, і перші випробування показують, що вони можуть бути такими ж швидкими, як і традиційні літаки, перевозячи більше сотні пасажирів за рейс на тисячі кілометрів. У нещодавньому звіті про потенціал авіації, що працює на водні, говориться, що такі літаки можуть вийти на ринок вже в 2035 році. Є ще значні виклики та технологічні проблеми, щоб це здійснити. Але якщо їх вдасться подолати, майбутнє авіації може бути набагато екологічнішим, ніж сьогодні, і бути функціонуючою складовою декарбонізованого паливо-енергетичного сектору [11]. Загальні властивості водню як палива наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

SWOT-аналіз водневого палива

| Сильні сторони | Слабкі сторони |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - екологічне пальне - виробництво в малих масштабах так і в масових - економічна стабільність - економічна незалежність від традиційного палива - підвищення ККД - висока швидкість згоряння | <ul style="list-style-type: none"> - зберігання - транспортування - важка конструкція - висока вартість |
| Можливості | Загрози |
| <ul style="list-style-type: none"> - екологічно чисте паливо майбутньою - комбінування традиційноо палива та альтернативного | <ul style="list-style-type: none"> - вибухонебезпечність |

2.2. Експлуатаційні та технологічні показники водневого палива

Своєрідні фізико-хімічні властивості водню завжди привертали увагу вчених в області будування двигунів. Головною перевагою цих властивостей для двигунів внутрішнього згорання є екологічна чистота робочого процесу. Відомий науково-технічний досвід використання водню в якості палива для двигунів внутрішнього згорання показує, що водень сумісний з існуючою базовою конструкцією поршневого двигуна внутрішнього згорання. При цьому водень кардинально покращує екологічну експлуатаційну характеристику і має широку сировинну базу [42].

У порівнянні з іншими видами автомобільних та ракетних палив перевагами водню в чистому вигляді водень має такі експлуатаційні та технологічні показники:

- висока теплота згорання (28620 ккал/кг);
- добра займистість воднево-повітряної суміші в широкому діапазоні температур, що забезпечує добрі пускові властивості двигуна при будь-яких температурах атмосферного повітря;
- нешкідливість відпрацьованих газів;
- висока антидетонаційна стійкість, допускає роботу при ступені стиснення до 14,0 МПа[8];
- висока швидкість згорання, для стехіометричної воднево-повітряної суміші вона в 4 рази більше, ніж для бензино-повітряної, що забезпечує кращу повноту згорання водню і визначає більш високий термічний ККД (в середньому на 20...25 %);
- хороша займистість в широкому діапазоні сумішей з повітрям;
- робить можливим здійснення якісного регулювання сумішоутворення в двигуні шляхом зміни кількості подаваної суміші певного складу;
- при застосуванні водню можна значною мірою відмовитися від дроселювання потоку повітря на впуску і тим самим збільшити термічний ККД двигуна на режимах часткових навантажень [28].

Теплотворна здатність водню складає 142 МДж/кг і за цим показником він є в 3 рази ефективнішим за бензин. Проте водень в чистому вигляді практично не зустрічається на нашій планеті, а отже його треба добувати. Основним джерелом сировини для водню є вода, запаси якої на Землі практично необмежені (хоча водень також отримують як супутній продукт в ряді хімічних виробництв, металургійних процесів тощо). Добутий газоподібний водень треба зберігати, транспортувати та спалювати, ефективно перетворюючи та використовуючи виділену енергію. Єдиним продуктом спалювання водню є вода, а отже він є абсолютно "екологічно-толерантним" паливом. Його використання не буде викликати різного роду парникових ефектів, які ми маємо при спалюванні вугілля чи вуглеводнів. І це в свою чергу повинно допомогти вирішити серйозні екологічні проблеми, зокрема, і такі глобальні як потепління клімату на планеті [38].

Схильність воднево-повітряних сумішей до детонації істотним чином залежить від коефіцієнта надлишку повітря α в ній. Гранична ступінь стиснення знижується із зменшенням α і при стехіометричному складі не перевищує 4,6, що відповідає сумі октанового числа палива 42, а при $\alpha = 3$ досягає 9,4 (октанове число 114). Американські дослідники Університету штату Оклахома пристосували для водню класичний бензиновий автомобільний двигун. Виявилось, що при прямому упорскуванні водню в циліндри - як у дизельних двигунах - відпадає потреба в випередженні запалювання [17]. Як показав аналіз вихлопних газів, оксиди сірки та вуглецю в них взагалі відсутні, а оксиди азоту стримується лише в незначних кількостях. Водень виробляється та одержується за допомогою таких методів, ми це можемо побачити в таблиці 2. 1. :

Водень та новітні технології його отримання [35].

| Вид процесів | Фізична суть процесів | ККД |
|-----------------------|---|---------|
| Теплові методи | <p>Теплові методи виробництва водню, як правило, включають риформінг пари, високотемпературний процес, при якому пара реагує з вуглеводневим паливом, утворюючи водень.</p> <p>Багато вуглеводневих видів палива можуть бути реформовані з отриманням водню, включаючи природний газ, дизель, відновлюване рідке паливо, газифіковане вугілля або газифіковану біомасу. Сьогодні близько 95% всього водню виробляється в результаті парового риформінгу природного газу.</p> | 100% |
| Електролітичні методи | <p>Вода може бути розділена на кисень і водень за допомогою процесу, що називається електролізом.</p> <p>Електролітичні процеси відбуваються в електролізері, який функціонує майже так само, як паливний елемент у зворотному напрямку, і замість того, щоб використовувати енергію молекули водню, як це робить паливна комірка, електролізер добуває водень з молекул води.</p> | 80-100% |
| Сонячні методи | <p>Сонячні процеси використовують світло як агент для виробництва водню. Існує кілька процесів, керованих сонцем, включаючи фотобіологічні, фотоелектрохімічні, сонячні та термохімічні. Фотобіологічні процеси використовують природну фотосинтетичну активність бактерій та зелених водоростей для отримання водню.</p> <p>Фотоелектрохімічні процеси використовують спеціалізовані напівпровідники для розділення води на водень та кисень. Сонячне термохімічне виробництво водню використовує концентровану сонячну енергію для стимулювання реакцій розщеплення води часто разом з іншими видами, такими як оксиди металів.</p> | 18% |
| Біологічні методи | <p>У біологічних процесах використовуються такі мікроби, як бактерії та мікроводорості, і вони можуть виробляти водень за допомогою біологічних реакцій. При перетворенні мікробної біомаси мікроби розщеплюють органічні речовини, такі як біомаса або стічні води, виробляючи водень, тоді як у фотобіологічних процесах мікроби використовують сонячне світло як джерело енергії.</p> | 20-30% |

Водень - це чисте паливо, яке при споживанні в паливному елементі виробляє лише воду. Водень може вироблятися з різних внутрішніх ресурсів, таких як природний газ, атомна енергетика, біомаса та поновлювані джерела енергії, такі як сонячна енергія та вітер. Ці якості роблять його привабливим варіантом палива для транспортування та виробництва електроенергії. Його можна використовувати в автомобілях, будинках, для переносних джерел живлення та в багатьох інших додатках. Водень - це енергоносіє, який можна використовувати для зберігання, переміщення та доставки енергії, виробленої з інших джерел [17].

Зокрема, для виробництва водню вигідно використовувати теплову і електричну енергію, що виробляють АЕС в так званому провальному режимі, тобто у нічний час, коли падає рівень звичайного споживання енергії. Перспективним є електроліз води у поєднанні з нетрадиційними поновлюваними джерелами енергії (сонячна, вітрова). Однією з перспективних технологій одержання водню вважається також використання високотемпературних гелієвих реакторів (ВГР), які розробляються в рамках міжнародного проекту побудови ядерного реактора ГТ МГР (Росія, США, Франція), і, як очікується, будуть екологічно безпечними [35].

Крім виробництва водню, проблемним питанням є створення економічної і надійної системи зберігання водню. Найбільші надії тут пов'язують з газобалонним, криогенним і металогідридним способами зберігання. Остаточний вибір способу зберігання потребує додаткових наукових досліджень та експертизи. Найбільш перспективним напрямом використання водневої енергетики є заміна вуглеводневих видів палива на водень у системах транспорту, перш за все у автомобілебудуванні (двигуни внутрішнього згорання). Іншими областями (сферами) застосування водню та змішаного газу, що містить водень, можуть бути: хімічна, нафтопереробна, металургійна, харчова промисловість, житлово-комунальний сектор. Широке застосування у світі набувають паливні елементи для децентралізованої стаціонарної енергетики та для автотранспорту [20].

Отже, водень є перспективним носієм у майбутньому завдяки високому вмісту енергії та стійкій привабливості, коли він виробляється за допомогою чистих

виробничих процесів. Однією з технологічних проблем його використання є безпечне, компактне зберігання, низька маса та велика гравіметрична ємність.

Водневі паливні елементи широко рекламують як екологічно чисту альтернативу, звичайному викопному паливі. Окислюючи молекулярний водень, єдиним прямим побічним продуктом їх виробництва є вода, а це означає, що вони можуть значно зменшити забруднення та техногенні парникові гази. Але група дослідників із США вважає, що паливні елементи самі по собі можуть згубно впливати на навколишнє середовище. Трейсі Тромп та його колеги з Каліфорнійського технологічного інституту використали моделі атмосфери, щоб показати, що неминучі викиди, що виробляються технологією паливних елементів, можуть суттєво пошкодити озоновий шар (Т. Tromp *et al.* 2003 *Science* 300 1740) [4].

Повністю ефективна система виробництва, зберігання та транспортування водню в принципі не повинна призвести до небажаних викидів газу. Але дослідники Caltech зазначають, що така система буде дорогою, і що насправді близько 10-20% водню буде виходити в атмосферу. Вони кажуть, що якби водневі паливні елементи замінили всі сучасні технології згоряння на основі нафти та газу, такі втрати подвоїли б або навіть потроїли загальний водень, що осідає в атмосфері на поверхні Землі [44].

Тромп та його колеги зазначають, що водень буде окислюватися, потрапляючи до стратосфери, що охолоджує стратосферу та створює більше хмар. Це затримало б розпад полярного вихору на північному та південному полюсах, зробивши діри в озоновому шарі більшими та довговічнішими. За їхніми оцінками, надлишок водню призведе до 5-8% зростання викиду озону на північному полюсі та від 3 до 7% на південному полюсі. Однак точний масштаб цього додаткового руйнування озону залежить від ряду невідомих величин. На додаток до невизначеності щодо масштабів викидів водню в майбутньому, мало що зрозуміло про те, як ґрунт поглинає водень з атмосфери. Дослідники кажуть, що цілком можливо, що цей процес може компенсувати всі нові антропогенні викиди [61].

Україна також серед тих країн, що прагнуть здійснити енергетичний перехід до 2050 року. Відповідну концепцію Міністерство екології та захисту довкілля

оприлюднило у грудні цього року. Є у ній згадка і про водень. Однак було би доцільно розглядати водень як магістральний напрям енергетичного переходу для країни. Для нас водень – це перспектива економічного зростання, здобуття енергетичної незалежності та водночас побудови "зеленого" майбутнього. Разом із Українською водневою радою було зроблено дослідження про потенціал відновлюваних джерел енергії в Україні, цифра дуже велика. Потенціал вітру і сонця близько 800 гігават. Це у 18 разів більше, ніж споживає Україна, і це можна перевести в 500 млрд кубометрів водню", — заявив під час прес-конференції "Енергетичний перехід: роль водневих технологій і рішення кліматичних проблем" у лютому цього року директор Інституту відновлюваної енергетики НАН, професор Степан Кудря [29].

Він зауважив, що мова не лише про енергетику, накопичувачі і балансування. Решту можна інтегрувати в транспорт, металургію, домашнє господарство. За прогнозами фахівців НЕК "Укренерго", до кінця 2020 року встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики у країні зросте мінімум до 7,4 ГВт, а в 2030-му – до 11,2 ГВт. Згідно із Концепцією "зеленого" енергетичного переходу України, нам "цілком під силу та економічно доцільно до 2050 року досягнути 70% частки ВДЕ у виробництві електроенергії". І це без врахування такої перспективної технології виробництва чистого водню, як газифікація біомаси. Хоча зараз вироблений таким шляхом водень не прийнято називати "зеленим", цей спосіб є екологічним, до того ж, вирішує проблему накопичення транспортних відходів[47].

2.3. Дослідження властивостей водню, як палива для транспортних засобів

Основним паливом для двигунів внутрішнього згоряння є бензин, газ і дизельне паливо. Але, запаси невідновлюваного енергоносія – нафти – обмежені та в світі назріла складна екологічна ситуація, яка здебільшого зумовлена викидами у атмосферу відпрацьованих у двигунах газів. Отже, виникла необхідність розробити нові види палива, які є екологічно чистими і безпечними для довкілля і здоров'я людини.

Аналіз останніх досліджень

На сьогоднішній день у багатьох країнах світу прийняті жорсткі вимоги до екологізації автотранспорту. Тільки один автомобіль щорічно викидає в атмосферу разом з відпрацьованими газами приблизно 800 кг угарного газу, 40 кг оксидів азоту й майже 200 кг різних вуглеводнів. При цьому поглинає з атмосфери в середньому 4 т кисню. [1] Але, автомобільний двигун може працювати і на інших видах палива, наприклад, на рослинній олії, спирті, водні, сирій нафті, мазуті і навіть воді. Своєрідні фізико-хімічні властивості водню завжди привертала увагу вчених в області будування двигунів. Головною перевагою цих властивостей для двигунів внутрішнього згоряння є екологічна чистота робочого процесу. Відомий науково-технічний досвід використання водню в якості палива для двигунів внутрішнього згоряння показує, що водень сумісний з існуючою базовою конструкцією поршневого двигуна внутрішнього згоряння. При цьому водень кардинально покращує екологічну експлуатаційну характеристику і має широку сировинну базу. [48]

В кінці 70-х років минулого століття дослідники розвинених країн прийшли до висновку, що заміником нафти та її похідних може стати водень. Роботи із створення двигунів, що працюють на водневому паливі, велися в США, Німеччині, Японії і СРСР.

Можливість використання водню як моторне паливо розглядалася ще на самому початку XIX століття. Тоді франко-швейцарський винахідник де Риваз побудував перший прототип такого двигуна і навіть встановив його на праобраз автомобіля. Проте поступово про цю технологію забули і згадали лише в сучасні часи, коли інженери активно зайнялися пошуком альтернативних джерел енергії. В результаті екологічний бум привів до створення різних водневих машин, які відрізняються як по конструкції, так і за своїми характеристиками.

У 1841 р. в Англії був виданий патент на двигун, що працює на суміші водню з киснем. В 1852 р. у Мюнхені (Німеччина) був побудований двигун внутрішнього згоряння, в якому суміш водню з повітрям стискалася насосом до 2...8 Бар і запалювалась електричною іскрою. У 1923 р. Р.Н. Рікардо проводив дослідження впливу складу суміші водень-повітря на детонацію двигуна, працюючого на водні. У

1928 р. двигуни внутрішнього згоряння компанії «Цепелін», що працювали на водні, використовувалися для дирижаблів [50] .

У 1935 році Сороко-Новицький В.І. та Куренин А.К. опублікували науково-дослідний звіт «Про використання можливості роботи двигуна на водні», в основі якого була робота, виконана в Московському механіко-машинобудівному інституті імені М.В.Ломоносова. У цій роботі досліджувався вплив додавання водню до бензину на двигуні ЗІС-5 [49].

Проте практичне застосування водню як моторного палива почалося в 1941 році. У Велику Вітчизняну війну в блокадному Ленінграді технік-лейтенант Шелищ Б.І. запропонував використовувати водень, «відпрацьований» в аеростатах, як моторне паливо для двигунів автомобіля ГАЗ-АА. [55]

В бувшому СРСР на водневій енергетиці зосередили увагу на початку 70-х років. Так у березні 1975 р. у Мінську відбулася перша в СРСР нарада з проблем водневої енергетики. У травні 1975 р. при відділенні фізико-технічних проблем енергетики АН СРСР була організована робоча група по водневій енергетиці на чолі з академіком І.А. Стириковичем. [56]

Перші Всесвітні конференції по водневій енергетиці відбулися: 1976 р. – в Майамі-Біч (США), 1978 р. – в Цюріху (Швейцарія), 1980 р. – в Токіо (Японія) і 1982 р. – в СРСР.

Паливна криза 70-х років змусила автомобільні компанії по-новому поглянути на альтернативні види палива. Тоді і виник інтерес до водню, запаси якого на Землі величезні (його можна отримувати з води). Однак незабаром криза минула, нафтопроводи запрацювали на повну потужність, і водневі дослідження були припинені. Але пройшло всього 30 років, і ці дослідження знову стали актуальними, особливо враховуючи сучасний екологічний настрій.

Перехід транспорту, промисловості, побуту на спалювання водню - це шлях до радикального вирішення проблеми охорони повітряного басейну від забруднення оксидами вуглецю, азоту, сірки, вуглеводнями.

Перехід на водневу технологію та використання води в якості єдиного джерела сировини для отримання водню не може змінити не тільки водного балансу

планети, але і водного балансу окремих її регіонів. Так, річна потреба енергетики такої високо індустріальної країни, як Німеччина, може бути забезпечена за рахунок водню, отриманого з такої кількості води, яка відповідає 1,5% середнього стоку річки Рейн. Відзначимо попутно, що на наших очах стає реальною одна з геніальних здогадок великого фантаста Жуля Верна, який в устами героя роману «Таємничий острів» (гл. XVII) заявляє: «Вода - це вугілля майбутніх століть» [53].

У порівнянні з іншими видами автомобільних палив перевагами водню в чистому вигляді є:

- висока теплота згорання (28620 ккал/кг);
- добра займистість воднево-повітряної суміші в широкому діапазоні температур, що забезпечує добрі пускові властивості двигуна при будь-яких температурах атмосферного повітря;
- нешкідливість відпрацьованих газів;
- висока антидетонаційна стійкість, допускає роботу при ступені стиснення до 14,0 [26];
- висока швидкість згорання, для стехіометричної воднево-повітряної суміші вона в 4 рази більше, ніж для бензино-повітряної, що забезпечує кращу повноту згорання водню і визначає більш високий термічний ККД (в середньому на 20...25 %) [26];
- хороша займистість в широкому діапазоні сумішей з повітрям [36];
- робить можливим здійснення якісного регулювання сумішоутворення в двигуні шляхом зміни кількості подаваної суміші певного складу;
- при застосуванні водню можна значною мірою відмовитися від дроселювання потоку повітря на впуску і тим самим збільшити термічний ККД двигуна на режимах часткових навантажень.

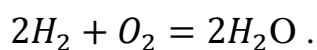
Можна виділити такі перспективні напрямки розробок водневих двигунів:

1. Двигун розподіленого уприскування (Оклахомський університет, США; фірма BMW, Німеччина та ін). Це переобладнаний звичайний двигун, потужність якого при переході на водень дещо підвищилася. (Рис. 2.1)

2. Стірлінг-двигун зовнішнього згоряння (фірма «Філіпс», Голландія та ін). Сучасні двигуни зовнішнього згоряння із зворотно-поступально рухомими поршнями являють собою двигуни подвійної дії (наприклад, з чотирма циліндрами), що працюють з певним зсувом фаз і при високих тисках (від 5 до 20 МПа). У кожному циліндрі розташований один поршень, верхня поверхня якого виконує роль робочого поршня, а нижня працює як насос для наступного циліндра. Він трохи важчий і значно дорожче через ускладнену конструкцію аналогічного двигуна внутрішнього згоряння (наприклад, дизеля). Двигун абсолютно нешкідливий (дуже низька токсичність) і практично безшумний, дозволяє використання різних палив (багатопаливний).

3. Електродвигун на паливних елементах (концерн Ford, Daimler-Chrysler, Opel, MAN, Mazda, Honda і ін). Паливні батареї (електрохімічний генератор) мають високу вартість і потребують вирішення деяких питань експлуатації (у тому числі при низьких температурах).

Здавалося б, створити водневий автомобіль простіше простого. Беремо звичайну машину, замінюємо паливний бак на газовий балон і пускаємо по трубках до циліндрів двигуна водень замість бензину. Якщо усе піде за планом, то з випускних труб виходитиме не отруйний вихлоп, а чиста вода. Ще точніше - водяна пара. Адже окислення водню киснем відбувається по усіх відомій формулі



Дослідниками з'ясовано, що найбільш повно специфічним особливостям водню як моторного палива відповідає швидкохідний двигун з неподіленою камерою згоряння і внутрішнім сумішоутворенням. Максимальні температури продуктів згоряння водню в циліндрі не перевищують аналогічних температур для продуктів згоряння бензину, у той же час максимальний тиск продуктів згоряння і середнє індикаторне тиск на 25% нижче, ніж у двигуна на бензині.



Рис.2.1. Переобладнання класичної компоновки автомобіля водневим двигуном

Такий двигун може працювати при повністю відкритому дроселі у всьому діапазоні робочих навантажень, причому його ефективна потужність може бути змінена (при холостому ході і до повного навантаження) за рахунок регульованої подачі водню. Має порівняно високі значення індикаторного ККД. При ступені стиснення $\varepsilon = 5,45$ і числі обертів двигуна $n = 1500$ хв-1 максимальний індикаторний ККД становив 37,5 % при середньому індикаторном тиску 0,42 МПа і коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 2$, в той час як на бензині - 32% при $\alpha = 1,07 \dots 1,15$. [6].

Теплотворна здатність водню складає 142 МДж/кг і за цим показником він є в 3 рази ефективнішим за бензин. Проте водень в чистому вигляді практично не зустрічається на нашій планеті, а отже його треба добувати. Основним джерелом сировини для водню є вода, запаси якої на Землі практично необмежені (хоча водень також отримують як супутній продукт в ряді хімічних виробництв, металургійних процесів тощо). Добутий газоподібний водень треба зберігати, транспортувати та спалювати, ефективно перетворюючи та використовуючи виділену енергію. Єдиним продуктом спалювання водню є вода, а отже він є абсолютно "екологічно-толерантним" паливом. Його використання не буде викликати різного роду парникових ефектів, які ми маємо при спалюванні вугілля чи вуглеводнів. І це в свою чергу повинно допомогти вирішити серйозні екологічні проблеми, зокрема, і такі глобальні як потепління клімату на планеті. Ці дві базові переваги водню як палива уточнені у вигляді діаграм.

Схильність воднево-повітряних сумішей до детонації істотним чином залежить від коефіцієнта надлишку повітря α в ній. Гранична ступінь стиснення

знижується із зменшенням α і при стехіометричному складі не перевищує 4,6, що відповідає октанового числа палива 42, а при $\alpha = 3$ досягає 9,4 (октанове число 114).

Американські дослідники Університету штату Оклахома пристосували для водню класичний бензиновий автомобільний двигун. Виявилось, що при прямому упорскуванні водню в циліндри - як у дизельних двигунах - відпадає потреба в випередженні запалювання. Як показав аналіз вихлопних газів, оксиди сірки та вуглецю в них взагалі відсутні, а оксиди азоту стримується лише в незначних кількостях.

Однак широкому застосуванню водню як автомобільного палива перешкоджає чимало проблем, і одна з них - паливні баки. На 10 кг водню автомобіль може проїхати стільки ж, скільки на 30 кг бензину, але таку кількість газоподібного водню займає обсяг 8000 л, а щоб зберігати його потрібно міцний резервуар масою 1500 кг. Це наштовхнуло конструкторів на думку використати зріджений водень; тоді ті ж 10 кг водню поміщаються в балоні масою 80 кг і ємністю 160 л. Але щоб мати водень в зрідженому стані, потрібно підтримувати в балоні температуру - 2530 С°. Застосовувати сосуди Дьюара було б занадто дорого. Можливо, конструкторам вдасться використовувати якісь варіанти широко застосовуються в даний час резервуарів для зберігання рідкого палива, у яких добові втрати на випаровування не перевищують 1,5%. Так, в експериментальному автомобілі «Волга» змонтований криогенний водневий бак загальною масою 140 кг. Фахівці знайшли і інше рішення: бак можна виготовити з гідридів металів сплавів магнію, марганцю, титану і заліза, які володіють тим перевагою, що поглинають частину яка випаровується водню, а при нагріванні (хоча б вихлопними газами) знову виділяють його. Маса водневого бака з гідридів металів перевищує 150 кг.

Нове паливо вже випробувано на практиці. Успішно пройшов випробування автомобіль «Жигулі» з комбінованим двигуном на бензині і водні. П.Д. двигуна зависочів на чверть, витрата бензину зменшився на третину, а вміст шкідливих речовин у вихлопних газах знизилосся до мінімуму. Великі надії покладаються і на електромобілі, забезпечені воднево-кислотними топ зливними системами. На думку багатьох фахівців, водневий двигун навряд чи знайде застосування в легкових

автомобілях, з міркувань безпеки, але він може стати в нагоді для громадського транспорту.

Великий інтерес до водневого палива виявляють і авіаконструктори. У США ще в 1957р. дослідна група Національного управління проводить випробовування двомоторного літака на водневому паливі. У 1973р. НАСА доручило фірмі «Локхід» пристосувати для водневого палива два серійних бойових літака (С-141 і «Старфайтер»). Фірма «Боїнг» розробила варіант найбільшого літака «Джамбо-Джет» на водневому палеві.

Є ще одна важлива сполука водню - це перекису водню, яка застосовується для двигунів підводних човнів, ракетних двигунів, у тому числі і таких, які можуть поміститися в ранці за спиною чоло століття.

Двигуни внутрішнього згоряння на водні з початком подачі водню в циліндр в кінці такту стиснення і запалюванням з допомогою свічки (запалювання виключає можливість виникнення детонації) можуть працювати при високих ступенях стиснення. У двигунах, що працюють за цим принципом, подачу водню в циліндр слід організувати таким чином, щоб його струмінь потрапляв на електроди свічки запалювання. Це можна здійснити подачею водню через отвір в самій свічці запалювання або подачею його в потік спрямованого руху повітряного заряду, створеного спеціальною формою впускного трубопроводу або виконанням в поршні камери згоряння спеціальної форми.

Деякі каталізатори (етилнітрат, аміннітрит та ін..) одночасно з підвищенням швидкості горіння, знижують температуру займання горючої суміші і зменшують період затримки займання, що саме необхідно для двигуна, що працює на водні.

Одним з напрямків створення в циліндрі ДВЗ умов, що забезпечують надійне запалення воднево-повітряної суміші, буде одночасне збільшення температури і тиску в кінці такту стиснення. Це можна здійснити за рахунок збільшення ступеня стиснення, підвищення тиску і температури повітряного заряду на початку такту стиснення. Для збільшення тиску і температури повітряного заряду на початку такту стиснення застосовують турбо - або механічний наддув.

Для реалізації переваг водню як автомобільного палива необхідні такі основні конструктивні зміни бензинового двигуна:

1. збільшення робочого об'єму циліндрів (для отримання тієї ж потужності);
2. збільшення ступеня стиснення до допустимої для водню;
3. запобігання можливості передчасного займання, зворотних спалахів, детонації, враховуючи велику швидкість поширення полум'я воднево-повітряної суміші;
4. зміна (зменшення) кута випередження запалювання з урахуванням повного згоряння суміші у верхній мертвій точці;
5. зміна системи живлення, зменшення аеродинамічного опору з урахуванням можливості збільшення коефіцієнта надлишку повітря при роботі на водні;
6. здійснення заходів щодо запобігання утворення оксидів азоту у відпрацьованих газах при використанні атмосферного повітря в якості окислювача та інші заходи.

В новій перспективній справі безліч варіантів, але всі вони націлені до однієї проблеми – в якому агрегатному стані заправляти водень у паливний бак.

Для газоподібного водню потрібні досить-таки об'ємні ємності, до того ж його здатність проникати через незначні нещільності, а також небезпечна концентрація в повітрі в об'ємному співвідношенні 2 : 1 (так званий «гримучий газ») ускладнює розвиток даного напрямку. Незважаючи на простоту і надійність балонні системи зберігання водню можна вважати доцільним лише при використанні водню до якості присадки до бензину, так як існуючі балони мало придатні в силу великої ваги (найлегші з існуючих балонів мають питому вагу близько 33 кг/кг водню).

Не краще і з розрідженим воднем, який потрібно зберігати при температурі - 253°C. Криогенні системи багато складніше і дорожче балонних, при зріджуванні водню потрібно більш складне і дороге устаткування і більш високі енерговитрати.

Відомий спосіб зберігання – з використанням гідридів металів і сплавів, здатних «розмістити» між своїми атомами атоми водню. Ємність такого «сховища» (при рівному обсязі пристрою) вп'ятеро вище, ніж у балона зі стисненим газом і майже вдвічі – зі скрапленим. Найкращою основою для гідриду є титан. Гідридні

наповнювачі досить складні у виготовленні, вони не складаються з цільного металу, а більше нагадують губку з безліччю каналів - для швидкого поглинання і виділення водню. Як вже було зазначено раніше, останнє відбувається при нагріванні гідридів.

Хоча гідриди безпечніше інших способів зберігання водню – для автомобільного транспорту ємність і у них замала, а вага і складність пристрою, навпаки, великі. До того ж гідридні системи мало пристосовані до роботи з змінними витратами значної теплової інерції реакторів і тому повинні мати в своєму складі ресивер або комбінуватися з іншим джерелом водню.

Незалежно від способу зберігання водневого палива на автомобілі, більшість існуючих водневих систем живлення забезпечують подавання газоподібного водню у впускний колектор двигуна. Схеми зовнішнього сумішоутворення базуються на системах безперервного уприскування палива, в яких центральний електричний дозуючий клапан і розподільник водню направляють газоподібний водень в окремі впускні тракти двигуна.

У стадії розробки перебуває спосіб підготовки суміші, заснований на послідовному й імпульсному впорскуванні водню у впускний колектор.

Запобігання зворотних спалахів у впускному колекторі здійснюється шляхом використання збіднених сумішей або упорскуванням в колектор додаткових порцій води.

2.4. Малодосліджені питання небезпек водневого палива

Безпека водню охоплює безпечне виробництво, обіг і використання водню, особливо газоподібного водневого палива та рідкого водню. Основна проблема при роботі з воднем - займистість.

Водень має найвищу оцінку 4 бали за шкалою займистості NFPA 704, тому що він легко запалюється при змішуванні навіть в невеликих кількостях зі звичайним повітрям; займання може відбуватися при об'ємному відношенні водню до повітря всього 4% через наявність кисню в повітрі, а також простоті

хімічних властивостей реакції. Однак водень не має оцінки вродженої небезпеки по реактивності або токсичності. Зберігання та використання водню створюють унікальні проблеми через його легкість витоку в якості газоподібного палива, низькоенергетичного займання, широкого діапазону горючих паливно-повітряних сумішей, плавучості та його здатності охрупчувати метали, що необхідно враховувати для забезпечення безпеки.

Рідкий водень створює додаткові проблеми через його підвищену щільності і надзвичайно низькі температури, які необхідні для збереження його в рідкій формі.

Більше 40 років промисловість використовує водень в величезних кількостях як промислову хімічну речовину і палива для дослідження космосу. За цей час промисловість розробила інфраструктуру для безпечного виробництва, зберігання, транспортування та використання водню. Водневий газ - дуже потужне паливо. Він горить з неймовірною швидкістю і може створювати неймовірну силу і використовується в основному для додатків, що вимагають величезної кількості миттєвої енергії, таких як ракетна техніка і космічні польоти. Наприклад, він використовувався для харчування космічного корабля "Шаттл". Рідкий водень іноді використовується як паливо з надзвичайно високим ступенем конденсації водню.

Газоподібний водень можна використовувати в якості теплоносія для електрогенераторів на електростанціях. Це через його високу теплопровідність і низьку «парусність», що знижує втрати на тертя і турбулентність.

Водень також використовується в якості сировини в промислових процесах, включаючи виробництво аміаку і метанолу.

Водневі норми і стандарти - це коди і стандарти (RCS) для транспортних засобів на водневих паливних елементах, стаціонарних паливних елементів і портативних паливних елементів. На додаток до кодексів і стандартів для продуктів водневої технології існують кодекси і стандарти по водневій безпеці, безпечного поводження з воднем і зберігання водню [20].

Стандарт на установку стаціонарних енергетичних систем на паливних елементах (Національна асоціація протипожежного захисту), посібник з безпеки водневих і водневих систем охоплюють як ризики, пов'язані з воднем в його різних формах, так і способи їх зменшення.

Воднево-повітряні суміші можуть спалахнути з дуже низьким енергоспоживанням, 1/10 якого потрібно для займання бензин-повітряної суміші.

Хоча температура самозаймання водню вище, ніж у більшості вуглеводнів, більш низька енергія займання водню робить запалювання воднево-повітряних сумішей більш імовірним. Мінімальна енергія іскрового запалювання при атмосферному тиску становить близько 0,02 мілліджоулей.

Межі займання на основі об'ємного відсотка водню в повітрі при 14,7 фунт/дюйм² (1 атм, 101 кПа) складають 4,0 і 75,0. Межі займистості засновані на об'ємному процентному вміст водню в кисні при 14,7 фунт/кв. дюйм (1 атм, 101 кПа).

Межі вибуховості водню в повітрі від 18,3 до 59 відсотків за обсягом.

Полум'я всередині і навколо труб або конструкцій може створювати турбулентність, яка призводить до того, що горіння переростає в детонацію, навіть при відсутності сильного стримування.

Водень не має запаху, кольору і смаку, тому людські почуття не допоможуть виявити витік. Для порівняння: природний газ також не має запаху, кольору і смаку, але промисловість додає сірковмісний одорант, званий меркаптанам, щоб його могли виявити люди. В даний час всі відомі одоранти забруднюють паливні елементи (популярне застосування водню) [21].

Однак, з огляду на схильність водню до швидкого зростання, витік водню в приміщенні ненадовго накопичується на стелі і в кінцевому підсумку переміщається до кутів і далеко від місць, де можуть бути люди. З цієї та інших причин промисловість часто використовує датчики водню для виявлення витоків водню і десятиліттями підтримує високі показники безпеки з їх допомогою.

Дослідники вивчають інші методи, які можуть бути використані для виявлення водню: індикатори, нова технологія одорантів, вдосконалені датчики та ін.

Витік водню можуть сприяти горінню при дуже низьких витратах, всього 4 мкг/с. Рідкий водень «конденсованого і затверділого атмосферного повітря або сліди повітря, накопичені при виробництві, забруднюють рідкий водень, тим самим утворюючи нестабільну суміш. Ця суміш може вибухнути з ефектами, аналогічними до ефектів, які має тринітротолуолом (TNT) та іншими вибухонебезпечними матеріалами.

Рідкий водень вимагає складної технології зберігання, такий як спеціальні теплоізольовані контейнери, і вимагає особливого поводження, загального для всіх кріогенних речовин. Це схоже на рідкий кисень, але більш небезпечно. Навіть в термоізольованих контейнерах важко підтримувати таку низьку температуру, і водень буде поступово випаровуватися. Зазвичай він випаровується зі швидкістю 1% в день.

Водень накопичується під дахами і навісами, де він створює небезпеку вибуху; будь-яка будівля, яка містить потенційне джерело водню, повинна мати гарну вентиляцію, потужні системи придушення спалаху для всіх електричних пристроїв і, переважно, мати дах, який можна безпечно збудувати для іншої частини конструкції при вибуху. Він також входить в труби і може слідувати по ним до місця призначення. Водневі труби повинні бути розташовані над іншими трубами, щоб запобігти цьому [22].

Датчики водню дозволяють швидко виявляти витіки водню, щоб гарантувати, що водень може бути випущений і джерело витіку виявлено. Як і в природному газі, аромати можуть бути додані до джерел водню, щоб включити витіки для виявлення його запаху. Хоча воднече полум'я важко побачити неозброєним оком, воно легко виявляється УФ/ІЧ датчиками полум'я. Зовсім недавно були розроблені мульти-ІЧ-детектори, які ще швидше виявляють воднече полум'я. Хемо-хромові індикатори можуть бути додані до силіконових стрічок для виявлення водню.

Водень легко запалюється. Однак це пом'якшується тим фактом, що водень швидко піднімається і часто розсіюється перед займанням, якщо витік не відбувається в замкнутому задушливому приміщенні. Демонстрації показали, що при загорянні палива в автомобілі, що працює на водні, може статися повне згорання з невеликим ушкодженням автомобіля, на відміну від очікуваного результату в автомобілі, що працює на бензині [23].

Катастрофа Альхорна. 5 січня 1918 року в ангарі в Німеччині сталася пожежа, яка підірвала водневий цепелін. Вибух стався в 40 км і знищив кілька сусідніх ангарів і цепелінів всередині.

Гінденбургская катастрофа. 6 травня 1937 року. Коли дирижабль «Гінденбург» наближався до посадки на військово-морській авіабазі Лейкхерст, в одній з кормових водневих осередків вибухнув вогонь, розірвавши сусідні осередки, і дирижабль впав на землю кормою. Потім полум'я охопило корму, підірвавши і запаливши салон. Незважаючи на те, що 4 новинні станції записали катастрофу на плівку і збереглися свідчення очевидців від екіпажу і людей на землі, причина первинної пожежі так і не була остаточно визначена.

Під час ядерної аварії на Фукусімі у 2011 році три будівлі реактора були пошкоджені водневими вибухами. Відкриті паливні стрижні в оболонці з ціркалою стали дуже гарячими і вступили в реакцію з парою з виділенням водню. Захисні оболонки були заповнені інертним азотом, що запобігало горіння водню в захисній оболонці. Однак водень просочився із захисної оболонки в будівлю реактора, де він змішався з повітрям і вибухнув. Щоб запобігти подальшим вибухам, в верхній частині корпусів реактора були відкриті вентиляційні отвори.

У лютому 2018 року по шляху до водневої станції FCV загорілася вантажівка, в якій знаходилося близько 24 баків зі стисненим воднем. Це викликало евакуацію спочатку з району Даймонд-Бар, передмістя Лос-Анджелеса, Каліфорнія, радіусом в одну милю.

У серпні 2018 року вантажівка, що перевозила рідкий водень, загорілась в Верідаме в Ель-Кахон, Каліфорнія.

У травні 2019 року витік водню призвів до вибуху на заводі AV Specialty Silicones в Вокегане, штат Іллінойс, в результаті якого чотири робочих загинули і п'ятий серйозно постраждав.

Також в травні 2019 року вибухнув резервуар з воднем, в результаті чого дві людини загинули і шість отримали поранення в Каннин, Південна Корея, в технопарку Канвон.

У червні 2019 року Air Products and Chemicals, Inc. в Санта-Кларі, Каліфорнія. На установці для перекачування водню стався вибух під час завантаження автоцистерни, яка заправлялася паливом. Це призвело до тимчасового відключення декількох заправних станцій воднем в районі Сан-Франциско.

У червні 2019 року на заправній станції Uno-X в Норвегії стався вибух, в результаті якого були зупинені всі водневі заправні станції Uno-X і тимчасово призупинено продаж автомобілів на паливних елементах в Норвегії. За результатами попереднього розслідування ні електролізер, ні колонка, використана покупцями, не мали до цієї події ніякого відношення. Таким чином, підрозділ електролізерів повернеться до своєї звичайної роботи.

27 червня 2019 року Nel ASA оголошує, що основна причина інциденту була визначена як помилка збірки конкретної заглушки в водневому баку в сховище високого тиску.

У грудні 2019 року в результаті вибуху газу на підприємстві Airgas в Вокеше, штат Вісконсін, був поранений один робочий і стався витік з двох резервуарів для зберігання водню.

7 квітня 2020 року вибух на заводі з виробництва водневого палива OneH2 в Лонг-В'ю, штат Північна Кароліна, завдав значної шкоди оточуючим будівлям. Вибух відчувався в декількох милях від міста, пошкодивши близько 60 будинків. Про постраждалих від вибуху не надходило. Інцидент розслідується. Компанія опублікувала прес-реліз: «Системи водневої безпеки працюють ефективно, запобігаючи травмуванню під час вибуху заводу».

11 червня 2020 року відбулося вибух на заводі з виробництва водню Praxair Inc., 703 6-й Сент-Техас-Сіті, штат Техас [24].

2.5 Вибухонебезпечність водневого палива та можливі шляхи його подолання.

Безпека водневих технологій - важлива тема для дискусій протягом багатьох десятиліть. У публічному просторі прийнято згадувати катастрофу дирижабля Гінденбург в 1937 році або навіть аварію на Чорнобильській АЕС в 1986 році. З часів першої аварії пройшло вже більше 80 років, кількість водневих автобусів вже йде на сотні, водневі заправні станції розташовуються в безпосередній близькості від житлових будинків.

Чорнобильський реактор, можливо, був зруйнований вибухом суміші водню і кисню - але суміш ця утворилася через ланцюжок помилкових дій персоналу станції і, ймовірно, конструктивних особливостей реактора, - навряд чи можливо «звинувачувати» водень ще і в цій катастрофі [34].

Водень використовується в промисловості десятиліттями, - можливо, це новий енергоносіє, але точно не новий газ. Його властивості давно і добре вивчені - вони серйозно відрізняються і від метану, і від пропану, і від бензину (рис. 2.2)

Водень при суміші з повітрям утворює вибухонебезпечну суміш - гримучий газ.

Найбільшу вибухонебезпечність - при об'ємному відношенні водню і кисню 2:1, або водню і повітря наближено 2:5, так як в повітрі кисню міститься приблизно 21%.

Водень пожежонебезпечний.

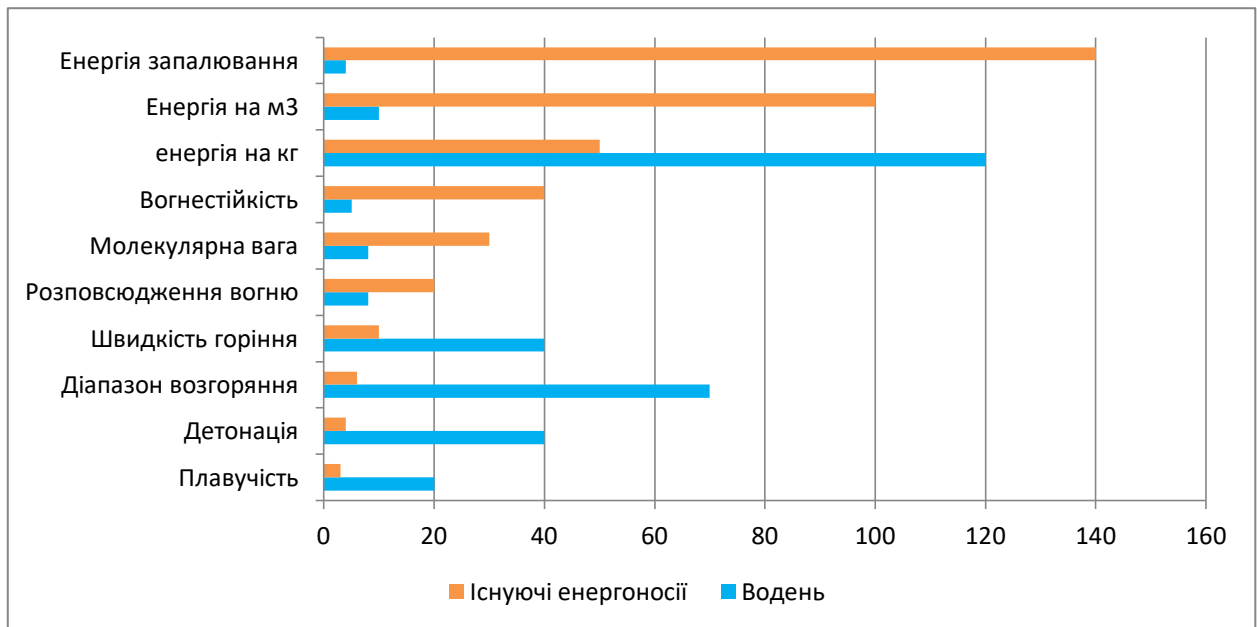


Рис 2.2. Характеристика «безпеки» водню в якісному порівнянні з сьогоdnішніми енергоносіями [15]

Водень - менш ризикований енергоносіє з точки зору пожежної безпеки та термічних впливів, але може бути відповідальний за більш значні ефекти, пов'язані зі зміною тиску. Від вуглеводнів водень відрізняється:

- великими межами детонаційної здатності і займистості;
- низькими значеннями енергії запалювання і детонації;
- безбарвним полум'ям;
- швидким розсіюванням, здатністю до дифузії.

Відповіддю на ці виклики, очевидно, є застосування потрібних технологій [16]:

- Водень вибухонебезпечний тільки в суміші з повітрям в певних умовах (особливо в закритих приміщеннях) - на відміну, наприклад, від ацетилену, вибухонебезпечного і без повітря. Бак стисненого водню не більш небезпечний, ніж бак з бензином або гасом - адже в останній важче обмежити доступ повітря (що стало причиною катастрофи рейсу TWA800 в 1996 році, яка забрала життя 230 осіб);

- Полум'я від горіння водню найчастіше невидимо, але для його виявлення вже використовують спеціальні датчики;

- охрупчення металів через дифузію водню в їх структуру дійсно може відбуватися, особливо в місцях пластичної деформації металів (вм'ятини, тріщинах) - тому важливо коректно підбирати конструкційні матеріали, здатні сприймати навантаження. До того ж, композити взагалі не сприйнятливі до охрупчення;

- Водень - всепроникаючий газ, він може з часом «просочитися» через будь-який матеріал, - але це не означає, що його не можна зберігати: витіки через клапани сховищ не мають практичного значення і т.д.

Можливість утворення воднем вибухонебезпечних сумішей робить його набагато небезпечнішим за природний газ.

До початку запуску будь-якого обсягу водню в мережу в промислових масштабах необхідно провести кампанію по навчанню споживачів - аж до того, що кожен підпише документ про ознайомлення з ризиками роботи з таким видом газу, який є більш вибухонебезпечним через більш легке утворення небезпечної концентрації та ін.

На думку спеціалістів [37], таке навчання повинна буде організувати держава, із залученням фахівців, здатних говорити з кожним і пояснювати складні речі зрозумілою мовою. Потреба у подібному навчанні не є особливістю лише України.

По-друге, одна з основних вимог по експлуатації водню в промисловості – датчики загазованості в кожному приміщенні, де буде встановлений споживчий прилад.

На його дослідників [38], це можуть бути датчики з виходом через GSM-мережі. Також розглядається застосування віддаленого клапана-відсікача поставки водню в конкретне приміщення.

Безпека водневих технологій - важлива складова частина національних водневих програм. Наприклад, в рамках європейської програми FCH JU існує ініціатива European Hydrogen Safety Panel.

Глобальний характер водневої економіки майбутнього вимагає посилення міжнародного співробітництва - в тому числі, гармонізації національних

стандартів по всьому технологічному ланцюжку при активній участі постачальників водню, обладнання для його виробництва, зберігання, транспортування, користувачів водню, незалежних експертів, організацій з нагляду за безпекою продукції і т.д. Тому у технічне регулювання - ключова роль в справі забезпечення безпеки водневих технологій. Стандартизацією на міжнародному рівні займається профільний комітет ISO - ISO / TC 19788 [49].

2.6. Висновки до розділу

Водневе паливо може вироблятися з метану або шляхом електролізу води, на 2020 рік більшість водню (а це близько 95%) одержується шляхом парового риформінгу або ж часткового окислення метану та газифікації біомаси чи електроліз води. Використання водню значно зменшує забруднення, що є і не мало важливим в аеропортах, водень може вироблятися місцево з численних джерел. Водень можна отримувати з метану, бензину, біомаси вугілля або води, безліч джерел водню існує як в техніці, так в природі, за допомогою водню створюється ціла виробнича система, воднева енергія не потребує додаткової обробки та його джерела є відновними.

Наземний транспорт, що забезпечує авіаобслуговування, є комплексом авіаційних перевезень та робіт, спрямованих на забезпечення експлуатації та обслуговування повітряних суден кондиційними авіаційними та спеціальними рідинами, приймання, збереження, підготовку та видачу та на заправлення спеціальними та авіаційними рідинами. Наземна логістика в аеропортах через масовість свого використання чинить забруднення навколишнього середовища при застосуванні вуглецевого палива. На сьогодні авіація відповідає за 3,6% викидів парникових газів в ЄС. Для того, щоб здійснити наземне обслуговування потрібна велика кількість пального та електричної енергії, звичайно було б доцільніше його замінити на водень, який є чистішим та має безліч джерел добування та одержання.

РОЗДІЛ 3.

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ В АВІАЦІЙНІЙ НАЗЕМНІЙ ТЕХНІЦІ

3.1. Аналіз авіаційного наземного транспорту аеропорту та можливість експлуатації на водневому паливі

При успішному розвитку водневої енергетики Україна могла б повністю використати свою багату енергоресурсну базу, диверсифікувати джерела енергії, покращити екологічну ситуацію в країні. Це також і шлях впровадження високих технологій світового рівня та розбудови відповідного сектору промисловості, можливість виходу на ринки з екологічно чистими технологіями і устаткуванням. Для цього потрібно підтримати існуючі в країні наукові розробки, які проводяться у низці інститутів НАНУ шляхом організації та фінансування відповідних досліджень [33].

Серед них: Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного (розробка технологій виробництва водню), Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича (одержання матеріалів для виготовлення паливних елементів, розробки накопичувачів водню, розробки паливних елементів), Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона (технології нанесення плівок різного застосування, герметизація батарей паливних елементів шляхом зварювання, дослідження поведінки металевих матеріалів у водневому середовищі, виготовлення балонів для водню та ін.), Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка (випробування механічних властивостей матеріалів в різних середовищах та при різних температурах), Інститут газу (глибоке очищення водню, створення систем його зберігання, створення гібридних воднево-сонячних установок), Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В.І.Вернадського (теоретичні роботи з водневої енергетики, синтез порошоків для виготовлення паливних елементів), Інститут хімії високомолекулярних сполук (розробка полімерних паливних елементів та матеріалів

для їх виготовлення), Донецький фізико-технічний інститут ім. В.Галкіна (отримання цирконієвої кераміки для паливних елементів та матеріалів для них) та інші наукові заклади і підприємства. Для концентрації зусиль з розробки водневих технологій було б доцільним утворити кооперацію науково-дослідних установ під егідою НАНУ та розробити відповідну Програму із залученням як державних, так і приватних інвестицій для її виконання [30].

Наявність в Україні значних покладів цирконієвих руд, рідкоземельних елементів та промисловості з їх переробки, могли б забезпечити виробництво паливних елементів з використанням передових вітчизняних технологій. Доцільно було б також забезпечити на початковому етапі пільгове оподаткування та іншу законодавчу підтримку виробництва паливних елементів та інших складових водневих систем. Це дозволило б Україні у майбутньому знайти своє місце в розподілі та використанні водневих технологій у міжнародному масштабі, створити нові робочі місця для висококваліфікованих фахівців, як в галузі стратегічних наукових досліджень і розробок, так і на високотехнологічних виробництвах. Але, на даний момент в нас такі практичні експерименти навіть не здійснюються, тому що такі проекти є дуже дорогими та потрібно під них рестрикуризувати всю авіаційну галузь [31].

В Україні поки що дослідження в області водневих технологій знаходяться у початковому стані, не зважаючи на те, що вони проводяться впродовж тривалого часу. Основні причини, що перешкоджають активізації проведення робіт з водневої енергетики в Україні є наступними:

1. відсутність стратегії розвитку водневої енергетики як енергетики майбутнього (XXI століття), національної програми з розробки і виробництва водневих паливних елементів та енергетичних установок на їх основі, а також відповідної законодавчої бази;
2. відсутність цільового державного фінансування фундаментальних і прикладних досліджень та розробок в області водневої енергетики;
3. нерозвиненість і неготовність промислової бази для виробництва ПЕ і енергетичних установок на їх базі;

4. неготовність приватного бізнесу до субсидування фундаментальних і прикладних досліджень;

5. відсутність чіткої і ясної державної політики та реальної підтримки робіт з екологічно чистих ресурсо- і енергозберігаючих технологій [38].

Щодо закордонних зобутків, то авіаційна промисловість перебуває під посиленним тиском щодо зменшення викидів у рамках зобов'язання Європейської Комісії (FTC) Flightpath 2050. ЄК (європейська комісія) встановила цілі загальносекторного зниження на 75% вуглекислого газу та 90% оксидів азоту. Але для того, щоб водень досяг широкого поширення в авіаційній галузі, він повинен бути доступним в аеропортах по всьому світу. І прогрес у цій галузі перебуває у зародковому стані. Однією з головних проблем є розробка широкомасштабних транспортних та інфраструктурних рішень, необхідних для постачання аеропортів необхідною кількістю водню, необхідного для заправлення літаків чи наземного обслуговування. Великий інтерес до водневого палива виявляють і авіаконструктори. У США ще в 1957р. дослідна група Національного управління проводить випробовування двомоторного літака на водневому паливі. У 1973р. НАСА доручило фірмі «Локхід» пристосувати для водневого палива два серійних бойових літака (С-141 і «Старфайтер»). Фірма «Боїнг» розробила варіант найбільшого літака «Джамбо-Джет» на водневому паливі [39].

Нещодавнє дослідження, проведене експертами, припускає, що перепрофілювання існуючої інфраструктури на водневе, включаючи мільйони кілометрів трубопроводів, які сьогодні використовуються для транспортування природного газу, може бути економічно ефективним рішенням. Таким чином, більша кількість водню може транспортуватися трубопроводом з виробничих майданчиків, тоді як менша кількість може транспортуватися вантажівкою. Крім того, деякі аеропорти можуть розробити необхідну інфраструктуру для підтримки видобутку водню на місці, особливо якщо джерело відновлюваної енергії знаходиться в безпосередній близькості [41].

В даний час авіакомпанія «Airbus» співпрацює як з аеропортами, так і з іншими авіакомпаніями, щоб забезпечити наявність та пропагування необхідної

водневої інфраструктури. Це включає дослідження того, як усі пов'язані з аеропортами наземні перевезення (наприклад, вантажні вантажні автомобілі, пасажирські автобуси, буксири літаків тощо) можуть бути декарбонізовані протягом періоду 2020-х років із використанням поетапного підходу, який, як очікується та відкриє шлях до доступності водню для літаків в 2030-ті роки. Однак суспільне уявлення про безпеку водню все ще неоднозначне: лише 49,5% респондентів недавнього опитування вважали, що водень "загалом безпечний". Протягом багатьох років це сприйняття, безперечно, негативно впливало на такі випадки, як катастрофа 1937 року в Гінденбурзі. Однак цікавим в опитуванні є те, що 73,2% учасників позитивно відгукнулися на друге питання про «готовність використовувати водневі види транспорту». Оскільки водень дедалі більше стає опорою у розробці нових транспортних рішень, таких як автомобілі та автобуси, сприйняття водню громадськістю, швидше за все, зміниться - що повинно позитивно вплинути на використання водню в літаках [44].

Розвиток водневих паливних елементів відбувається повільно. Донедавна технологія була надто дорогою, щоб її можна було реалістично впровадити в будь-якому промисловому чи комерційному застосуванні, і навіть зараз ціна впровадження все ще значно вища, ніж звичайні системи заправки. Паливні клітини використовують рідкісні метали, такі як платина, як ключовий компонент, а водень як газ дуже важко зберігати. Тим не менш, прогрес робиться, і технологія вже впроваджується в декількох авіаційних середовищах, при цьому ряд аеропортів вивчають наземні транспортні засоби, що працюють на водні, а також інші інноваційні програми. Питання в тому, наскільки широко поширеною могла б стати ця технологія [42].

За останні кілька років ряд аеропортів інвестували в наземні транспортні засоби, що працюють на водні. У 2015 році Міжнародний аеропорт Мемфіса першим у світі додав вантажні автомобілі з паливними водневими елементами до свого парку завдяки фінансуванню Управління технологій паливних комірок

(УТПК) Міністерства енергетики США, яке працює над подоланням бар'єрів для комерційного використання технологій водневих паливних елементів [20].

Аеропорт Осло в 2014 році придбав свій перший водневий автомобіль, а в 2015 році оголосив про плани відкрити власну водневу станцію для заправки. "Ми хочемо полегшити використання автомобілів з нульовими викидами на місцевому рівні, у службі наземного транспорту та для зовнішніх користувачів", - сказав екологічний менеджер аеропорту Осло Том Ерлінг Моен. За словами Марковіца, простий акт пошуку водневого паливного елемента в аеропорту чи поблизу його може революціонізувати діяльність: «Інвестиції в інфраструктуру були б найефективнішим та найвигіднішим методом у будь-якому застосуванні через багаторазове потенційне використання паливних елементів в аеропортах», він каже. "Розташування водневої заправної станції в аеропорту може бути використано для палива широкого кола транспортних засобів з нульовими викидами, що працюють над зменшенням забруднення на цих вуглецевих об'єктах» [20].

І це не тільки наземні транспортні засоби, які можуть використовувати енергію водню. Якби технологія паливних елементів стала основним елементом інфраструктури аеропорту, експлуатація злітно-посадкової смуги, терміналу або навіть диспетчерської вежі могла б стати зеленою революцією в світі. «Окрім транспортування, паливні елементи можуть бути використані для цілого ряду інших додатків, від багатомегаватних систем паливних елементів, що забезпечують базове живлення до аеропортів, резервних генераторів енергії, що забезпечують критичну безпеку, спостереження та системи контролю руху, що залишаються в мережі на випадок, якщо можливе відключення, а також інші потреби в віддаленому живленні, такі як відеокамери, освітлення злітно-посадкової смуги тощо », - пояснює Маркові [24].

National Renewable Energy Laboratory (США) в своїх розрахунках використовує середню дальність пробігу легкового автомобіля дорівнює 12000 миль на рік (19200 км), споживання водню - 1 кг на 60 миль (96 км) пробігу. Тобто одного легкового автомобіля на водневих паливних елементах в рік потрібно 200 кг водню,

або 0,55 кг в день. Один кілограм водню вважають рівним за енергетичною цінністю одному галон (3,78 л) бензину.

Транспорт що використовується в аеропорту: а) автобус; б) тягач;

в) снігоочищувач; г) деайсер; д) тягач багажу; е) підіймач; є) трап; ж) follow me;

з) паливо заправна машина; и) пожежна машина.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 3.1. а) автобус; б) тягач; в) снігоочищувач; г) деайсер; д) тягач багажу; е) підіймач

Транспорт що використовується в аеропорту: а) автобус; б) тягач;
в) снігоочищувач; г) деайсер; д) тягач багажу; е) підіймач; є) трап; ж) follow me;
з) паливо заправна машина; и) пожежна машина.



є)



ж)



з)



и)

Рис. 3.1. є) трап; ж) follow me; з) паливо заправна машина; и) пожежна машина.

3.2. Інфраструктура забезпечення використання водню в авіаційній наземній техніці

Водневі машини не використовують двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ). Замість нього в них вбудований так званий паливний елемент (ще відома як паливна комірка). Це електрохімічний пристрій, принцип роботи якого схожий на пристрій батарей, з тією лише різницею, що хімічна речовина, що зберігає енергію, подається

ззовні. За своєю суттю водневі машини є різновидом електромобілів, які заряджаються воднем.

У водневих же машин не тільки дуже високий ККД, до 80%, але до того ж у них немає холостого ходу. Тобто ви не витрачається паливо в ті моменти, коли транспорт зупинивсь або сповільнюється. Крім того, водень є енергоємним паливом з усіх використовуваних в індустрії - в три рази більше енергетичним ніж вуглеводні.

В авіації наземний транспорт здійснює заходи по обслуговуванню пасажирів, літаків та перевезенні вантажів. Сюди відносяться автобуси, вантажівки, тягачі, платформи та ін.

На водень можливо перевести автобуси для перевезення пасажирів та грузовий транспорт для перевезення вантажів по зоні аеропорту. Такі автобуси на водні вже є у Європі. Технологія така сама, як у нас транспорт на стиснутому газі метані – балони на даху. Але це не зовсім ефективно з точки зору коефіцієнту перетворення енергії. Краще це робити у паливних елементах – їх ККД 60-80%. А ККД двигуна внутрішнього згорання – максимум 40%. Проте, в даному напрямку вже працюють науковці.

На сьогодні уже користується попитом у багатьох країнах магістральний тягач, який має систему водневих паливних елементів потужністю 190 кВт (два модулі по 95 кВт).

У семи балонах, розташованих у доволі довгому задньому звісі, розміщено 32 кг водню. У такої вантажівки також встановлена акумуляторна батарея на 73,7 кВт.год. Цього вистачає на пробіг до 400 км. Дозаправка займає від 8 до 20 хвилин.

Toyota

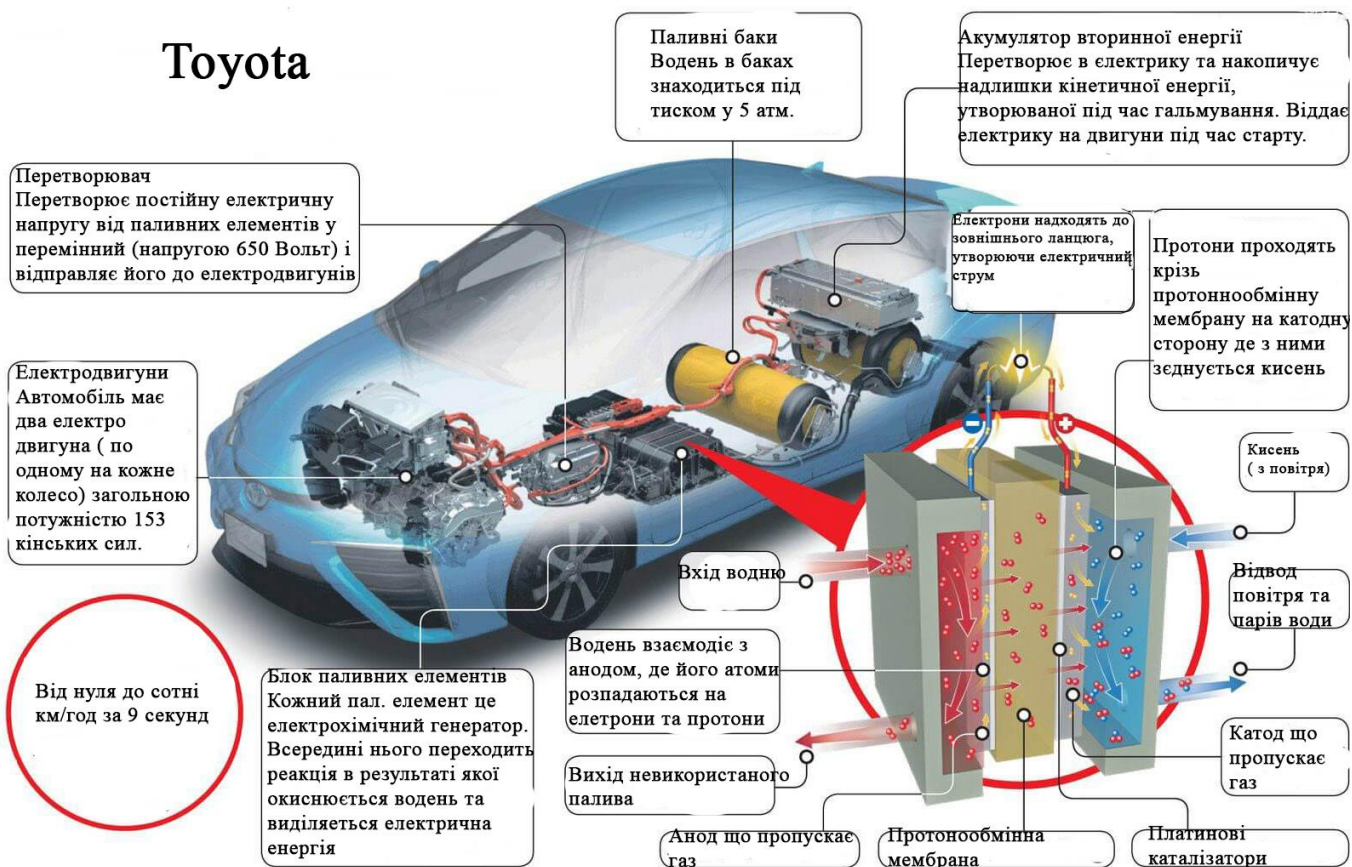


Рис. 3.1.

Технологія роботи двигуна наступна:

1. Внаслідок хімічної реакції при взаємодії водню та кисню виробляється електроенергія.
2. Вироблена у паливних елементах електроенергія приводить в рух електричну трансмісію. У системи є інтегрований акумуляторний буфер.
3. У викидах в атмосферу міститься лише вода.



Рис. 3.2 Водневий двигун

Акумуляторні батареї для вантажівок надто важкі, тому потрібно мати поблизу заправки.

Основним недоліком водневих автомобілів є те, що таке паливо як водень, надзвичайно складно і важко зберігати. Щоб заправити нормальне кількість водню в резервуар, його необхідно для початку стиснути, приблизно до 700 бар.

А для стиснення водню буде потрібно енергія. Крім того, щоб зберігання водню під високим тиском, потрібно важкий посилений високоміцний резервуар, щоб це легковипаровуюче паливо не представляло ніякої небезпеки навколишньому середовищу.

Хоча молекулярний водень має дуже велику щільність енергії за масою (частково через свою малу молекулярну масу), як газ за звичайних умов він має дуже низьку щільністю енергії за об'ємом. При використанні як палива, що зберігається на борту транспортного засобу, чистий водень повинен бути зрідженим або знаходитись під тиском, щоб забезпечити достатню дальність руху. Зі зростанням тиску підвищується і щільність енергії за об'ємом, що робить можливим виготовлення менших, але не легших баків (див. ємності високого тиску). Підтримка високого тиску вимагає більших витрат енергії.

Крім цього, для зручного зберігання може використовуватись рідкий або в'язкий водень, його об'ємна щільність енергії також достатньо висока. Однак, рідкий водень – криогенний, і кипить при температурі 20,268 К (-252,882 ° С або -423,188 °F). При криогенному зберіганні водень має меншу вагу, але зрідження вимагає великих витрат енергії. Процес зрідження є енергоємним, бо містить стадії охолодження та піддання тиску.

Щільність енергії зрідженого водню за об'ємом приблизно в чотири рази нижча, ніж щільність бензину, через малу щільність рідкого водню – насправді водню більше в літрі бензину (116 грамів), ніж у літрі чистого рідкого водню (71 грам). Баки, призначені для зберігання рідкого водню, повинні бути надійно ізольовані, щоб звести до мінімуму можливість скипання. Навколо бака може утворюватися лід і сприяти його роз'їданню у випадку, якщо ізоляція баку з рідким воднем вийде з ладу.

На відміну від зберігання молекулярного водню, водень можна зберігати у вигляді хімічного гідриду або у вигляді інших водневовмісних з'єднань. З метою одержання матеріалу для зберігання водню, який можна буде відносно легко транспортувати, водень у вигляді газу реагує з деякими іншими речовинами. Матеріал для зберігання водню можна змусити розпадатися під час використання під дією водню. Крім проблем, пов'язаних зі щільністю при зберіганні молекулярного водню, існують інші перешкоди введення схем зберігання водню в експлуатацію.

Ці проблеми – результат необхідності високого тиску і температури для формування гідридів та випуску водню. Для багатьох потенційних систем зберігання кінетика гідрування та дегідрування і теплоізоляція – також проблеми, які необхідно вирішити.

Автобуси могли б використовувати водень, що зберігається у депо у кевларових резервуарах для додаткової безпеки. Адже саме, попередні побоювання щодо вибухів резервуарів для водню були зняті завдяки появі баків, обшитих кевларом, та оснащених механізмом викиду водню, що спрацьовує під час удару.

Для зберігання водню під тиском 350–700 атм. (35–70 МПа) зараз використовують полегшені композитні балони, виготовлені з вуглецевого волокна, армованого алюмінієвими або полімерними волокнами.

Для зберігання і перевезення невеликих кількостей стисненого водню при температурах від –50 до +60 0С використовують сталеві безшовні балони малої місткості до 12 дм³ і середньої ємності 20 – 50 дм³ з робочим тиском до 20 МПа. Корпус вентиля виготовляють з латуні. Балони фарбують у темно-зелений колір, вони мають червоного кольору напис «Водень». Балони для зберігання водню достатньо прості й компактні. Однак для зберігання 2 кг Н₂ потрібні болони масою 33 кг.

Прогрес у матеріалознавстві дає можливість знизити масу матеріалу балона до 20 кг на 1 кг водню, а в подальшому можливе зниження до 8 – 10 кг. Поки маса водню при збереженні його в балонах становить приблизно 2 – 3% від маси самого балона. Великі кількості водню можна зберігати у великих газгольдерах під тиском. Газгольдери зазвичай виготовляють з вуглецевої сталі. Робочий тиск у них зазвичай не перевищує 10 МПа.

Внаслідок малої щільності газоподібного водню зберігати його в таких ємностях вигідно лише в порівняно невеликих кількостях. Підвищення ж тиск понад зазначеного, наприклад, до сотень МПа, по-перше, викликає труднощі, пов'язані з водневою корозією вуглецевих сталей, і, подруге, призводить до істотного подорожчання подібних ємностей.

Такі високотехнологічні ємності дуже дорогі. Вартість одного балона співставна з вартістю бюджетного автомобіля. Навіть при 700 атм. водень містить енергії на одиницю об'єму у 4,6 разів менше, ніж бензин, що означає, що розмір водневого баку мусить бути у стільки ж разів більшим .

Заправка транспорту в аеропортах здійснюється на складах централізованої заправки літаків, які відносять до 2 категорії підвищеної небезпеки.

Створення мережі заправних станцій має ключове значення для розвитку ринку нових транспортних засобів на водневому паливі.

Завдяки технології паливних елементів транспорт може бути заправлено всього за 3-5 хвилин на водневій заправній станції. Це відповідає швидкості дозаправки звичайних бензинових або дизельних автомобілів і в рази перевищує швидкість заряджання акумуляторів стандартних електрокарів.

Проте така заправка має певні особливості, а тому повинна відповідати стандартам з техніки безпеки.

Автозаправки бувають 3 типів:

Малі. Вони виробляють близько 20 кг водню в 24 години. Досить для повної заправки 5 легкових автомобілів.

Середні. Виробляють від 50 до 1250 кг палива на добу. Можуть в день заправляти 250 стандартних машин або 25 вантажівок.

Промислові. Виробляють понад 2500 кг чистого водню. Можуть заправляти більше 500 легковиків на добу.



Рис. 3.3 Схема водневої заправки наземного транспорту для гібридного автомобіля

Міжнародна організація з стандартизації (ISO) вже працює над технологіями якості водневого палива. Введення в дію технічної специфікації ISO/TS 19880-1:2016 2016 «Газоподібний водень. Заправні станції. Частина 1. Загальні вимоги» є

важливим орієнтиром в галузі безпеки і продуктивності для водневих заправних станцій.

Він охоплює всі ключові технологічні процеси: від виробництва і доставки водню до його стиснення, зберігання та заправки паливом автомобілів.

У стандарті містяться вказівки щодо таких елементів заправних станцій:

- система виробництва/поставки водню;
- подача водню по трубопроводу, доставка водню в газоподібному і/або рідкому стані на вантажному транспорті або металогідридних причепах-цистернах;
- локальні генератори водню з використанням процесу електролізу води або із застосуванням технології переробки палива;
- система зберігання рідкого водню;
- система очищення водню;
- система стиснення;
- система стиснення газоподібного водню;
- насоси та випарні апарати;
- буферний накопичувач газоподібного водню;
- пристрій для попереднього охолодження;
- дозуючий пристрій для газоподібного водню.

Для наземної авіаційної техніки встановлюється стаціонарна заправка, яка складається з таких основних елементів:

- риформер, або електролізер;
- система очищення водню;
- система зберігання водню;
- компресор (для газоподібного водню);
- диспенсер для роздачі водню кінцевим споживачам.

Перехід водню з рідкого стану в газоподібний пов'язаний з неминучими втратами від випаровування. Вартість і енергозбереження випаровування газу значні. Тому організація використання цього газу з точки зору економіки і техніки безпеки необхідні. За умовами 40 безпечної експлуатації криогенних резервуарів

необхідно, щоб після досягнення максимального робочого тиску в ємності газовий простір становив не менше 5%.

До резервуарів для зберігання рідкого водню висувають ряд вимог: конструкція резервуара повинна забезпечувати міцність і надійність в роботі, тривалу безпечну експлуатацію; витрата рідкого водню на попереднє охолодження сховища перед його заповненням рідким воднем повинен бути мінімальним; резервуар для зберігання має бути забезпечений засобами для швидкого заповнення рідким воднем і швидкої видачі зберігається продукту.

Головна частина криогенної системи зберігання водню – теплоізовані резервуари, маса яких приблизно в 4 – 5 разів менше на 1 кг зберігається водню, ніж при балонному зберіганні під високим тиском. У криогенних системах зберігання рідкого водню на 1 кг водню припадає 6 – 8 кг маси криогенних резервуарів, а по об'ємних характеристиках вони відповідають зберіганню газоподібного водню під тиском 40 МПа.

Щодо транспортування водню до споживача у стисненому стані в умовах централізованого його виробництва, то один трубчатий трак вагою 40 тонн може нести всього 320 кг водню, стисненого до 20 МПа, що становить менше 1% його власної ваги. По суті перевезення водню у стисненому стані є перевезенням тари.

Транспортування дорогами загального призначення такого легкозапалювального та вибухового газу само по собі небезпечне, а тому ємності для транспортування рідкого водню мають подвійний корпус та вакуумну теплоізоляцію і мають високу вартість. Мають місце втрати водню внаслідок випаровування у процесі його зберігання.

3.3. Рекомендації щодо організаційно технологічних заходів впровадження використання водню в авіаційній наземній техніці

Для переведення наземного транспорту авіаліній на водень потрібно провести ряд організаційних та технологічних заходів. Відповідно потрібно провести аналіз та скласти бізнес-план переведення наземного транспорту на водень. З цією метою потрібно:

- визначити, які види транспорту будуть переведені на водень;
- закупити або переобладнати транспорт, який працюватиме на водні;
- розрахувати потребу водню для заправки даних видів транспорту;
- розрахувати кошти для закупівлі та транспортування водню;
- провести тендерні процедури для визначення поставщиків водню та підписати з ними договори;
- виконати технічні вимоги щодо місця зберігання водню (переобладнання складів, резервуарів, закупівля необхідного обладнання і тд.);
- визначити місце для будівництва АЗС;
- побудувати (встановити) АЗС;
- розробити вимоги та заходів щодо безпеки в процесі зберігання, транспортування та споживання водню;
- розробити систему акумулювання, зберігання, транспортування та використання водню;
- визначити службу, відповідальну за заправку наземних видів транспорту;
- розробити посадові інструкції та інструкції з техніки безпеки для працівників служби.

3.4. Висновки до розділу

Ідея використання водню в енергетиці не нова. Ще в 80-і роки ХХ ст. були розроблені двигуни на водневому паливі. Сьогодні в США, в країнах ЄС, в

Японії, Китаї прийняті та реалізуються національні та міжнародні програми по розробці елементів водневої енергетики, в тому числі на відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ), ведеться активна пропагандистська кампанія. У Мадриді, Римі, Амстердамі, Стокгольмі та інших європейських столицях ходять автобуси на водні. Електромобіль з водневим двигуном придбав прем'єр-міністр Японії, а Ісландія практично повністю переходить на водневу енергетику: водневі двигуни встановлюються на катери, автомобілі, джерелами тепла на водні опалюються будинки.

Внаслідок виснаження світових запасів органічного палива, що є головним енергоносієм для невідновлювальної енергетики, перед людством постає завдання своєчасно знайти і навчитися ефективно використовувати нові джерела енергії та енергоносії.

Головним претендентом на роль такого енергоносія є водень. Очікується, що через 10-15 років водень в технічно розвинених країнах почне активно витіснити і поступово витіснить органічні енергоносії з ринку енергії.

У перехідний період для виробництва водню будуть активно використовуватися методи хімічного перетворення органічних енергоносіїв і поступовий перехід на прямі методи його отримання шляхом електролізу.

Вирішальну роль тут може зіграти атомно-водневий комплекс.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1. Експлуатаційне порівняння традиційного палива і водневого

Водень (H_2) – найлегший та широко поширений елемент у Всесвіті. Однак, він рідко зустрічається в чистому вигляді на Землі. Переважно поширені сполуки водню з іншими елементами, наприклад, у вигляді води (H_2O), метану (CH_4) або інших вуглеводнів (C_mH_n). Вугілля може містити водень в розмірі 2-6% від ваги.

Існує багато способів виробництва водню, але промислове значення мають парова каталітична конверсія вуглецевмісних речовин та електроліз води. Конверсія (риформінг) – це ендотермічна реакція вуглецю з водяною парою, в результаті якої отримують синтез-газ – суміш оксиду вуглецю та водню. Співвідношення між оксидом вуглецю та воднем залежить від вихідної сировини. Оксид вуглецю шляхом екзотермічної реакції з водяною парою перетворюють на водень та двоокис вуглецю, який скидають в атмосферу. У синтез-газі присутні також домішки у вигляді метану, що не прореагував, та інших продуктів [11].

Енергетична цінність водню у 3,3 рази менша, ніж метану. Вона менша у 3,2 рази, ніж у природного газу. Це треба враховувати у розрахунках трубопроводів та пальникових пристроїв у разі заміщення природного газу воднем. У процесі застосування водню у котельних установках необхідно дотримуватись особливих вимог техніки безпеки через його високу запалювальну здатність та велику швидкість розповсюдження полум'я. Відомо, що водень загоряється при концентрації від 4% до 74,5% (загоряння метану відбувається при концентраціях від 2,1% до 9,5%), хоча вибухові концентрації для водню значно вищі, ніж для природного газу (між 18,3% до 59 % в концентрації з повітрям для водню в порівнянні з 6,3% - 14% для метану). Застосування водню вимагає по новому підходити до вибору матеріалів, що контактують з даним елементом, тому що він легко вступає в реакцію з багатьма металами, внаслідок чого спостерігається воднева крихкість металів. Існуючі газові мережі непридатні для транспортування чистого водню. Водневі трубопроводи потребують інших матеріалів, іншої

технології зварювання, компресорів, сенсорів, засобів безпеки. Збільшується можливість витікання його через нещільності у з'єднаннях та арматурі внаслідок великого тиску. У світі на 2016 рік нараховувалося всього 4,5 тис. км водневих трубопроводів, з них у США – 2,6 тис, у решті країн – по декілька сотень кілометрів [11].

Енерговміст водню в перерахунку на вагу досить високий (1 кг H_2 еквівалентний 2,1 кг природного газу або 2,8 кг бензину), але в перерахунку на одиницю об'єму він має найменший енерговміст (1 л H_2 в газоподібній формі при атмосферному тиску містить 2,8 ккал, в зрідженому вигляді 2030 ккал у порівнянні з майже 5000 ккал для 1 л природного газу або 7534 ккал для бензину). Для того, щоб підвищити енерговміст одиниці об'єму або ваги водню доводиться його переводити в зріджену форму. Це вимагає великих витрат енергії (охолодження до $-253^\circ C$) або стиснення до високого тиску (300-500 та більше атм.), що робить водень важким для зберігання і транспортування [11].

4.2. Отримання, транспортування, зберігання водневого палива

Водень, подібно електроенергії, є енергоносієм, але не енергоресурсом, оскільки він не існує в природному вигляді у докількі. Отримання водню засновано на використанні сировини: води, вуглеводнів або інших природних матеріалів, що містять водень в зв'язаному вигляді.

Виробництво водню вимагає витрат енергії, одержуваної з інших джерел: згоряння органічного палива, ядерної енергії або поновлюваних видів енергії (гідроенергія, енергія вітру або сонця, біомаса). Енерговміст водню завжди менше енергії, витраченої на його виробництво, а коефіцієнт корисної дії процесів отримання водню становить від 20% до 80%.

На даний час водень використовується в основному для виробництва хімічних продуктів, а не як енергоносіє. У 2013 р світове виробництво водню оцінювалося більш, ніж в 40 млн. тонн. Майже половина з цієї кількості отримано з природного газу на основі парової конверсії метану (ПКМ). Одна третина отримана та спожита в

нафтопереробці. На метод газифікації вугілля припадає близько 20% одержуваного водню. Електроліз забезпечує тільки 4% річного виробництва водню. Близько 60% одержуваного водню використовується у виробництві аміаку, 30% – в нафтопереробній та приблизно по 10% для отримання метанолу та інших продуктів [12].

При згорянні в повітряному середовищі водень утворює воду (H_2O). Тому вважається, що водень є екологічно чистим паливом, хоча в дійсності це не зовсім коректне твердження, тому що викиди забруднюючих речовин можуть відбуватися не на кінцевій стадії використання водню, а в процесі його виробництва, транспорту і зберігання. Лише в комбінації з ядерною енергією або поновлюваними джерелами водень може розглядатися як досить "чистий" енергоносіє.

У технології виробництва стисненого водню парової конверсією метану питомі витрати на 1 кг H_2 складають: природного газу – 5,0-5,5 куб. м; води – 4-4,5 кг; електроенергії – 0,7-0,9 кВт/год. Викиди CO_2 з урахуванням втрат природного газу при магістральному транспорті та виробленні електроенергії в енергосистемі досягають 9,5 кг на 1 кг H_2 .

В силу своїх фізико-хімічних властивостей особливого значення набувають проблеми транспортування і зберігання водню. В нормальних умовах 1 кг водню займає обсяг 11 куб. м. У порівнянні з бензином одиниця ваги водню має в 3 рази більший тепловміст, але в одиницях об'єму – лише одну чверть від бензину. З цією метою використовують різні методи зменшення обсягу H_2 . Це може бути досягнуто за рахунок підвищення тиску, переведення газоподібного водню в рідку фазу, використання абсорбційних властивостей деяких металів, застосування спеціальних вуглецевих матеріалів для зберігання водню та ін.

Енергетичний вміст палив, які використовуються або можуть використовуватися як моторні, показано на рисунку (рис. 1.3) [13]. На практиці у разі використання стисненого природного газу як моторного палива він стискується у ємностях до 20 МПа. Виходячи із співвідношення теплотворних спроможностей природного газу та водню (3,2), для однакового запасу енергії на борту транспортного засобу потрібно забезпечити тиск водню 64 МПа. Для зберігання

водню під тиском 350-700 атм. (35-70 МПа) зараз використовують полегшені композитні балони, виготовлені з вуглецевого волокна, армованого алюмінієвими або полімерними волокнами. Такі високотехнологічні ємності дуже дорогі. Вартість одного балона співставна з вартістю бюджетного автомобіля. Навіть при 700 атм. водень містить енергії на одиницю об'єму у 4,6 разів менше, ніж бензин, що означає, що розмір водневого баку повинен бути у стільки ж разів більшим [14]. Розміщення такої ємності на автомобілі є незручним та небезпечним. Крім того, біля 10-15% енергії водню витрачається на компресію. Енергетичні витрати для сучасного багатостадійного компресора дорівнюють близько 5 кВтг на 1 кг стисненого до 70 МПа водню, що в перерахунку на первинну енергію за ККД генерації 33% становить як мінімум 50 МДж/кг, тобто 35% об'єму водню [3]. Щодо транспортування водню до споживача у стисненому стані в умовах централізованого його виробництва, то один трубчатий трак вагою 40 тонн може нести всього 320 кг водню, стисненого до 20 МПа, що становить менше 1% його власної ваги. По суті перевезення водню у стисненому стані є перевезенням тари. Для порівняння, такий трак може нести 26 тонн бензину, енергетична ємність якого у 20 разів більша, ніж у водню. Транспортування дорогами загального призначення такого легкозапалювального та вибухового газу є небезпечним.

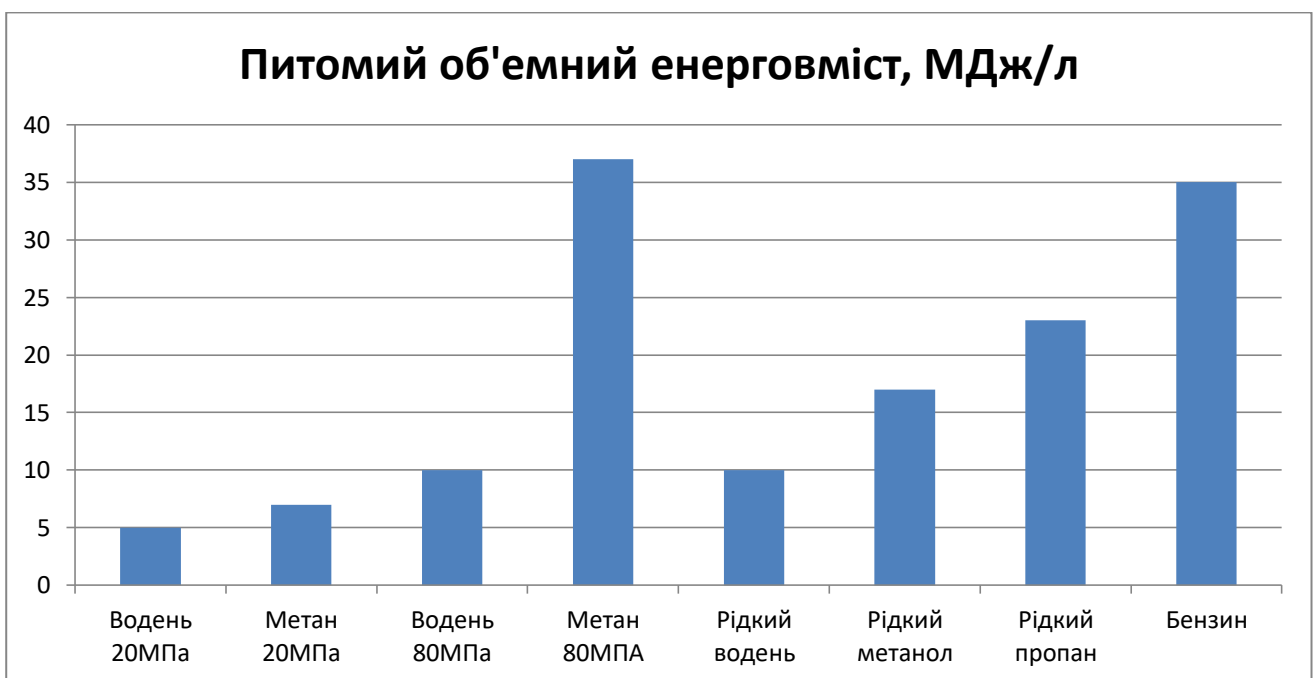


Рис. 4.1 – Енергетичний вміст деяких моторних палив

На даний час стиснений водень зазвичай зберігається в стандартних балонах по 50 л або в сферичних ємностях об'ємом 15 тис. м³ і більше при тиску близько 200 атм. Існують проекти зберігання стисненого водню в трубах. Однак через свою високу вартість обсяг зберігання в трубчастих системах зазвичай не перевищує 14 тис. м³. Для зберігання компресованого водню використовують підземні сховища, які є кращими при великих обсягах і тривалому зберіганні H₂. При великих обсягах зберігання слід мати на увазі, що відбувається утворення великої «подушки» газу при зниженні тиску до атмосферного. Для витіснення такої «подушки» використовуються соляні розчини.

У системах зберігання водню в рідкій фазі використовуються спеціальні методи переходу газоподібного водню в рідкий стан при температурах нижче -253°C. Для цього водень стискають, потім охолоджують і швидко розширюють, що призводить до різкого падіння температури та утворення рідини. У зв'язку з надзвичайно низькими температурами велику проблему в таких системах являє випаровування рідкого водню, яке досягає 2-3% за добу в малих системах і 0,1% за добу в великих сферичних ємностях. Швидкість випаровування залежить від поверхні ємності, в якій зберігається рідкий водень [15].

4.3. Вибухонебезпечність водню

Безпека водню охоплює безпечне виробництво, обіг і використання водню, особливо газоподібного водневого палива та рідкого водню. Основна проблема при роботі з воднем - займистість.

Водень має найвищу оцінку 4 бали за шкалою займистості NFPA 704, тому що він легко запалюється при змішуванні навіть в невеликих кількостях зі звичайним повітрям; займання може відбуватися при об'ємному відношенні водню до повітря всього 4% через наявність кисню в повітрі, а також простоті хімічних властивостей реакції. Однак водень не має оцінки вродженої небезпеки по реактивності або токсичності. Зберігання та використання водню створюють унікальні проблеми через його легкість витоку в якості

газоподібного палива, низькоенергетичного займання, широкого діапазону горючих паливно-повітряних сумішей, плавучості та його здатності охрупчувати метали, що необхідно враховувати для забезпечення безпеки.

Рідкий водень створює додаткові проблеми через його підвищену щільності і надзвичайно низькі температури, які необхідні для збереження його в рідкій формі.

Межі вибуховості водню в повітрі від 18,3 до 59 відсотків за обсягом.

Полум'я всередині і навколо труб або конструкцій може створювати турбулентність, яка призводить до того, що горіння переростає в детонацію, навіть при відсутності сильного стримування.

Водень не має запаху, кольору і смаку, тому людські почуття не допоможуть виявити витік. Для порівняння: природний газ також не має запаху, кольору і смаку, але промисловість додає сірковмісний одорант, званий меркаптанам, щоб його могли виявити люди. В даний час всі відомі одоранти забруднюють паливні елементи (популярне застосування водню) [21].

Однак, з огляду на схильність водню до швидкого зростання, витік водню в приміщенні ненадовго накопичується на стелі і в кінцевому підсумку переміщається до кутів і далеко від місць, де можуть бути люди. З цієї та інших причин промисловість часто використовує датчики водню для виявлення витоків водню і десятиліттями підтримує високі показники безпеки з їх допомогою.

Дослідники вивчають інші методи, які можуть бути використані для виявлення водню: індикатори, нова технологія одорантів, вдосконалені датчики та ін.

Витік водню можуть сприяти горінню при дуже низьких витратах, всього 4 мкг/с. Рідкий водень «конденсованого і затверділого атмосферного повітря або сліди повітря, накопичені при виробництві, забруднюють рідкий водень, тим самим утворюючи нестабільну суміш. Ця суміш може вибухнути з ефектами, аналогічними до ефектів, які має тринітротолуол (TNT) та іншими вибухонебезпечними матеріалами.

Водень використовується в промисловості десятиліттями, - можливо, це новий енергоносіє, але точно не новий газ. Його властивості давно і добре вивчені - вони серйозно відрізняються і від метану, і від пропану, і від бензину.

Водень при суміші з повітрям утворює вибухонебезпечну суміш - гримучий газ.

Найбільшу вибухонебезпечність - при об'ємному відношенні водню і кисню 2:1, або водню і повітря наближено 2:5, так як в повітрі кисню міститься приблизно 21%.

Можливість утворення воднем вибухонебезпечних сумішей робить його набагато небезпечнішим за природний газ.

До початку запуску будь-якого обсягу водню в мережу в промислових масштабах необхідно провести кампанію по навчанню споживачів - аж до того, що кожен підпише документ про ознайомлення з ризиками роботи з таким видом газу, який є більш вибухонебезпечним через більш легке утворення небезпечної концентрації та ін.

На думку спеціалістів [37], таке навчання повинна буде організувати держава, із залученням фахівців, здатних говорити з кожним і пояснювати складні речі зрозумілою мовою. Потреба у подібному навчанні не є особливістю лише України.

По-друге, одна з основних вимог по експлуатації водню в промисловості – датчики загазованості в кожному приміщенні, де буде встановлений споживчий прилад.

На його дослідників [38], це можуть бути датчики з виходом через GSM-мережі. Також розглядається застосування віддаленого клапана-відсікача поставки водню в конкретне приміщення.

Безпека водневих технологій - важлива складова частина національних водневих програм. Наприклад, в рамках європейської програми FCH JU існує ініціатива European Hydrogen Safety Panel.

Глобальний характер водневої економіки майбутнього вимагає посилення міжнародного співробітництва - в тому числі, гармонізації національних

стандартів по всьому технологічному ланцюжку при активній участі постачальників водню, обладнання для його виробництва, зберігання, транспортування, користувачів водню, незалежних експертів, організацій з нагляду за безпекою продукції і т.д. Тому у технічне регулювання - ключова роль в справі забезпечення безпеки водневих технологій. Стандартизацією на міжнародному рівні займається профільний комітет ISO - ISO / TC 19788 [49].

4.4. Висновки до розділу

В умовах зростаючого світового попиту на енергетичні ресурси, вичерпання викопних видів палива та зростаючого рівня забруднення довкілля необхідним є ефективний пошук нових (альтернативних) енергетичних технологій, які б забезпечували прийнятний рівень забруднення і одночасно сприяли економічному зростанню країни.

Визначено, що наземний транспорт є одним із найбільших забруднювачів атмосферного повітря у світі. До основних та перспективних напрямків зниження обсягів викидів шкідливих речовин у атмосферне повітря слід віднести використання альтернативних джерела енергії, зокрема водню. Водень – штучне паливо, яке у чистому вигляді в природі відсутнє. Сировиною для виробництва водню можуть бути метан, інші вуглеводневі гази, нафта, вугілля, біопалива, тобто для виробництва в достатній кількості екологічного, водневого палива необхідно витратити багато енергії на його виробництво з можливими викидами шкідливих газів в атмосферу.

Встановлено, що теплотворна спроможність водню у 3,2 рази менша за теплотворну спроможність природного газу. Він має набагато ширші межі запалювання та більшу швидкість розповсюдження полум'я у порівнянні з природним газом, характеризується високою проникністю та призводить до водневої корозії металів. Системи транспортування водню потребують спеціального проектування, а використання його як палива – особливих заходів безпеки.

Водень можна вважати паливом майбутнього. У багатьох країнах світу дослідження з водневої енергетики є пріоритетними напрямками розвитку науки. Вони забезпечуються фінансовою підтримкою і держави, і бізнесових структур. Основною метою розвитку водневих технологій є зниження залежності від традиційних енергоносіїв – нафти, газу і вугілля. Ключовою умовою переходу до водневої енергетики є пошук і створення надійних та економічно доцільних паливних елементів на основі водню. Воднева енергетика є саме таким напрямом, який завдяки високій технологічності та наукоємкості дозволить вийти на рівень розробок енергоефективних та екологічно чистих технологій майбутнього.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Вступ

В хімічній лабораторії існує велика кількість небезпечних факторів, які можуть негативно впливати на організм людини, що працює в такому приміщенні. Ці фактори можуть призвести до захворювань або інших шкідливих наслідків. При плануванні та організації роботи лабораторії необхідно враховувати усі фактори, щоб умови праці відповідали усім затвердженим нормам з охорони праці. Задачі охорони праці – це звести до мінімальної імовірності враження чи захворювання людини, яка працює, з одночасним забезпеченням максимального комфорту та продуктивності праці.

5.2. Аналіз умов праці на робочому місці

5.2.1. Організація робочого місця

Робоче місце – територія постійного або тимчасового знаходження людини у процесі праці.

Параметри хімічної лабораторії: довжина приміщення – 7,56 м; глибина приміщення – 6,6 м; висота – 2,97 м; площа приміщення – 49,9 м²; об'єм приміщення – 148,2м³.

Нормами регламентується на кожного працівника: мінімальний об'єм приміщення - 15 м³; мінімальна площа - 4,5 м²; мінімальна висота - 3,2 м.

В приміщенні працювало 4 особи. На кожну приходилось по 12,5 м² підлоги, що відповідає санітарним нормам СН 245-71.

З методики виконання кваліфікаційної роботи видно, що для проведення експерименту використовувались різноманітні хімічні реагенти та матеріали, скляний хімічний лабораторний посуд, електрична енергія.

Для студента при виконанні кваліфікаційної роботи у лабораторії шкідливими та небезпечними виробничими чинниками є:

- параметри повітря робочої зони;
- виробничий шум;
- виробниче освітлення;
- враження електричним струмом;
- пожежна небезпека.

5.2.2. Мікроклімат виробничих приміщень

Мікроклімат виробничих приміщень - це умови внутрішнього середовища цих приміщень, що впливають на тепловий обмін працюючих з оточенням. Як фактор виробничого середовища, мікроклімат впливає на теплообмін організму людини з цим середовищем і, таким чином, визначає тепловий стан організму людини в процесі праці.

Для забезпечення допустимої температури у холодний період року необхідно прийняти міри по підігріву повітря (підключення додаткових джерел тепла).

Значення параметрів мікроклімату суттєво впливають на самопочуття та працездатність людини і, як наслідок цього, рівень травматизму.

Нормативні і фактичні значення параметрів мікрокліматичних умов відповідно ДСН 3.3.6.042-99 для лабораторії наведені в таблиці 10.

Таблиця 5.1.

Санітарні норми параметрів мікроклімату в лабораторії

| Період року | Категорія робіт | Температура повітря, °С | Відносна вологість, % | Швидкість руху повітря, м/с |
|-------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Холодний | Середньої важкості 2А | 20 | 55 | 0,2 |

Оптимальні мікрокліматичні умови – це такі параметри мікроклімату, які при тривалому і систематичному впливі на людину забезпечують нормальний тепловий стан організму без напруги і порушення механізмів терморегуляції.

Мікроклімат в лабораторії відповідає нормам та ДСН 3.3.6.042 – 99.

5.2.3. Виробничий шум

Основним джерелом виробничого шуму в лабораторії є витяжна шафа. Рівень звукового тиску в джерелі становить 75 дБА.

Допустимі рівні звукового тиску на робочих місцях в лабораторії згідно ДСН.3.3.6.037-99 (висококваліфікована робота, що вимагає зосередження: робочі місця в лабораторіях) - 60 дБа.

Зниження шуму досягається використанням таких заходів:

- зниження шуму в джерелі створення (малошумні механічні передачі, розроблення способів зниження шуму у вентиляторах);
- раціональне планування роботи працівників лабораторії;
- раціоналізація режимів праці та відпочинку;
- застосування індивідуальних засобів захисту (наушники, заглушки).

Допустимі рівні звукового тиску і рівню звуку на робочих місцях в лабораторії відповідає ДСН.3.3.6.037-99 [48. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - К., 1999. - 34 с].

5.2.4. Природне та штучне освітлення

Недостатнє та нераціональне освітлення веде до втомлення очей, розладу центральної нервової системи, зниженню розумової та фізичної працездатності, а у ряді випадків може бути причиною травматизму (близько 5% травм приходить на частку нераціонального та недостатнього освітлення).

У лабораторії використовується природне та штучне освітлення. Природне освітлення є боковим. Штучне освітлення - загальне, рівномірне, люмінесцентне.

Дослідження за характером зорової роботи відносяться до робіт високої точності з об'єктами розрізнення 0,3-0,5 мм, розряд зорової роботи III, підрозряд

зорової роботи «г». КПО при верхньому та комбінованому освітленні 3,0%, при бічному – 1,2%.

Для штучного освітлення при зорових роботах з високою точністю (найменший розмір об'єкта розрізнення - 0,3-0,5 мм; контраст об'єкта з фоном - великий; характеристика фону - середній) освітленість при системі комбінованого освітлення 400 лк, а при системі загального освітлення 200 лк.

У лабораторії встановлено 4 вікна, які забезпечують двостороннє бокове освітлення. Коефіцієнт світлового клімату, $m=0,85$. Для зменшення недостатності природнього освітлення у приміщенні встановлене штучне освітлення.

Для штучного освітлення використовують люмінесцентні лампи АД-1,5, напругою мережі 220 В, світловим потоком 11000 лм, які вмонтовані в пилогазоохоронні світильники типу ПВМ-1-2х40. Освітлення в витяжній шафі проводиться також світильником НОБ-300. Нормативне значення освітлення в лабораторії 300 лк.

Кольорове оформлення лабораторії і обладнання відповідає нормам відносно СН 18140. Стеля та стіни мають світлі кольори.

Умови освітлення лабораторії задовольняють вимогам ДБН В.2.5-28-2006[49. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. - К.: Мінбуд України, 2006. - 96 с].

5.2.5. Електробезпека

У лабораторії встановлені електроприлади, які підключені до електромережі. Це нагрівальні елементи (електричні бані), мішалки. Приміщення відноситься до приміщень без підвищеної небезпеки. Електробезпека у лабораторії забезпечується конструкцією електроприладів, технічними пособиями та засобами захисту, організаційними та технічними заходами (ГОСТ 12.1.019-79 Система стандартів безпеки труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты (с Изменением N 1)

Гранично допустимий рівень напруженості діючого електричного поля

встановлено рівним 25кВ/м. перебування у електричному полі з напругою більше 25 кВ/м без застосування засобів захисту є недопустимим (ГОСТ 12.1.002-84 Система стандартів безпеки труда (ССБТ). Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах)

Електробезпека - система організаційних заходів та засобів, що направлена на захист людей від шкідливої та небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електричного поля, та статичної електрики.

На підприємстві наказом з числа інженерно-технічних працівників повинна бути призначена особа, що відповідає за справний стан і організацію безпечного виконання робіт з експлуатації та монтажу електрообладнання.

Наказ про призначення особи, що відповідає за справний стан і організацію безпечного виконання робіт з експлуатації та монтажу електрообладнання, видається після перевірки знань правил та інструкцій, присвоєння IV групи з електробезпеки в електроустановках з робочою напругою до 1000 В або V групи з електробезпеки в електроустановках з робочою напругою понад 1000 В[51.

Керб Л. П. Основи охорони праці: Навч.-метод. посібник для самост. вивч. дисц. - К.: КНЕУ, 2001.- 252 с].

5.3. Пожежна безпека

При виконанні кваліфікаційної роботи в лабораторії використовувались горючі матеріали - тому приміщення відноситься до категорії «В» (НАПБ Б.07.005-86.), а робоча зона до класу П-Па (ПУЕ) - зони приміщень, в котрих є тверді або волокнисті горючі речовини, горючий пил і волокна не виділяються. Робоча зона за вибухонебезпекою відноситься до класу 0 – простір, у якому вибухонебезпечне середовище є постійно або протягом тривалого часу (відповідно до ДНАОП 0.00-1-32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок»).

До можливих причин виникнення пожежі при виконанні кваліфікаційної роботи відносяться:

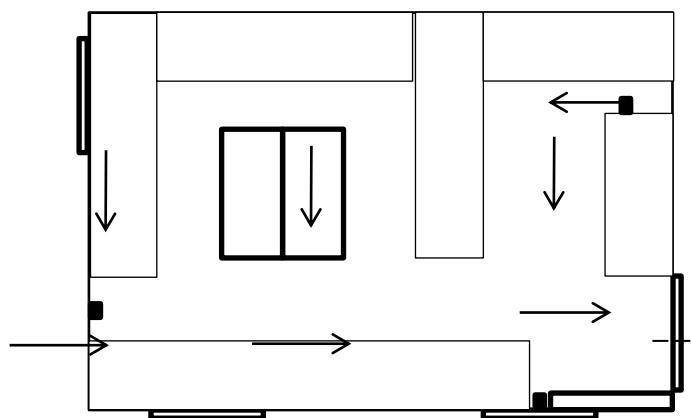
- порушення режимних вимог;
- необережне поводження з вогнем;
- несправність і неправильна експлуатація електроустаткування;
- розряди статичної та атмосферної електрики (прямий удар блискавки в споруду);
- вибухи парів, газів і пилу;

Будівля, в якій знаходиться лабораторія, збудована з негорючого матеріалу, II ступеню вогнестійкості.

Приміщення лабораторії забезпечено:

1. Для усунення виникаючих осередків пожеж у лабораторії передбачений ящик з піском об'ємом $0,5 \text{ м}^3$, лопата, вуглекислотні вогнегасники марки ВП-5, захисна маска, пожежне покривало розміром $2 \times 2 \text{ м}$. Для відводу статичних зарядів всі металічні та електропровідні неметалічні частини обладнання заземлені. Для попередження генерації і накопичення зарядів статичної електрики в лабораторії не використовується синтетичний одяг.

2. У випадку виникнення пожежі, евакуація із лабораторії здійснюється відповідно до плану. На рис. 5.1. наведений план евакуації на випадок пожежі в лабораторії.



→ – Напрямок руху під час евакуації; ● – Засоби пожежогашіння

Рис. 5.1. – План евакуації на випадок пожежі в лабораторії

5.4. Розробка заходів з охорони праці

Створення оптимальних метеорологічних умов у виробничих приміщеннях є складною задачею, вирішити яку можна наступними заходами та засобами:

- Удосконалення технологічних процесів та устаткування.
- Раціональне розміщення технологічного устаткування.

Основні джерела теплоти бажано розміщувати так, щоб теплові потоки від них не перехрещувались на робочих місцях.

В приміщенні хімічної лабораторії для підтримання чистоти повітря передбачені проточна та витяжна системи вентиляції. Це дозволяє видаляти перегріте повітря із всього об'єму приміщення. Чисте повітря, потрапляє через кватирки. Також в лабораторії встановлена витяжна шафа для роботи з шкідливими речовинами.

У вентиляційній системі рух повітря проходить по схемі: зверху-вниз, повітряний баланс негативний. Швидкість руху повітря 0,2 м/с.

Для нормалізації повітря робочої зони передбачено спеціальні заходи, засоби, прилади та методи, в тому числі:

- всі операції зі шкідливими речовинами проводяться при увімкненій системі загальної та локальної вентиляції;
- згідно методики виконання кваліфікаційної роботи передбачено вентилювати стерильним повітрям приміщення та обладнання, на протязі, не менш ніж 30 хвилин.

Температуру повітря в лабораторії вимірюють за допомогою ртутного термометра, а відносну вологість визначають стаціонарним психометром.

5.5. Вибір засобів пожежної сигналізації

Первинні засоби пожежегасіння призначені для ліквідації невеликих осередків пожеж, а також для гасіння пожеж у початковій стадії їхнього розвитку силами персоналу об'єкта до прибуття підрозділів пожежної охорони.

До первинних засобів пожежегасіння відносяться: вогнегасники, пожежний інвентар (бочки з водою, пожежні відра, ящики з піском, совкові лопати, протипожежні покривала) та пожежний інструмент (гаки, ломи, сокири тощо).

Необхідна кількість вогнегасників та їх тип визначаються залежно від їх вогнегасної спроможності, площі та категорії приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою, а також класу пожежі, горючих речовин та матеріалів у приміщенні або на об'єкті.

Лабораторія, у якій проводилися випробування кваліфікаційної роботи, має площу 49,9 м². Оскільки у лабораторії використовувались горючі матеріали - тому приміщення відноситься до категорії «В» за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Розмір осередку можливої пожежі – незначний.

Оскільки розмір осередку можливої пожежі очікується незначний, приймаємо рішення про оснащення приміщення переносними вогнегасниками.

Таблиця 5.2.

Вибір вогнегасників для оснащення виробничого приміщення

| 1. | Види вогнегасників | Переносний вуглекислотний | | Порошковий |
|----|---|---------------------------|--------|------------|
| 2. | Типи вогнегасників | ВВК-3,5 | ВВК-5 | ВП-5 |
| 3. | Їх кількість для площі 49,9 м ² | 8 | 8 | 3 |
| 4. | Загальна кількість вогнегасників для нашого приміщення площею 50 м ² | 8 | 8 | 3 |
| 5. | Коефіцієнт ефективності вогнегасника для пожежі класу В | 3 | 3 | 8 |
| 6. | Сумарний коефіцієнт ефективності для всіх вогнегасників | 8*3=24 | 8*3=24 | 3*8=24 |
| 7. | Прийнятий тип вогнегасників | | | + |

Враховуючи зручність експлуатації вогнегасників, та облаштування місць їх розташування, приблизно рівноцінними є ВВК-3,5 та ВВК-5 як по кількості так і по сумарному коефіцієнту ефективності вогнегасників, і їх необхідна кількість – 8 шт –

є дещо забагато для такої площі приміщення, а необхідна кількість ВП-5 - 3 шт. Отже, остаточно вибираємо з усіх можливих варіантів оснащення лабораторії вогнегасниками типу ВП-5 в кількості 3 шт.

5.6. Висновки до розділу

Для оснащення лабораторії, яка за вибухопожежною та пожежною небезпекою належить до категорії В, клас можливої пожежі В, вибрано до установки 3 порошкових вогнегасників типу ВП-5.

Були розглянуті фактори впливу на організм людини, а саме, шкідливий вплив шуму, освітлення, ураження електричним струмом. Розглянута пожежна безпека та план евакуації у разі виникнення пожежі, а також розрахована необхідна кількість вогнегасників у приміщенні з заданим класом небезпеки, площею, та класом пожежі. З урахуванням усіх даних, можна зробити висновок, що для комфортної та безпечної роботи у лабораторії необхідно встановити вогнегасники ВП-5 у кількості 3 шт. Також необхідно врахувати застереження, що порошкові вогнегасники слід застосовувати після евакуації людей з приміщення.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано вартість водню отриманого різними методами і показано що найдешевшим є конверсія природного газу, однак враховуючи світові стратегії по впровадженню альтернативних енергетичних ресурсів доцільно розглядати в перспективі використання отримання водню за допомогою сонячних батарей.

Проведено SWOT-аналіз впровадження водню в авіаційну наземну техніку і показано що на сьогоднішній день є суттєві підстави розгляду водню як енергоносія в аеропортах.

Проведена оцінка безпеки водню в якісному порівнянні з традиційними енергоносіями і показано що водневому паливу притаманна пожежовибухонебезпечність, зокрема швидкість горіння, детонація, діапазон загорання. Це потребує розробки і впровадження додаткових організаційних і технологічних заходів в авіаційних наземних службах.

Проведено аналіз авіаційної наземної техніки аеропорту і показано що в першу чергу може бути рекомендовано переведення легкових автомобілів на водневе паливо.

Проведений аналіз особливостей переведення автомобілів на водневе паливо і встановлена можливість впровадження як гібридного автомобіля с водневим паливом та традиційним, так і на чистому водневому паливі.

Наземний транспорт, що забезпечує авіаобслуговування, є комплексом авіаційних перевезень та робіт, спрямованих на забезпечення експлуатації та обслуговування повітряних суден кондиційними авіаційними та спеціальними рідинами, приймання, збереження, підготовку та видачу та на заправлення спеціальними та авіаційними рідинами. Наземна логістика в аеропортах через масовість свого використання чинить забруднення навколишнього середовища при застосуванні вуглецевого палива. На сьогодні авіація відповідає за 3,6% викидів парникових газів в ЄС. Для того, щоб здійснити наземне обслуговування потрібна велика кількість пального та електричної енергії, звичайно було б доцільніше його замінити на водень, який є чистішим та має безліч джерел добування та одержання.

З усіх відомих методів отримання водню можемо виділити що конверсія природного газу є найдешевшою, але якщо ставити на перспективу зменшити видики в атмосферу, доцільніше буде використання сонячної та вітрової енергії.

Узагальнюючи інформацію про водневе паливо, можна зробити висновок що сильних сторін більше ніж негативних.

Для розвинення і впровадження по використанню водневого палива необхідно вдосконалювати систему видобутку та безпечного споживання водню як палива.

Поступове експериментальне впровадження може починатися навіть в невеликих масштабах.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Степанов А.В., Кухарь В.П. Достижения энергетики и защита окружающей среды. – Киев: Наук. думка, 2004. – 206 с.
2. Гутаревич Ю.Ф. Екологія та автомобільний транспорт : навч. посібн. / Ю.Ф. Гутаревич, Д.В. Зеркалов, А.Г. Говорун, А.О. Корпач, Л.П. Мержиєвська. – Вид. 2-ге, [перероб. та доп.]. – К. : Вид-во "Арістей", 2008.
3. Мордков В.З. Материалы Международного форума по водородным технологиям для производства энергии (6-10 февраля 2006 г.). – М.: РУСДЕМЭнергоэффект, 2006. – 122 с.
4. Статистический ежегодник мировой энергетики (Enerdata), 2020 [online]. Доступно: <https://yearbook.enerdata.ru/>.
5. Директива Європейського Парламенту та ради 2009/28/ЄС від 23 квітня 2009 року про заохочення до використання енергії, виробленої з відновлювальних джерел. [Електронний ресурс]: Офіційний вісник Європейського союзу – Режим доступу: http://saee.gov.ua/documents/dyrektyva_2009_28.pdf.
6. Асланин Г.С. Проблематичность водорода в плане замещения нефти. / Энергетическая политика, вып.2, – 2006, с. 42-51.
7. Войцицький А.П. Техноекологія. / Войцицький А.П., Дубровський В.П., Боголюбов В.М. – К: Аграрна освіта, 2009. – 533 с.
8. Архіпова Г.І. Аналіз впливу відпрацьованих автомобільних газів на стан атмосферного повітря в густонаселених районах / Г.І. Архіпова, І.С. Ткачук, Є.І. Глушков // Вісник НАУ. – 2009. – № 1.
9. Аксенов И.Я., Аксенов В.И. Транспорт и охрана окружающей среды. – М.: Транспорт, 1989.
10. Клименко М.О. Моніторинг довкілля: Підручник / Прищеп А.М. – К.: Видавничий центр «Академія», 2006.
11. Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию. Сколково: Центр энергетики Московской школы управления Сколково. 2019. 60 с.

12. Аслабян Г.С., Реутов Б.Ф. Проблематичность становления водородной энергетики. Теплоэнергетика. 2006. № 4. С.66-73.
13. Armaroli N., Balzani V. The Hydrogen Issue (Review). European journal of chemical physics and physical chemistry. 2011. Pp. 21–36. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.201000182>.
14. Grube T., Hohlein B. Costs of Making Hydrogen Available in Supply Systems Based on Renewables. Hydrogen and Fuel Cells. Springer, 2016. P. 223-237.
15. Seddon S. Fuel Cell Conference Report / Institute of International Research Conference on fuel Cell Vehicles. – February 22, 1999. – P. 35-38.
16. Challenges for Japan’s Energy Transition. Basic Hydrogen Strategy. Agency for Natural Resources and Energy (ANRE), Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). October 2018, Japan. 120 с.
17. Водень в авіації: наскільки це близько. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://www.airbus.com/newsroom/stories/hydrogen-aviation-understanding-challenges-to-widespread-adoption.html> Дата звернення 07. 11. 2020.
18. Наземне обслуговування. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://avia.gov.ua/nazemne-obslugovuvannya/> Дата звернення 07. 11. 2020.
19. Водородная энергетика и топливные элементы. Взгляд в будущее / Европейская комиссия, - 2003.с.18.
20. Пономарев-Степной Н.Н., Столяревский А.Я. Атомно-водородная энергетика. Пути развития. / Энергия - 2004, - №1, с.3-9. [5]. Водородная энергетика: себестоимость производства // Стаття. Електронний ресурс. Режим доступу: URL: <http://www.investo.ru/forum/viewtopic.php>.
21. Перспективи застосуванню водню як альтернативного джерела водню. УДК. 661. 931. Збірник наукових праць Вінницького національного університету. Гуцаленко О. В. Василенко Т. С. №1. 2014. С.194-196. Режим доступу URL: file:///C:/Users/Michael/Downloads/znprvnutn_2014_1_31.pdf

22. Паливні клітини: екологічний друг та ворог. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://physicsworld.com/a/fuel-cells-environmental-friend-or-foe/> Дата звернення 11. 09. 2020.
23. Кузык Б. Н., Кушлин В.И., Яковец Ю. В. На пути к водородной энергетике / РАН. - Москва. - 2005.
24. Основи водневого палива. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fuel-basics> Дата звернення 18. 10. 2020.
25. Воднева енергетика. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <http://uahe.net.ua/articles-ua/331-vodneva-energetika-perspektivi-ukrajini.html> Дата звернення 13. 11. 2020.
26. Роль водню та паливних елементів у світовій енергетичній системі. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c8ee01157e#!divAbstract> Дата звернення 15. 10. 2020.
27. Інфраструктура рідкого водню аеропорту для допоміжних енергоблоків літаків. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Airport-Liquid-Hydrogen-Infrastructure-for-Aircraft-Still-Grube/9a7b4b8f19ccc1241ecd219cbc3f0e6824b888f2> Дата звернення 08. 11. 2020.
28. Воднева економіка та паливні комірки. // Громадська Рада України, - 2005. С.180-181.
29. Переваги водню та стійка енергетична економія. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://www.hydrogenenergycenter.org/benefits-of-the-hydrogen-economy> Дата звернення 19. 11. 2020.
30. Чи екологічні паливні елементи? Science Daily. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2015/07/150715113313.htm> Дата звернення 2.11. 2020.
- 31 Г. С. Асланин. Проблематичность водорода в плане замещения нефти./ Энергетическая политика, вып.2, -2006, с. 42-51.

32. Варшавський І. Л., Мищенко А. І. Аналіз роботи поршневого двигателя на водороді. Известия вузов №10. –М.: Машиностроение, 1977.

33. С. Лиговский. Газификация негорючих углеродистых материалов - неисчерпаемый источник водорода (синтез-газа). Электронный ресурс. Режим доступа URL: // <http://www.knp-klub.ru/articles/ksb/10.2004/gazification.htm>
[19] Тьерри Алло. Водородная энергетика в Западной Европе / Энергия. - 2002. - № 12. С.25-27.

34. Водень для транспортування, опалення та енергетика. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2019/06/14/648620/> 12. 10. 2020.

35. Воднева енергія для аерокосмічної промисловості. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://energies.airliquide.com/clean-transportation-passenger-transport/hydrogen-energy-aerospace-industry> Дата звернення 14. 11. 2020.

36. Тихо та зелено: чому водневі літаки можуть бути майбутнім авіації. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://horizon-magazine.eu/article/quiet-and-green-why-hydrogen-planes-could-be-future-aviation.html>
Дата звернення 1. 11. 2020.

37. Технологічне прогнозування матеріалів для зберігання водню з використанням патентних показників. Електронний ресурс. Режим доступу URL: https://www.researchgate.net/publication/308042711_Technological_forecasting_of_hydrogen_storage_materials_using_patent_indicators. Дата звернення 19. 09. 2020.

38. Підготовка до майбутнього водню. Електронний ресурс. Режим доступу URL: <https://www.airport-technology.com/features/where-could-hydrogen-be-used-in-aviation/> Дата звернення 1. 10. 2020.

39. Арутюнов В. С. Деякі тенденції енергетики початку ХХІ століття // Український журнал хімічної промисловості - 2008. - 52, № 6. - С. 4-11.

40. Ball M., Wietschel M. The future of hydrogen - opportunities and challenges // Int. J. Hydrogen Energy. - 2009. - 34. - P. 615-627.

41. Козин Л. Ф. Волков С. В. Сучасна енергетика та екологія. Проблеми і перспективи. - Київ: Наук. Думка, 2006. - 775 с.

42. Crabtree G. W., Dresselhaus M. S., Buchanan M. V. The hydrogen economy. // *Phys. Today*. - 2004. - 57, No. 12. - P. 39-44.
43. Єлісєєв О.Л. Технологія "газ в рідину" // *Український журнал хімічної промисловості* - 2008.- 52, № 6. - С. 53-62.
44. Брагінський О.Б. Альтернативні моторні палива: світові тенденції і вибір для України // *Український журнал хімічної промисловості* - 2008. - 52, № 6. - С. 137-147.
45. McCormick B., Alleman T. // *ARB / CEC Alternative Diesell Fuel Symp.*, Sacramento, Calif., Aug. 19, 2003.
46. Тарасов Б. П., Лотоцький М.В. Воднева енергетика: минуле, сучасне, майбутнє // *Український журнал хімічної промисловості* - 2006. - 50, № 6. - С. 5 - 18.
47. Jain I. P. Hydrogen fuel for 21st century // *Int. J. Hydrogen Energy*. - 2009. - 34, No. 17. - P. 7368-7378.
48. Гамбург Д. Ю., Семенов В. П., Дубовкін Н. Ф., Смирнова Л. Н. Водень. Властивості, отримання, зберігання, транспортування, застосування: Довідник. Під ред. Д. Ю.Гамбурга, Н. Ф. Дубовкін. - М.: Хімія, 1989. -672 с.
49. Zawodziski T. A., Deronin C., Radsinski S. et al. // *J. Electrochem. Soc.* - 1993. - 140. - P. +1041.
50. Іванчев С. С., Полова С. В. Полімерні мембрани для паливних елементів: одержання, структура, модифікування, властивості // *Успіхи хімії*. - 2010. - 79, No. 2. - С. 117-133.
51. Шевченко В. В., Клепко В. В. Термостабільні протон-провідні мембрани для паливних елементів // В: *Фундаментальні проблеми водневої енергетики*. - Київ: Видавництво "Kim", 2010. - С. 361-384.
52. Dincer I. Hydrogen and fuel cell technologies for sustainable future // *Jordan J. Mech. Ind. Eng.* - 2008. - 2, No.1. - P. 1-14.
53. Багоцький В. С., Осетрова А. М., Скундин А. М. // *Електрохімія*. - 2003. - 39. - С. 1 027.

54. Білоус А. Г., В, Юнова О. І., Солопай С. О., Коваленко Л. Л. Електролітні та електродні матеріали для нвзькотемпературних (600°C) паливних елементів // В: Фундаментальні проблеми водневої енергетики. Київ: Видавництво "Kim" 2010 - С. 409-424.
55. Kim J.-W., Virkar A. V., Fung K.-Z. et al. Polarization effects in intermediate temperature, anode-supported solid oxide fuel cells // J. Electrochem. Soc. - 1999. - 146. - P. 69-78.
56. Kreuzer K.-D., Paddison S. J., Schuster E. M. Transport in proton conductors for fuel cell applications: simulations, elementary reactions and phenomenology // Chem. Rev. - 2004. - 104. - P. 4637- 4678.
57. Li Q., He R., Jensen J. O., Bjerrum N. J. Approaches and recent development of polymer electrolyte membranes for fuel cells operating above 100 oC // Chem. Mater. - 2003. - 15, No. 26. - P. 4896-4915.
58. Bezerra C.W. B., Zhang L., Lee K. et al. A review of Fe-N / C and Co-N / C catalyst for the oxygen reduction reaction // Electrochim. Acta. - 2008. - 53. - P. 4937-4951.
59. Курісь Я. І., Додон О. С., Кошечко В. Г., Походенко В.Д. Наноконпозиційні каталізатори на основі електропровідних полімерів для паливних елементів // В: Фундаментальні проблеми водневої енергетики. - Київ: Видавництво "KIM", 2010. - С. 385-408.
60. Appleby A. J. Electrocatalysis of aqueous dioxygen reduction // J. Electroanal. Chem. - 1993. - 357. - P. 117-179.
61. Bashyam R., Zelenay P. A class of non-precious composite catalyst for fuel cells // Nature Lett. - 2006. - 443. - P. 63-65.
62. Malinauskas A., Malinauskiené J., Ramanavičius A. Conducting polymer-based nanostructured materials: electrochemical aspects // Nanotechnology. - 2005. - 16. - P. R51-R62.