

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи  
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

« Оптимізація процесу електролізного виробництва водню та акумулювання енергії»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-61  
Ковальов С.М.

спеціальність:

105 – «Прикладна фізика та наноматеріали»

освітня програма:

«Прикладна фізика нетрадиційної енергетики»

Керіник: кандидат фізико-математичних наук,  
доцент **Кудрявцев І.М.**

Рецензент:

Доктор фізико-математичних наук,  
професор,

завідувач відділу ННЦ «Харківський  
фізико-технічний інститут»

Сотніков Г.В.

Харків - 2024

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр

Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Освітня програма Прикладна фізика нетрадиційної енергетики

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ О.П. КУЛИК

(підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Ковальову Сергію Миколайовичу

1. Тема роботи: «Оптимізація процесу електролізного виробництва водню та акумулювання енергії»,  
Керівник роботи: Кудрявцев Ігор Миколайович, кандидат фізико-математичних наук, доцент.
2. Строк подання студентом роботи: 3 грудня 2024 року.
3. Перелік питань, які потрібно розробити:
  1. Огляд фізико-хімічних властивостей водню:
    - особливості водню як хімічного елемента;
    - енергетичні характеристики та перспективи використання.
  2. Методи отримання водню:
    - аналіз різних способів виробництва водню;
    - обґрунтування вибору лужного електролізу та плазмохімічного методу.
  3. Зберігання водню:
    - сучасні методи зберігання;
    - переваги та недоліки кожного способу.
  4. Перетворення водню в електроенергію:
    - теорія роботи водневих паливних елементів;
  5. Комбінування методів та створення єдиної системи:
    - об'єднання виробництва, зберігання та використання водню;
    - розробка моделі інтегрованої системи.
  6. Практичні експерименти:

- проведення експериментів з лужним електролізом та плазмохімічним методом;
- дослідження впливу ультразвуку на електроліз;
- моделювання та випробування паливних елементів;
- порівняння експериментальних даних з теоретичними моделями.

7. Висновки та рекомендації:

- аналіз отриманих результатів;
- розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності;
- перспективи подальших досліджень.

4. План роботи

| № з/п | Назви етапів роботи                                                  |
|-------|----------------------------------------------------------------------|
| 1     | Вибір теми кваліфікаційної роботи                                    |
| 2     | Затвердження теми на кафедрі                                         |
| 3     | Робота з літературними та іншими джерелами                           |
| 4     | Написання вступу до роботи та першого розділу                        |
| 5     | Написання другого, третього, четвертого розділу                      |
| 6     | Написання п'ятого, шостого розділу                                   |
| 7     | Завершення написання кваліфікаційної роботи (висновки та література) |
| 8     | Подача науковому керівнику                                           |
| 9     | Відгук, рецензія, підготовка до захисту                              |
| 10    | Попередній захист                                                    |
| 11    | Захист                                                               |

5. Дата видачі завдання 21 вересня 2024 року

Студент

\_\_\_\_\_

підпис

Сергій Ковальов

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

підпис

Ігор М. Кудрявцев

## **Перелік скорочень та аббревіатур**

**PEMFC** - Паливні елементи з протон-обмінною мембраною

**AFC** - Лужні паливні елементи

**PAFC** - Фосфорнокислотні паливні елементи

**MCFC** - Розплавнокарбонатні паливні елементи

**ВТЕ** – воднева технологія енергетики

**SOFC** - Твердооксидні паливні елементи

**КЛЕ** – лужний електроліз

**ПМ** – плазмохімічний метод

**ПЕ** – паливний елемент

**ВПЕ** – воднева паливна енергетика

**ВБЖ** – високовольтний блок живлення

**ЕЕР** – електрохімічна енергоустановка

**ВГС** – воднева генераторна система



## РЕФЕРАТ

Ковальов Сергій Миколайович. «Оптимізація процесу електролізного виробництва водню та акумулювання енергії». Кваліфікаційна робота магістра з нетрадиційної енергетики. – Харків: ННІ КФТЕ, 2024. – 61 с.

Робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота містить 37 рисунків, 51 використаних літературних джерел.

У цій роботі досліджено можливості підвищення ефективності електролізного виробництва водню та його використання в якості акумулятора енергії. Проведено порівняльний аналіз традиційних і сучасних методів виробництва водню, зокрема, лужного електролізу та плазмохімічного методу. Вивчено вплив ключових параметрів (температури, напруги, інтенсивності ультразвуку) на ефективність електролізу та визначено оптимальні умови для досягнення максимального ККД.

Практична частина включала серію експериментів із використанням високовольтного блока живлення, ультразвукових технологій та комбінації методів, що дозволило створити інтегровану модель системи виробництва, зберігання та використання водню. Для моделювання процесу електролізу застосовано програму COMSOL Multiphysics, що забезпечило точний аналіз процесів перетворення електроенергії в водень.

Проведено порівняння експериментальних даних з теоретичними розрахунками, проаналізовано відхилення та обґрунтовано шляхи підвищення точності. Також оцінено переваги використання ультразвуку для підвищення ефективності електролізу. У розділі рекомендацій запропоновано шляхи вдосконалення системи, включаючи підвищення стабільності роботи установки та зниження енерговитрат.

Результати дослідження можуть бути використані для створення високоефективних систем виробництва водню, розробки нових підходів до його зберігання та використання у водневій енергетиці.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ВОДЕНЬ, ЕЛЕКТРОЛІЗ, ПЛАЗМОХІМІЧНИЙ МЕТОД, ПАЛИВНИЙ ЕЛЕМЕНТ, АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ, УЛЬТРАЗВУК, COMSOL MULTIPHYSICS, АЛЬТЕРНАТИВНА ЕНЕРГЕТИКА.

## ABSTRACT

Kovalov Serhiy Mykolayovych. "Optimization of the Electrolysis Process for Hydrogen Production and Energy Storage." Master's Thesis in Non-Traditional Energy Engineering. – Kharkiv: NII KFTE, 2024. – 61 pages.

The thesis consists of an introduction, seven chapters, conclusions, and a list of references. The study includes 37 figures and 51 references.

This work explores the potential to enhance the efficiency of hydrogen production via electrolysis and its use as an energy storage medium. A comparative analysis of traditional and modern methods of hydrogen production, including alkaline electrolysis and plasma-chemical methods, was conducted. The influence of key parameters (temperature, voltage, and ultrasonic intensity) on electrolysis efficiency was studied, and optimal conditions for achieving maximum efficiency were determined.

The practical component involved a series of experiments using a high-voltage power supply, ultrasonic technology, and combined methods, leading to the development of an integrated system model for hydrogen production, storage, and utilization. The electrolysis process was modeled using the COMSOL Multiphysics software, providing a detailed analysis of the conversion of electrical energy into hydrogen. Experimental data were compared with theoretical calculations, deviations were analyzed, and methods to improve accuracy were justified. The advantages of ultrasound in increasing electrolysis efficiency were also assessed. The recommendations section proposes improvements to the system, including enhanced operational stability and reduced energy consumption.

The findings of this research can be applied to the development of highly efficient hydrogen production systems, innovative approaches to hydrogen storage, and advancements in hydrogen energy technology.

**KEYWORDS:** HYDROGEN, ELECTROLYSIS, PLASMA-CHEMICAL METHOD, FUEL CELL, ENERGY STORAGE, ULTRASOUND, COMSOL MULTIPHYSICS, ALTERNATIVE ENERGY.

## ЗМІСТ

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Перелік скорочень та аббревіатур.....                                                     | 4  |
| <i>ВСТУП</i> .....                                                                        | 9  |
| <i>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДНЮ</i> .....                           | 11 |
| Фізичні властивості.....                                                                  | 11 |
| Хімічні властивості .....                                                                 | 11 |
| Енергетичні характеристики .....                                                          | 11 |
| Безпекові аспекти .....                                                                   | 12 |
| Переваги водню як енергоносія .....                                                       | 12 |
| Виклики та перспективи .....                                                              | 12 |
| Висновок .....                                                                            | 12 |
| <i>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ОТРИМАННЯ ВОДНЮ: ЛУЖНИЙ ЕЛЕКТРОЛІЗ ТА ПЛАЗМОХІМІЧНИЙ СПОСІБ</i> ..... | 13 |
| 2.1. Лужний електроліз води .....                                                         | 14 |
| 2.4 Основні рівняння для плазмового електролізу .....                                     | 17 |
| 2.3. Комбінування методів та синергетичний ефект.....                                     | 28 |
| 2.4. Висновки до розділу 2 .....                                                          | 29 |
| <i>РОЗДІЛ 3. ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ</i> .....                                                   | 30 |
| 3.1. Вступ.....                                                                           | 30 |
| 3.2. Основні методи зберігання водню.....                                                 | 30 |
| 3.3. Вибір методу зберігання для дослідження .....                                        | 31 |
| 3.4. Технічні аспекти зберігання стисненого водню.....                                    | 31 |
| 3.5. Перспективи розвитку методів зберігання .....                                        | 32 |
| 3.6. Висновки до розділу 3 .....                                                          | 32 |
| <i>РОЗДІЛ 4. ПЕРЕТВОРЕННЯ ВОДНЮ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ</i> .....                                | 33 |
| 4.1. Історія відкриття паливних елементів.....                                            | 33 |
| 4.2. Різновиди паливних елементів.....                                                    | 34 |
| 4.3. Принципи перетворення водню в електроенергію .....                                   | 35 |
| 4.4. Переваги електрохімічного перетворення водню .....                                   | 38 |
| 4.5. Перспективи розвитку та застосування .....                                           | 38 |
| 4.6. Висновки .....                                                                       | 39 |
| <i>РОЗДІЛ 5. КОМБІНУВАННЯ МЕТОДІВ ТА СТВОРЕННЯ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ</i> .....             | 40 |

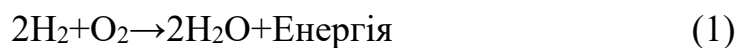
|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Розділ 6. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ</i> .....                  | 43 |
| 6.1. Опис та налаштування обладнання .....                                                   | 43 |
| 6.3. Експерименти з компактним електролізером для роздільного виділення водню та кисню ..... | 51 |
| 6.4. Експерименти з високовольтним блоком живлення та плазмогенератором .....                | 52 |
| 6.5. Повний цикл експериментів з водневою установкою .....                                   | 52 |
| 6.6. Аналіз отриманих результатів та порівняння з теоретичними даними ..                     | 54 |
| 6.7. Висновки до розділу та подальші рекомендації.....                                       | 55 |
| Основні висновки: .....                                                                      | 55 |
| <i>РОЗДІЛ 7. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ</i> .....                                      | 57 |
| Перспективи розвитку: .....                                                                  | 57 |
| Загальний висновок:.....                                                                     | 57 |
| <i>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</i> .....                                                      | 58 |

## ВСТУП

Сучасний світ стикається з глобальними викликами, пов'язаними з енергетичною безпекою та екологічною стійкістю. Зростання споживання енергії, виснаження викопних палив і необхідність зменшення викидів парникових газів стимулюють пошук альтернативних, екологічно чистих джерел енергії. Відновлювані джерела, такі як сонячна та вітрова енергетика, набувають все більшого значення, але їх інтеграція в енергосистему ускладнюється нестабільністю генерації. Це викликає потребу в ефективних системах акумулювання енергії для забезпечення безперебійного енергопостачання.

В Україні питання енергетичної незалежності набуло особливої гостроти внаслідок військових дій та атак на критичну інфраструктуру. Масштабні пошкодження енергетичних об'єктів призвели до масових відключень електроенергії, залишаючи мільйони людей без світла, тепла та зв'язку. Використання резервних дизельних генераторів стало тимчасовим рішенням, але вони супроводжуються екологічними проблемами: викидами шкідливих речовин та шумовим забрудненням [17].

У таких умовах виникає нагальна потреба в екологічно чистих та надійних альтернативних джерелах енергії. Водень привертає дедалі більшу увагу завдяки своїм унікальним властивостям: високій питомій енергоемності (120 МДж/кг або 33 кВт·год/кг) та екологічній чистоті, оскільки при його використанні утворюється лише вода:



Водень може служити не лише паливом, але й засобом зберігання енергії [15-20], забезпечуючи баланс між виробництвом та споживанням електроенергії. У цьому контексті водневі паливні елементи стають ключовими компонентами для перетворення хімічної енергії водню в електричну з високою ефективністю. Електроліз води є одним із найперспективніших методів отримання водню, дозволяючи перетворювати електричну енергію в хімічну без шкідливих викидів. Однак ефективність цього процесу значною мірою залежить від параметрів, таких як температура електроліту, напруга, концентрація розчину та матеріал електродів. Оптимізація цих параметрів потребує глибокого теоретичного аналізу та практичних досліджень. Інноваційні методи, зокрема плазмохімічний розклад води, відкривають нові можливості для підвищення швидкості реакції та зниження енергетичних витрат, але вимагають детального вивчення та оптимізації.

У цій роботі проводиться комплексне дослідження процесу електролізного виробництва водню з метою його оптимізації та підвищення ефективності акумулювання енергії. Здійснюється моделювання електрохімічних процесів у різних типах електролізерів та водневих паливних елементах за допомогою програмного забезпечення COMSOL Multiphysics, що дозволяє отримати

детальну картину розподілу електричних полів, струмів та концентрацій для оптимального проєктування та експлуатації пристроїв.

Практичні експерименти з електролізом води проводяться з варіюванням температури розчину, напруги та концентрації електроліту, що дає змогу визначити оптимальні умови для максимізації виходу водню та мінімізації енергетичних витрат. Для дослідження впливу високовольтного розряду на процес розкладання води використовується власноруч розроблений регульований блок живлення з діапазоном напруг від 1 кВ до 45 кВ. Експерименти з плазмою дозволяють виявити нові закономірності та потенційні переваги цього методу.

Досліджується також робота водневих паливних елементів, їх ефективність та можливості інтеграції в замкнуті цикли енергопостачання. Це особливо актуально в контексті сучасних вимог до енергетичної незалежності та екологічної стійкості. Результати досліджень можуть бути використані для розробки автономних енергетичних систем на основі водню, перспективних як для промисловості, так і для побутового сектору.

Таким чином, результати роботи сприятимуть розвитку водневої енергетики, інтеграції відновлюваних джерел та зменшенню негативного впливу на довкілля. Вони можуть стати основою для створення нових технологій та обладнання в галузі електрохімії та енергетики.

**Мета дослідження** полягає в оптимізації процесу електролізного виробництва водню та розробці ефективних методів акумулювання енергії на основі водню.

**Наукова новизна** роботи полягає в дослідженні впливу ультразвуку на ефективність електролізу, комбінуванні різних методів отримання водню, а також у вивченні плазмохімічного методу як перспективного напрямку отримання водню. Комплексний підхід до поєднання та оптимізації різних методів дозволяє досягти максимального ККД процесу виробництва водню.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає в можливості їх застосування для створення ефективних, екологічно чистих та економічно доцільних технологій виробництва водню та акумулювання енергії, що сприятиме розвитку енергетичної інфраструктури та підвищенню енергетичної незалежності.

Робота може внести суттєвий вклад у розвиток водневої енергетики та вирішення актуальних проблем сучасної енергетики, пов'язаних із екологічною безпекою, ефективністю та стійкістю енергопостачання.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДНЮ

Водень (Н) — найпростіший та найлегший хімічний елемент, займає перше місце в періодичній системі з атомним номером 1. У природі існує переважно у вигляді двоатомних молекул  $\text{H}_2$ . Завдяки своїм унікальним властивостям, водень привертає значну увагу як перспективний енергоносіє.[30-31]

### Фізичні властивості

- **Агрегатний стан:** при стандартних умовах (температура  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тиск 1 атм) водень є безбарвним, без запаху та смаку газом.
- **Густина:**  $0,08988\text{ кг/м}^3$ , що робить його найлегшим серед усіх газів; він у 14,5 разів легший за повітря.
- **Температура плавлення:**  $-259,14\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $14,01\text{ K}$ ).
- **Температура кипіння:**  $-252,87\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $20,28\text{ K}$ ).
- **Теплопровідність:** має високу теплопровідність, що слід враховувати при зберіганні та транспортуванні.
- **Розчинність:** погано розчиняється у воді; при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  і 1 атм у 100 мл води розчиняється близько 1,6 мл  $\text{H}_2$ .
- **Дифузійна здатність:** характеризується високою швидкістю дифузії, що вимагає використання спеціальних матеріалів для запобігання витокам.[5]

### Хімічні властивості

- **Відновні властивості:** водень є сильним відновником, здатним відновлювати оксиди металів до чистих металів:



- **Реакція з киснем:** при згорянні утворюється вода з виділенням значної кількості енергії:



Ця екзотермічна реакція може протікати вибухово при певних концентраціях водню та кисню.

- **Утворення гідридів:** взаємодіє з багатьма металами, утворюючи металогідриди, які використовуються для зберігання водню.

### Енергетичні характеристики

- **Питома теплота згорання:** водень має найвищу серед усіх палив —  $120\text{ МДж/кг}$  ( $33,33\text{ кВт}\cdot\text{год/кг}$ ).
- **Екологічна чистота:** при згорянні утворюється лише вода, без викидів вуглекислого газу та інших шкідливих речовин.
- **Теплотворна здатність:**

- **Нижча теплота згоряння (НТЗ):** 241,8 кДж/моль.
- **Вища теплота згоряння (ВТЗ):** 285,8 кДж/моль.

### Безпекові аспекти

- **Вибухонебезпечність:** суміші водню з повітрям вибухонебезпечні в межах концентрацій від 4% до 75% за об'ємом.[45]
- **Відсутність кольору та запаху:** ускладнює виявлення витоків без спеціальних датчиків.
- **Воднева крихкість:** водень може проникати в метали, спричиняючи їхню крихкість та руйнування; це вимагає використання спеціальних матеріалів у обладнанні та інфраструктурі.

### Переваги водню як енергоносія

- **Висока енергоємність за масою:** забезпечує ефективне зберігання та транспортування енергії.
- **Екологічна безпека:** відсутність шкідливих викидів при використанні.
- **Універсальність використання:** застосовується в паливних елементах, двигунах внутрішнього згоряння, промислових процесах.

### Виклики та перспективи

Хоча водень має значний потенціал як екологічно чистий енергоносіє, його широкомасштабне впровадження стикається з низкою викликів:

- **Виробництво:** необхідність розробки економічно вигідних та екологічно чистих методів отримання.
- **Зберігання та транспортування:** потребує високих тисків або низьких температур, що ускладнює інфраструктуру.
- **Безпека:** необхідність забезпечення безпечної експлуатації та запобігання витокам.

### Висновок

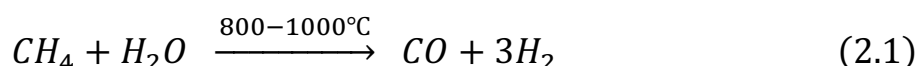
Фізико-хімічні властивості водню роблять його перспективним енергоносієм для вирішення сучасних енергетичних та екологічних проблем. Розуміння цих властивостей є фундаментом для подальших досліджень у галузі виробництва, зберігання та використання водню, а також для розробки технологій з максимальним коефіцієнтом корисної дії та мінімальним впливом на навколишнє середовище.



## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ОТРИМАННЯ ВОДНЮ: ЛУЖНИЙ ЕЛЕКТРОЛІЗ ТА ПЛАЗМОХІМІЧНИЙ СПОСІБ

Виробництво водню є критично важливим етапом у розвитку водневої енергетики, спрямованої на перехід до стійких та екологічно чистих джерел енергії. Існує кілька основних методів отримання водню, кожен з яких має свої переваги та технологічні особливості.

**Термохімічні методи** включають процеси, засновані на розкладі вуглеводнів при високих температурах. Найпоширенішим є парова конверсія метану (Steam Methane Reforming, SMR), яка описується рівнянням:[13-18]



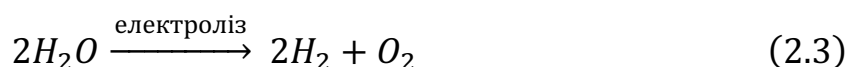
Далі, оксид вуглецю (CO) може бути перетворений на CO<sub>2</sub> в реакції конверсії водяного газу:



Хоча цей метод є економічно вигідним і широко застосовується, він супроводжується значними викидами CO<sub>2</sub>, що суперечить екологічним вимогам.

**Електрохімічні методи** передбачають отримання водню шляхом електролізу води. Цей процес базується на розкладанні молекул води на водень і кисень під дією електричного струму. Електроліз є екологічно чистим методом, особливо при використанні відновлюваних джерел електроенергії. Розрізняють кілька типів електролізу, зокрема лужний електроліз [3-5], електроліз з полімерно-електролітною

Загальне рівняння електролізу води:



**Біологічні методи** використовують мікроорганізми для виробництва водню в процесі їх життєдіяльності. Наприклад, деякі види водоростей та бактерій здатні виділяти водень під дією світла або в умовах ферментації. Ці методи є екологічно безпечними, але мають низьку продуктивність та технологічну складність масштабування.[44]

**Плазмохімічні методи** базуються на використанні плазми для розкладання молекул води. Високоенергетичні електрони в плазмі ефективно розщеплюють воду на водень та кисень. Цей метод потенційно може забезпечити високу швидкість виробництва водню, але потребує значних енергетичних витрат та спеціалізованого обладнання.

Серед усіх цих методів особливу увагу привертають **лужний електроліз** та **плазмохімічний спосіб**, які є предметом детального дослідження в цій роботі.

## 2.1. Лужний електроліз води

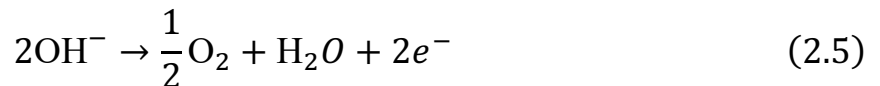
### 2.1.1. Принцип дії та теоретичні основи

Лужний електроліз базується на розкладанні води в електроліті з високою концентрацією гідроксид-іонів ( $\text{OH}^-$ ), зазвичай гідроксиду калію (KOH) або натрію (NaOH). В лужному середовищі електродні реакції відбуваються таким чином:

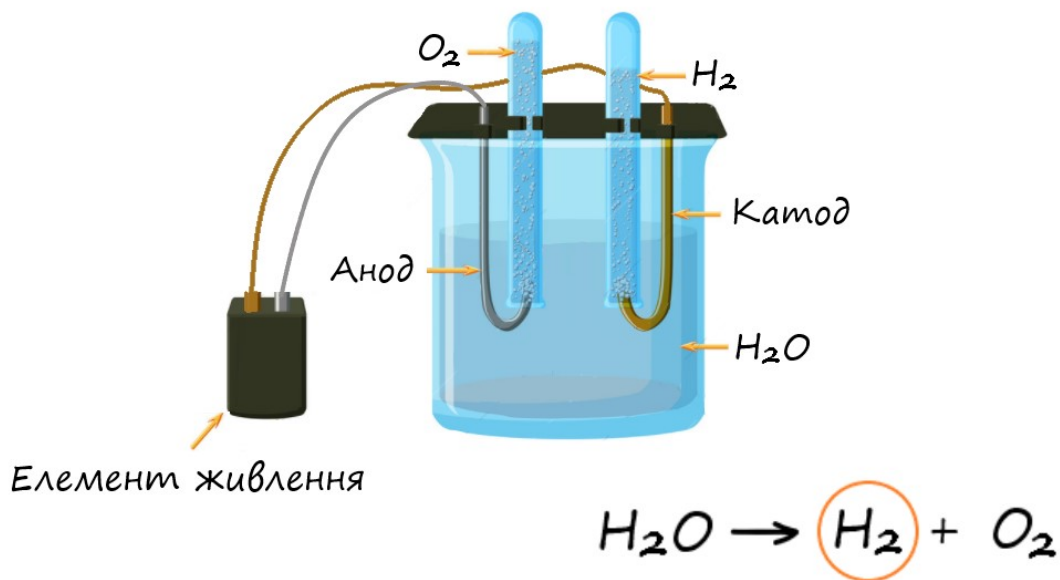
**На катоді (відновлення водню):**



**На аноді (окиснення гідроксид-іонів):**



**Загальна реакція електролізу:**



*Рис. 2.1. Схема електролізера*

**Рівняння Фарадея для маси водню, що виділяється:** Для визначення кількості виробленого водню використовується закон Фарадея:

$$m = \frac{ItM}{zF} \quad (2.7)$$

де  $m$  — маса водню,  $I$  — сила струму,  $t$  — час,  $M$  — молярна маса водню (2 г/моль),  $z$  — кількість електронів на молекулу водню (2),  $F$  — стала Фарадея (96485 Кл/моль).

**Коефіцієнт тепловіддачі та тепловий потік:** Тепловий потік через електролізер можна розрахувати за допомогою формули:

$$q = k \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.8)$$

де  $k$  — теплопровідність електроліту,  $A$  — площа поверхні,  $\Delta T$  — різниця температур між електродами.

### 2.1.2. Енергетичні аспекти процесу

Теоретичний потенціал розкладу води при стандартних умовах (25 °C, 1 атм) становить 1,23 В. Реальна напруга на електролізері завжди вища через перенапругу та омічні втрати:

$$U_{\text{електролізера}} = U_{\text{теоретичне}} + \eta_{\text{катод}} + \eta_{\text{анод}} + IR_{\text{омічний}} \quad (2.9)$$

де  $\eta$  — перенапруга на електродах,  $IR$  — омічні втрати в електроліті.

Енергетична ефективність процесу залежить від:

- **Температури:** підвищення температури зменшує омічний опір та перенапругу. [32]

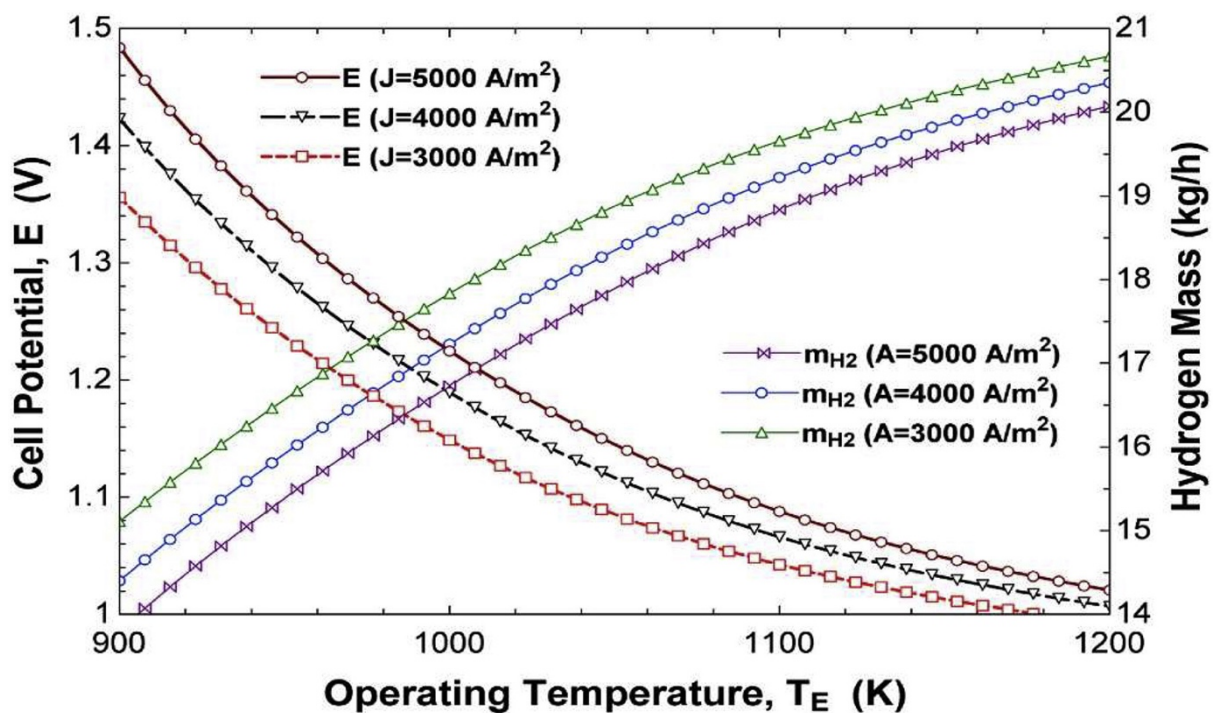


Рис. 2.2. Вплив температури на потенціал комірки під час виробництва водню.

- **Концентрації електроліту:** оптимальна концентрація 4 моля/л забезпечує найкращу провідність.

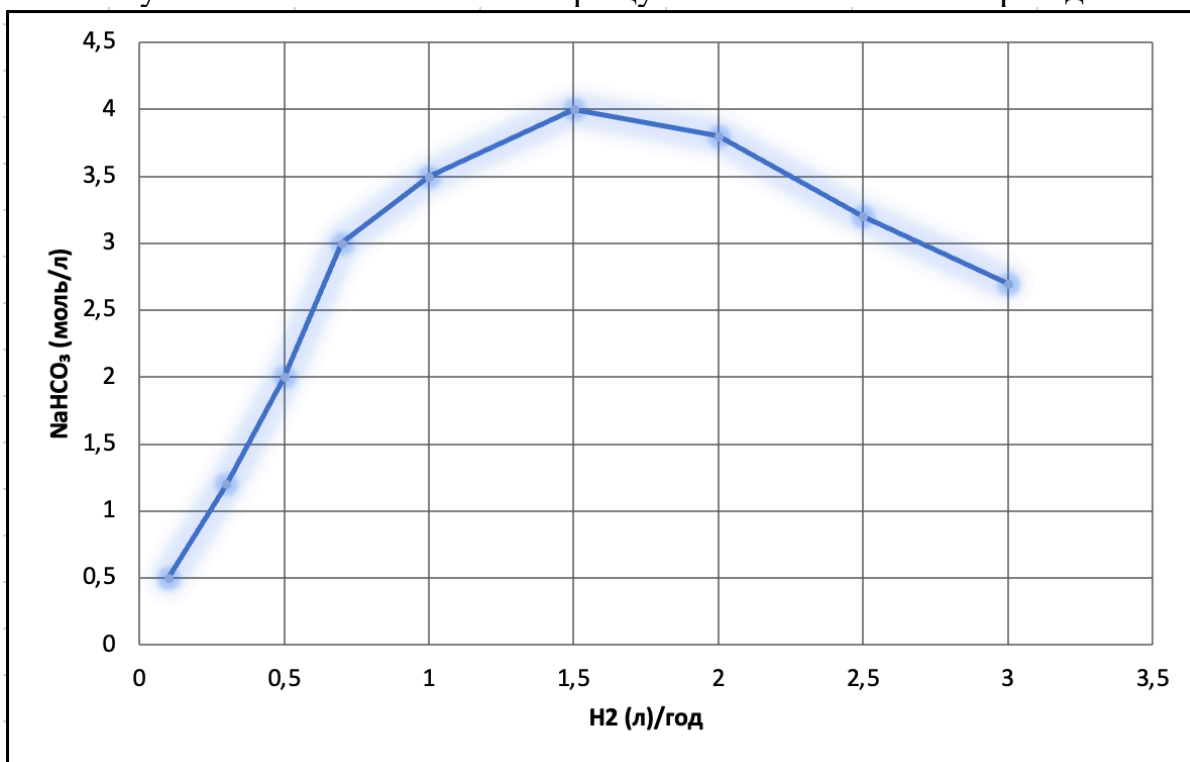


Рис. 2.3. Графік залежності виходу водню від концентрації електроліту.

- **Щільності струму:** збільшення щільності струму підвищує продуктивність, але може збільшувати перенапругу.

### 2.1.3. Вплив конструктивних параметрів

**Матеріал електродів:** використання нікелю, заліза або їхніх сплавів як катодів, та оксидних матеріалів як анодів. Каталітичні покриття можуть зменшити перенапругу.

**Відстань між електродами:** зменшення відстані знижує омичні втрати, але може призвести до змішування газів.

**Температура:** оптимальний діапазон температур 60–80 °C.

### 2.1.4 Використання ультразвуку

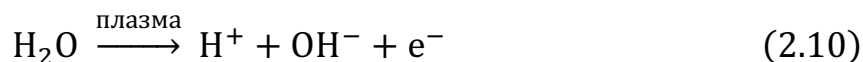
Застосування ультразвуку в електролізі сприяє покращенню масопереносу та зменшенню перенапруги завдяки кавітації. Кавітаційні бульбашки, що утворюються внаслідок ультразвукових хвиль, сприяють перемішуванню розчину та очищенню поверхні електродів.

### Математична модель для плазмового електролізу

Плазмовий електроліз відрізняється від традиційного застосуванням високовольтної плазми для іонізації молекул води та прискорення реакції. Плазмовий розряд створює область високої температури, що підвищує ефективність процесу і дозволяє досягти більшої швидкості розкладу води.

## 2.4 Основні рівняння для плазмового електролізу

1. **Модель створення плазми:** Плазма створюється при подачі високої напруги (до 40 кВ) між анодом і катодом у реакторі з водяною парою або водою. Високовольтний розряд призводить до іонізації води:



2. **Рівняння рівноваги енергії для плазми:** Енергетичний баланс у плазмовій зоні можна записати як:

$$P = V \cdot I = E_{\text{плазми}} + E_{\text{теплогового потоку}} + E_{\text{хімічної реакції}} \quad (2.11)$$

де  $P$  — загальна енергія, подана на систему,  $E_{\text{плазми}}$  — енергія, що підтримує плазмовий стан,  $E_{\text{теплогового потоку}}$  — енергія, що втрачається у вигляді теплового потоку,  $E_{\text{хімічної реакції}}$  — енергія, витрачена на розклад води. [20]

3. **Вплив температури на ефективність:** Оскільки плазмовий розряд підтримує високі температури, рівняння для кінетики реакції можна виразити з урахуванням теплового впливу:

$$k_{\text{реакції}} = A \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2.12)$$

де  $k_{\text{реакції}}$  — швидкість реакції,  $A$  — передекспоненційний множник,  $E_a$  — енергія активації,  $R$  — газова стала,  $T$  — температура.

### 2.1.5. Моделювання лужного електролізу в COMSOL Multiphysics

Для оптимізації процесу використовується програмне забезпечення **COMSOL Multiphysics**, яке дозволяє моделювати електрохімічні процеси з урахуванням масопереносу, електричного поля та теплопереносу.

#### Основні рівняння моделі:

- Рівняння Нернста-Планка для масопереносу іонів:

$$N_i = -D_i \nabla c_i - \frac{z_i D_i F}{RT} c_i \nabla \varphi + c_i v \quad (2.13)$$

де  $N_i$  — потік іона  $i$ ,  $D_i$  — коефіцієнт дифузії,  $c_i$  — концентрація,  $z_i$  — заряд іона,  $\varphi$  — електричний потенціал,  $v$  — швидкість потоку.

**Рівняння Пуассона** для розподілу електричного потенціалу:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \varphi) = -\rho \quad (2.14)$$

де  $\epsilon$  — діелектрична проникність,  $\rho$  — об'ємна густина заряду.

#### Результати моделювання:

- Розподіл концентрацій іонів  $\text{OH}^-$  та  $\text{H}^+$  в електроліті.
- Розподіл електричного потенціалу та щільності струму.
- Вплив температури та концентрації електроліту на ефективність процесу.

**Лужний електроліз води** є добре відпрацьованим промисловим методом отримання водню. У процесі електролізу водень виділяється на катоді, тоді як кисень — на аноді. Електролітом служить водний розчин лугу, зазвичай гідроксиду калію (KOH) або натрію (NaOH).[33-36]

Однією з важливих особливостей цього процесу є утворення газових бульбашок на поверхні електродів. Коли гази, що виділяються, формують бульбашки, це

призводить до зниження ефективної іонної провідності електроліту. Накопичення бульбашок на поверхні електродів зменшує активну площу, доступну для електрохімічних реакцій, що негативно впливає на продуктивність електролізера.

**Вплив газотворення на ефективність електролізу** є важливим аспектом для дослідження та оптимізації. Зменшення негативного впливу газових бульбашок може бути досягнуто шляхом:

- **Покращення гідродинаміки** в електролізері для швидкого видалення бульбашок з поверхні електродів.
- **Застосування ультразвуку**, який сприяє відриву бульбашок та покращує масоперенос.
- **Модифікація поверхні електродів** для зменшення адгезії бульбашок.

У цьому контексті досліджується вплив утворення газових бульбашок на роботу лужного електролізера та шляхи підвищення його продуктивності. Моделювання процесу за допомогою **COMSOL Multiphysics** дозволяє детально проаналізувати розподіл бульбашок, їх вплив на електричне поле та концентраційні профілі в електроліті.

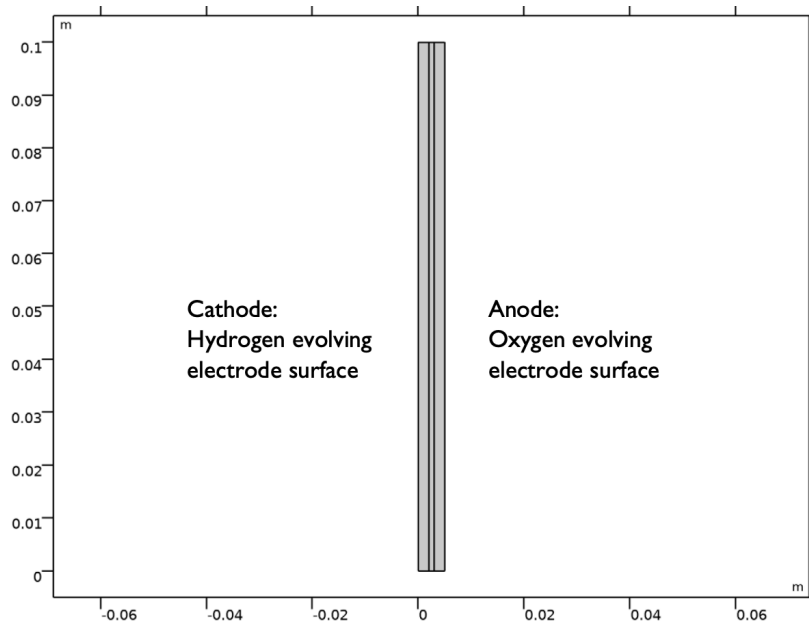
#### **Основні аспекти моделювання:**

- **Модель багатофазного потоку:** використовується для опису взаємодії рідини та газових бульбашок.
- **Електрохімічні реакції:** враховуються на поверхні електродів з урахуванням зменшення активної площі через покриття бульбашками.
- **Перенос маси та заряду:** моделюється вплив газових бульбашок на іонну провідність електроліту та розподіл потенціалу.

#### **Результати комп'ютерного моделювання**

Для вивчення впливу утворення газових бульбашок у процесі лужного електролізу була створена детальна модель в програмному середовищі COMSOL Multiphysics. Ця модель дозволяє аналізувати динаміку газів у електроліті, їх розподіл і вплив на поляризаційні характеристики системи.

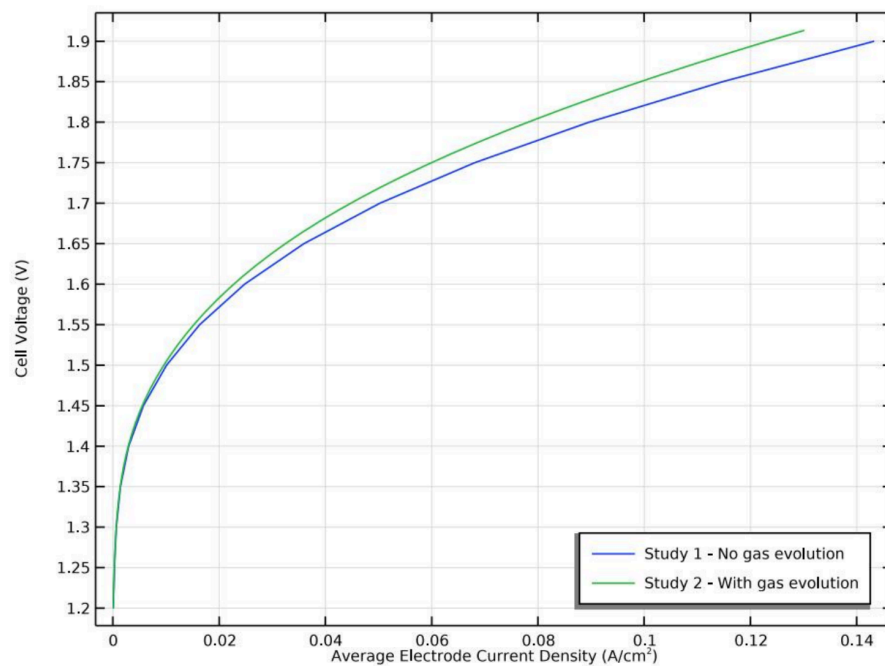
Модель включає геометрію електролізера з анодом, катодом та сепаратором, а також враховує основні фізичні явища, такі як перенесення маси, утворення газових фаз і неоднорідності щільності струму. Це дозволяє провести повний аналіз і з'ясувати, як утворення водню та кисню впливає на роботу електролізера.



*Рис. 2.4. Схема моделі електролізера.*

### Поляризаційна крива

На поляризаційній кривій спостерігається різниця між моделями з урахуванням та без урахування утворення газів. Включення ефекту газоутворення призводить до збільшення поляризації, що пояснюється зростанням опору внаслідок утворення газових бульбашок на поверхні електродів. Ці бульбашки зменшують ефективну поверхню контакту електродів з електролітом, що погіршує перенесення заряду та підвищує енергетичні втрати.

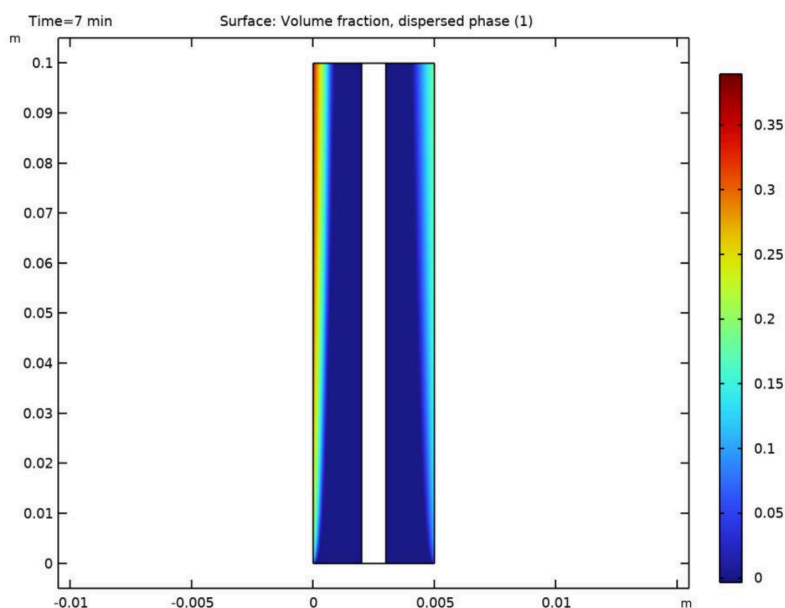


*Рис. 2.5. Поляризаційна крива: порівняння моделей з урахуванням і без урахування утворення газів.*



## Об'ємна частка газів

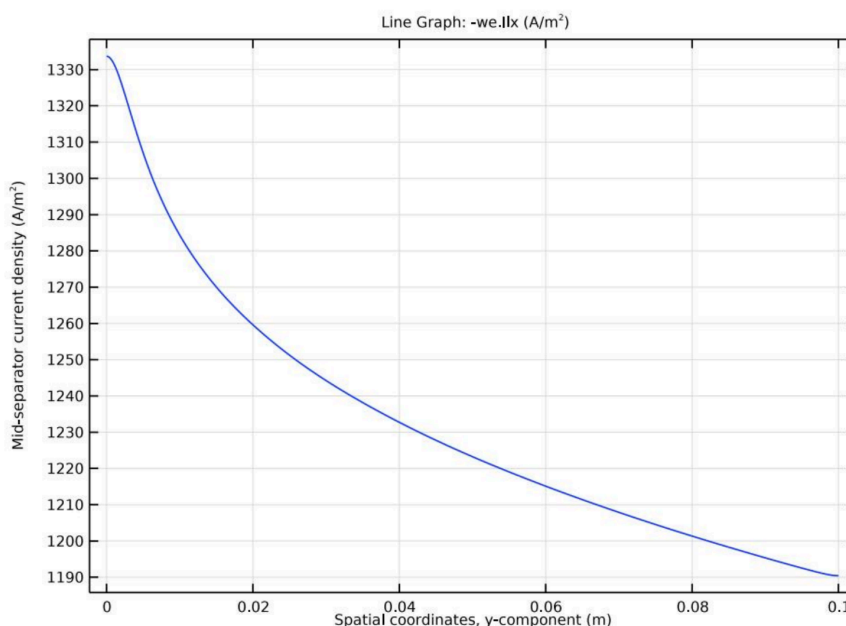
На графіку розподілу об'ємної частки газів при напрузі комірки 1,9 В видно, що об'ємна частка водню значно більша порівняно з об'ємною часткою кисню. Це пояснюється стехіометричними співвідношеннями електролізу води, при якому на кожні дві молекули водню утворюється лише одна молекула кисню. Утворення газових бульбашок збільшується до виходу з електролізера, що може негативно впливати на продуктивність процесу.



**Рис. 2.6.** Розподіл об'ємної частки газів при напрузі комірки 1,9 В: більша об'ємна частка водню порівняно з киснем.

## Розподіл струму в електроліті

Розподіл щільності струму вздовж сепаратора демонструє значну неоднорідність при високих напругах. Утворені гази створюють градієнти, що призводить до локальних коливань щільності струму. Це може викликати нерівномірне використання електродів, що скорочує термін служби системи та знижує її ефективність.



*Рис. 2.7. Графік розподілу струму в електроліті.*

Отримані результати показують, що ефект утворення газових бульбашок має суттєвий вплив на роботу лужного електролізера. Утворення бульбашок водню та кисню знижує провідність електроліту та підвищує поляризаційні втрати. Розробка методів, які зменшують негативний вплив цих бульбашок, є важливим завданням для підвищення ефективності виробництва водню.

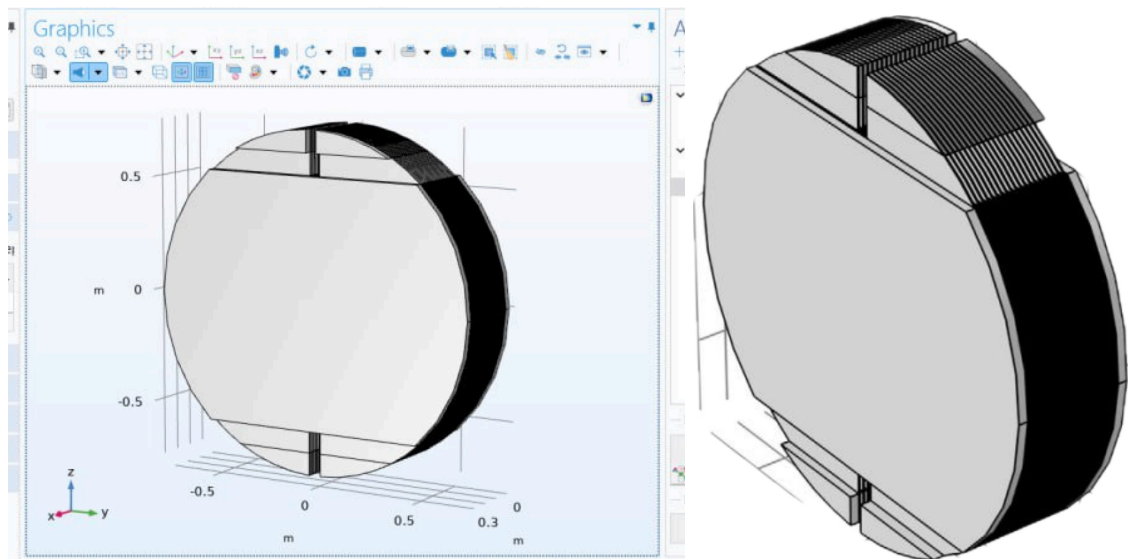
**Практичні рекомендації** для підвищення продуктивності лужного електролізера включають:

- **Оптимізація конструкції електродів:** використання пористих або структурованих електродів для покращення відведення газів.
- **Застосування перемішування:** механічне або за допомогою ультразвуку для зменшення накопичення бульбашок.

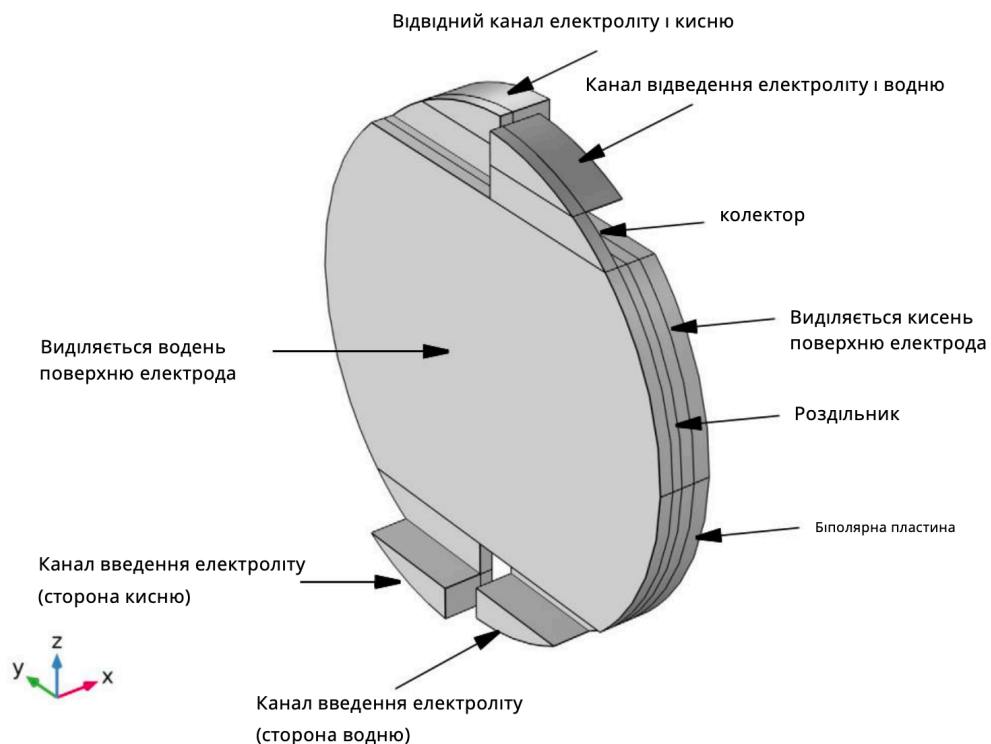
## Результати комп'ютерного моделювання 2

Окрім вивчення впливу утворення газових бульбашок, також було проаналізовано розподіл основних параметрів лужного електролізера у середовищі COMSOL Multiphysics, що впливають на ефективність процесу електролізу, включаючи електричний потенціал, щільність струму у комітках електролізера, кулонівську та енергетичну ефективність. Моделювання проводилося на стеку з 20 комірок (рис. 1), де було розглянуто вплив середньої напруги на робочі характеристики системи.

Таке комплексне моделювання дало змогу оцінити вплив різних параметрів на продуктивність і стабільність роботи електролізера, що є важливим для оптимізації технології виробництва водню.



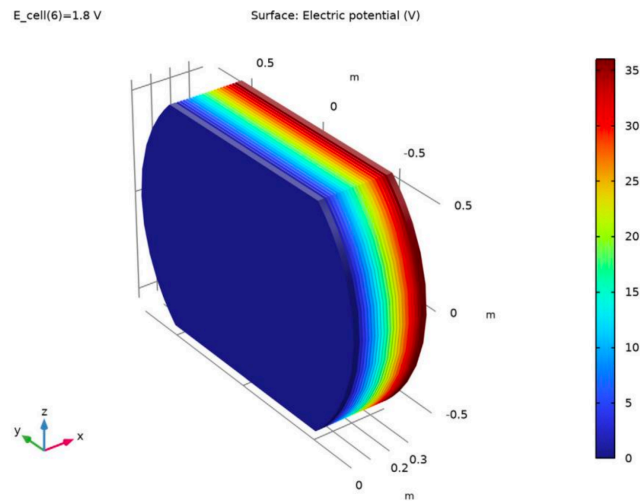
*Рис. 2.8. Геометрія моделі електролізера.*



*Рис. 2.9 Повторювана комірка. Масштабовано десять разів у напрямку x.*

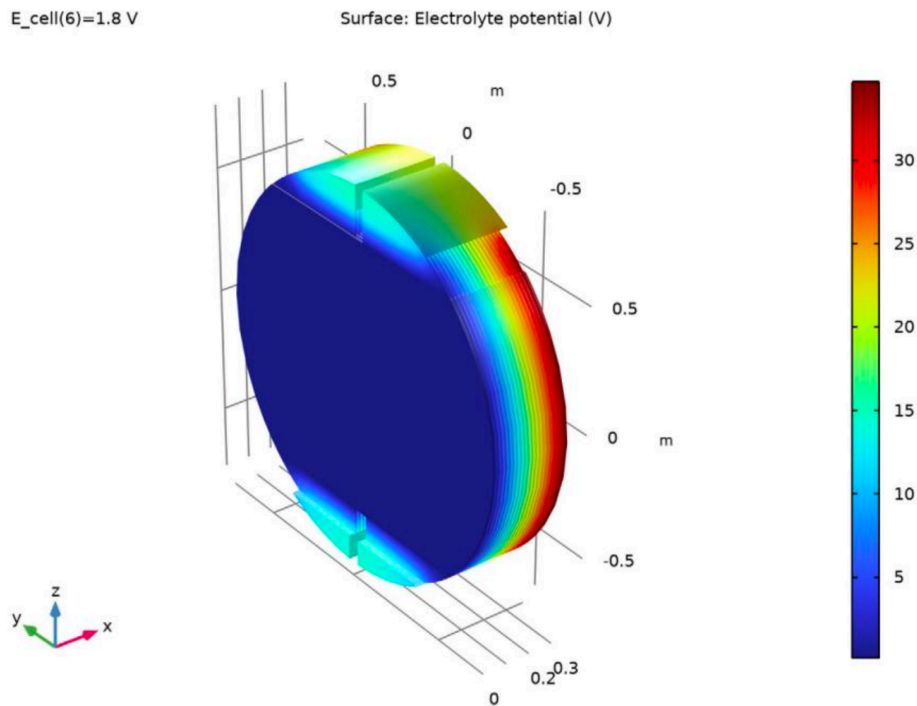
1. **Розподіл електродного потенціалу.** На рис. 3 показаний електричний потенціал на електродах стека при середній напрузі 1,8 В. Цей розподіл

демонструє різницю потенціалів між кінцевими пластинами і внутрішніми електродами, що важливо для визначення втрат напруги у стеку. Електродний потенціал варіюється вздовж стека, вказуючи на поступові втрати через опір матеріалу електродів і електроліту.



*Рис.2.10 Потенціал фази електрода*

2. **Розподіл електролітного потенціалу.** На рис. 4 і рис. 5 представлений потенціал електроліту в каналах введення і виведення, а також в колекторах. Потенціал електроліту визначає розподіл струму в системі, що є важливим для оцінки однорідності процесу електролізу у кожній комірці.



*Рис.2.11 Потенціал фази електроліту*

$E_{\text{cell}(6)} = 1.8 \text{ V}$  Streamline: Electrolyte current density vector Streamline Color: Electrolyte potential (V)

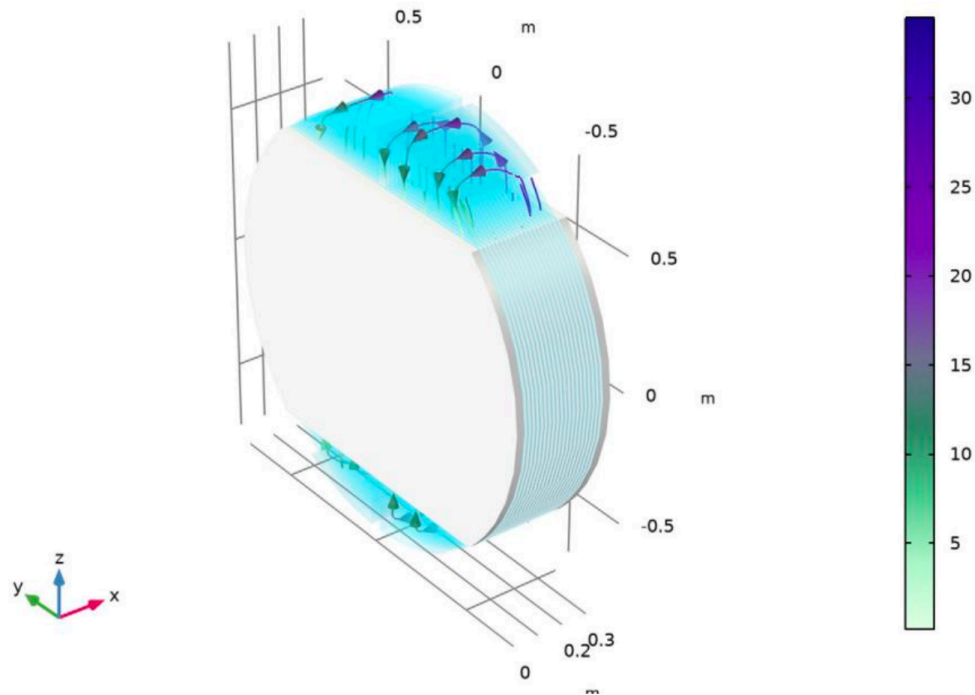


Рис.2.12 Лінії струму у вхідних і вихідних каналах і колекторах.

3. **Шунтовий струм.** На рис. 6 і рис. 7 показані результати розрахунків шунтового струму, що входить або виходить з кожної комірки при середніх напругах 1,3 В та 1,8 В відповідно. Шунтовий струм, що протікає між комірками через колектори, збільшується ближче до кінця стека, що пов'язано з різницею в електролітному потенціалі. При вищій напрузі на стеку спостерігаються вищі значення шунтового струму.

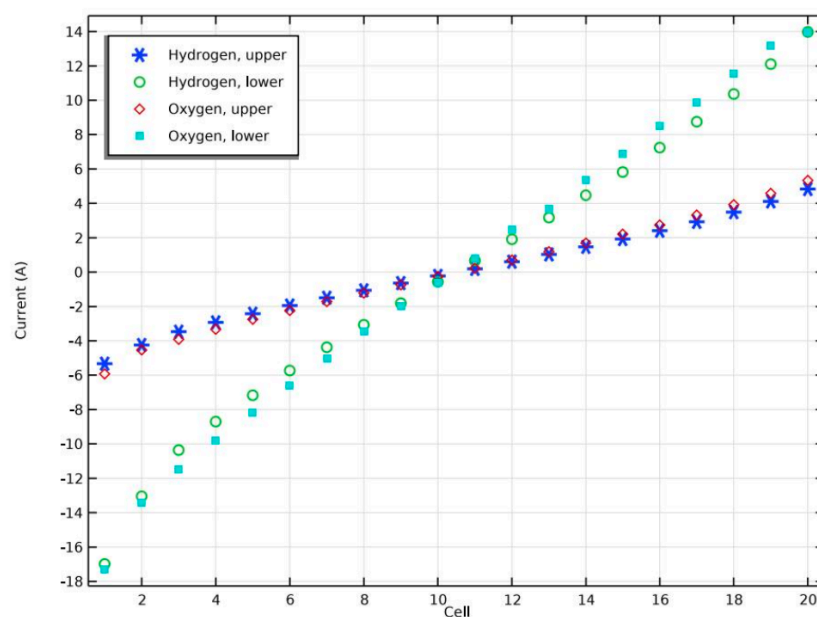


Рис.2.13 Вхідний і вихідний струм шунта при напрузі 1.3В

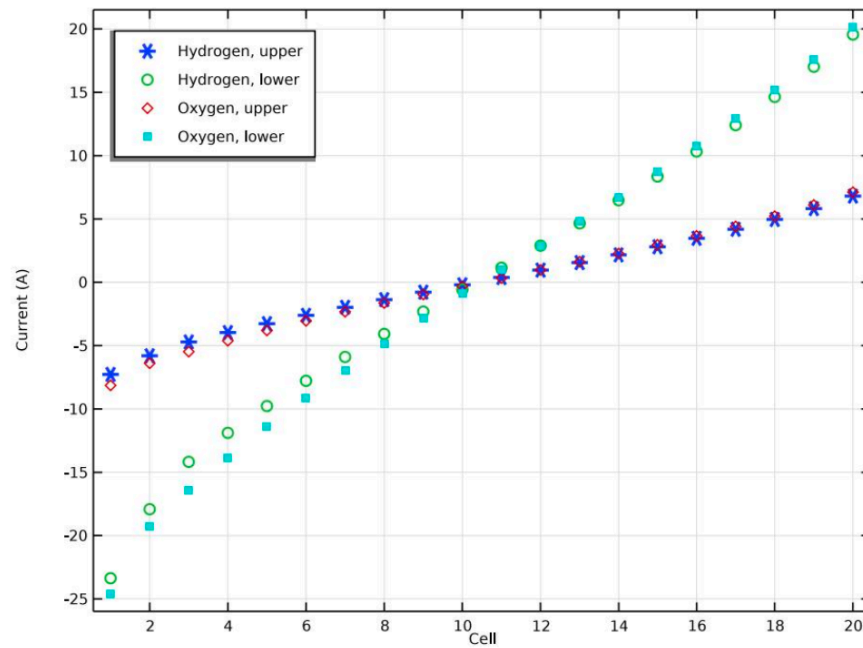


Рис.2.14 Вхідний або вихідний шунтовий струм на комірку при середній напрузі комірки 1,8 В

4. **Поляризаційна характеристика стека.** На рис. 8 представлений графік поляризації для стека, де загальний струм визначено інтегруванням густини струму на кінцевій пластині. Поляризаційна характеристика відображає залежність струму від напруги, яка важлива для вибору оптимальних умов роботи електролізера.

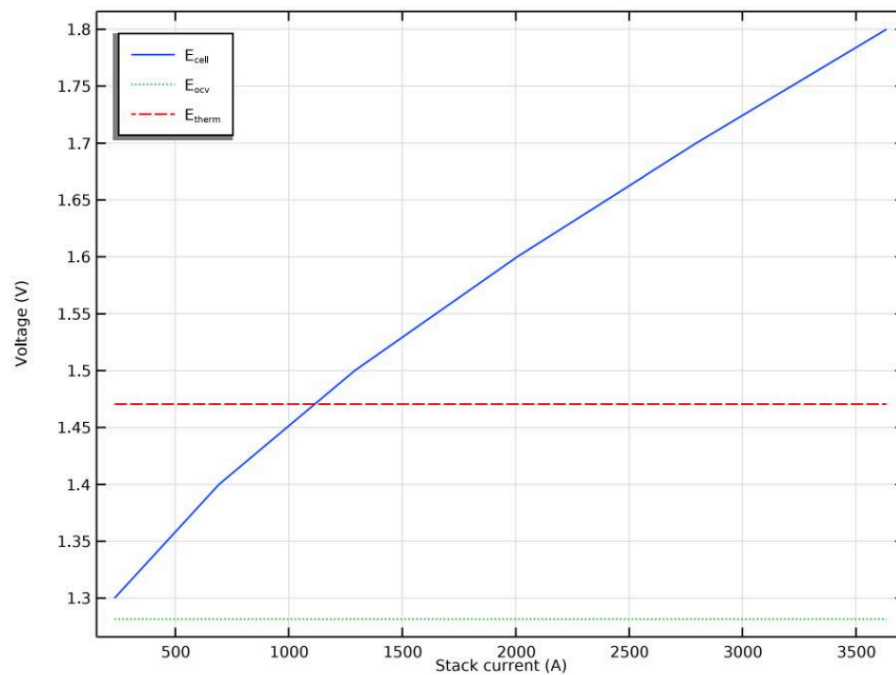
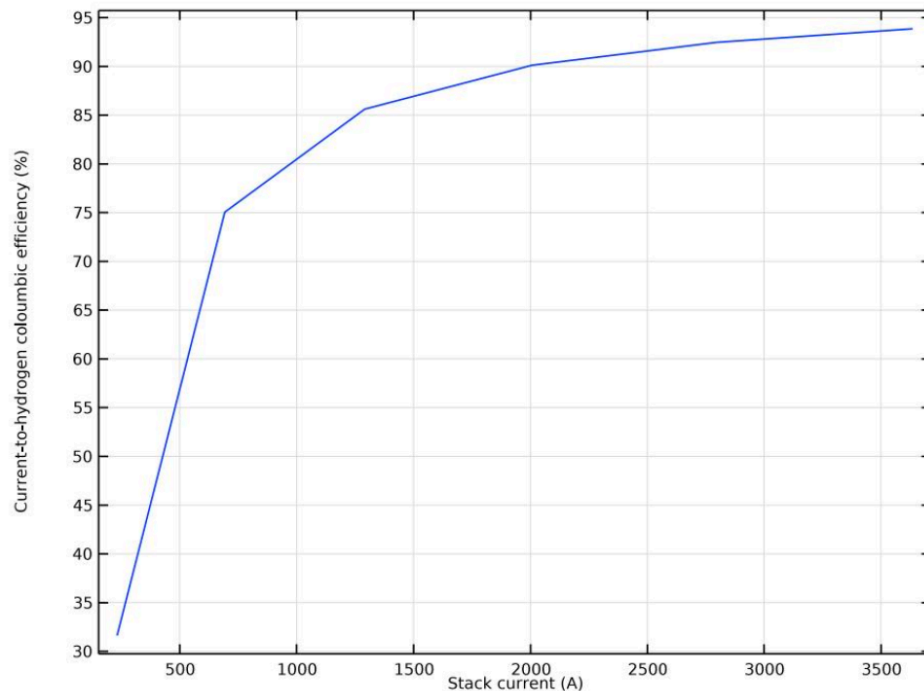


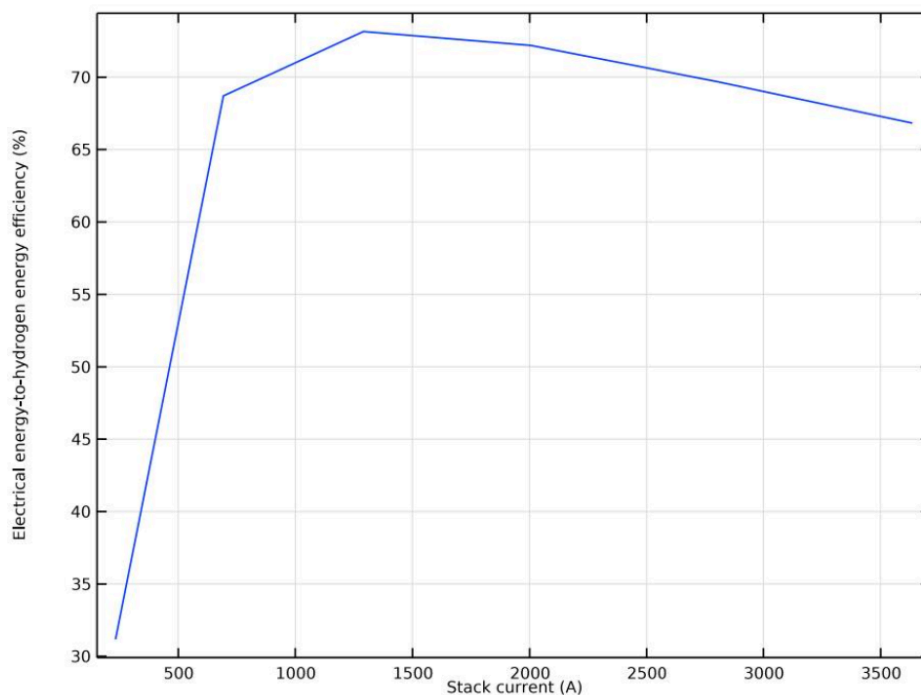
Рис.2.15 Поляризаційний графік для стека.

5. **Кулонівська ефективність.** На рис. 9 показано кулонівську ефективність стека при різних значеннях струму. Вона визначена як відношення загального струму водню, що виділяється в усіх комірках, до струму стека, помноженого на кількість комірок. Кулонівська ефективність зменшується при низьких струмах через поляризаційні втрати, але зростає з підвищенням струму.



*Рис.2.16 ККД водню від струму.*

6. **Енергетична ефективність.** На рис. 10 представлена енергетична ефективність стека, розрахована на основі енергії Гіббса, для різних значень струму. Ефективність досягає максимуму при струмі приблизно 1400 А, після чого починає зменшуватися через збільшення напруги на стеку при високих значеннях струму.



*Рис.2.17 Ефективність перетворення електричної енергії в енергію водню (Гіббса)*

Проведене моделювання лужного електролізера вказує на такі особливості:

- **Ефективний розподіл електролітного потенціалу і струму** забезпечує стабільну роботу стека при оптимальних значеннях напруги.
- **Шунтові струми** впливають на загальну ефективність стека, особливо ближче до кінцевих пластин, що вимагає контролю для уникнення надлишкових втрат енергії.
- **Кулонівська та енергетична ефективність** зростають з підвищенням струму до певної межі, що вказує на оптимальні умови для максимального виходу водню з мінімальними енергетичними витратами.

### 2.3. Комбінування методів та синергетичний ефект

Поєднання лужного електролізу з плазмохімічним методом та застосування ультразвуку може призвести до синергетичного ефекту, підвищуючи загальний ККД процесу отримання водню.

**Можливі механізми синергії:**

- **Плазма сприяє активації молекул води**, зменшуючи енергетичний бар'єр для електролізу.
- **Ультразвук покращує масоперенос** та рівномірність процесу.
- **Загальне зниження перенапруги** на електродах та омічних втрат.



## 2.4. Висновки до розділу 2

У цьому розділі було розглянуто основні методи отримання водню, зосереджуючись на лужному електролізі та плазмохімічному методі. Детально описано теоретичні основи, хімічні реакції та енергетичні аспекти цих процесів. За допомогою програмного забезпечення **COMSOL Multiphysics** проведено моделювання, що дозволило визначити ключові параметри для оптимізації.

Комбінування лужного електролізу з та застосуванням ультразвуку може значно підвищити ефективність виробництва водню, що є перспективним напрямом для подальших досліджень.

## **РОЗДІЛ 3. ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ**

### **3.1. Вступ**

Зберігання водню є одним з ключових аспектів розвитку водневої енергетики. Ефективні, безпечні та економічно доцільні методи зберігання необхідні для широкомасштабного використання водню як енергоносія в транспорті, промисловості та енергетиці. Через низьку густину водню в газоподібному стані та його високу летючість, розробка оптимальних способів зберігання є технологічним викликом.[23-27]

### **3.2. Основні методи зберігання водню**

Існує кілька основних підходів до зберігання водню, які можна розділити на фізичні та хімічні методи.

#### **3.2.1. Стиснений газоподібний водень**

Стиснення водню до високих тисків (200–700 бар) є одним з найбільш розповсюджених методів зберігання. Використовуються спеціальні балони або резервуари, виготовлені з високоякісних металевих або композитних матеріалів, здатних витримувати високий тиск.

Переваги цього методу включають технологічну зрілість та відносну простоту. Проте низька об'ємна енергетична щільність і високі вимоги до безпеки обмежують його застосування.

#### **3.2.2. Зріджений водень**

Зрідження водню при температурі  $-253^{\circ}\text{C}$  дозволяє збільшити об'ємну енергетичну щільність. Зберігання здійснюється в криогенних резервуарах з високим рівнем теплоізоляції.[44]

Цей метод дозволяє транспортувати великі об'єми водню, але має недоліки, такі як високі енергетичні витрати на зрідження, необхідність складного обладнання та втрати водню через випаровування.

#### **3.2.3. Зберігання у вигляді металогідридів**

Металогідриди — це сполуки водню з металами, які здатні зворотно поглинати та виділяти водень при певних температурах і тисках. Це дозволяє зберігати водень з високою об'ємною щільністю при низьких тисках.

Переваги металогідридних систем включають безпеку та компактність. Недоліками є висока маса системи, вартість матеріалів та необхідність термокерування процесами поглинання та виділення водню.[44-49]

### 3.2.4. Адсорбція на пористих матеріалах

Водень може адсорбуватися на поверхні пористих матеріалів, таких як активоване вугілля або металоорганічні каркаси (MOF). Це дозволяє зберігати водень при помірних тисках і температурах.

Однак цей метод поки що має низьку об'ємну енергетичну щільність та потребує подальших досліджень для практичного застосування.

### 3.2.5. Хімічне зберігання

Водень може зберігатися у вигляді хімічних сполук, наприклад, аміаку, метанолу чи рідких органічних водневих носіїв (LOHC). Ці сполуки можуть зворотно виділяти водень при певних умовах.

Переваги цього методу включають високу об'ємну енергетичну щільність та можливість використання існуючої інфраструктури для рідких палив. Недоліки — складність процесів виділення водню та потенційна токсичність деяких сполук.

## 3.3. Вибір методу зберігання для дослідження

Для цілей даної роботи, спрямованої на розробку ефективної системи акумулювання та перетворення енергії на основі водню, найбільш доцільним є використання стисненого водню.

Основні причини вибору:

- **Технологічна доступність:** обладнання для стиснення та зберігання водню під тиском є відпрацьованим та доступним.
- **Простота інтеграції:** стиснений водень легко використовувати в експериментальних установках та лабораторних умовах.
- **Швидкість реагування:** системи зі стисненим воднем можуть швидко заряджатися та розряджатися, що важливо для динамічних процесів.[17]

## 3.4. Технічні аспекти зберігання стисненого водню

### 3.4.1. Обладнання для зберігання

Зберігання стисненого водню вимагає використання спеціальних балонів або резервуарів, виготовлених з високоякісних матеріалів, що забезпечують міцність та герметичність при високих тисках.

### 3.4.2. Безпека

Безпека є критичним аспектом при зберіганні водню. Необхідно забезпечити:

- **Контроль витоків:** регулярна перевірка герметичності системи та використання датчиків водню.
- **Захист від вибухів:** запобігання утворенню вибухонебезпечних сумішей шляхом забезпечення належної вентиляції та використання вибухозахищеного обладнання.
- **Використання відповідних матеріалів:** уникання матеріалів, схильних до водневої крихкості.

### 3.5. Перспективи розвитку методів зберігання

Хоча стиснений водень є найбільш доступним методом на сьогодні, подальші дослідження та розвиток технологій можуть зробити інші методи більш привабливими. Зокрема, дослідження нових матеріалів для металогідридів та адсорбентів, а також розвиток технологій хімічного зберігання, можуть значно підвищити ефективність та безпеку зберігання водню.[23]

### 3.6. Висновки до розділу 3

Зберігання водню є важливим компонентом водневої енергетичної системи. Аналіз основних методів зберігання показує, що стиснений водень є найбільш практичним та технологічно відпрацьованим методом для поточних досліджень. Однак, з розвитком технологій, інші методи зберігання можуть стати більш ефективними та поширеними.

## РОЗДІЛ 4. ПЕРЕТВОРЕННЯ ВОДНЮ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ

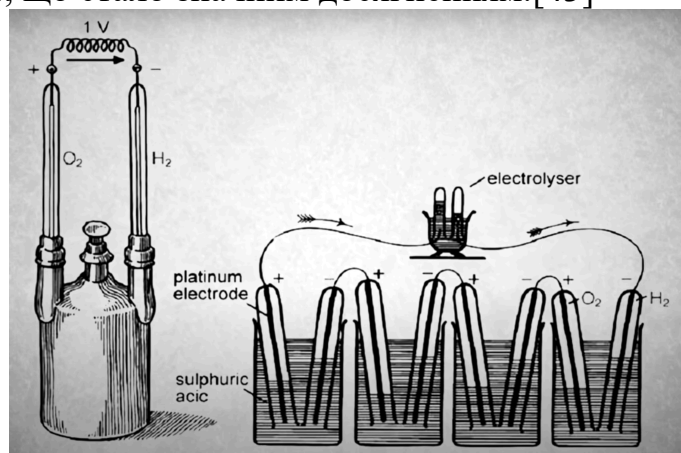
### 4.1. Історія відкриття паливних елементів

Історія паливних елементів сягає першої половини XIX століття. У 1839 році валлійський вчений **сэр Вільям Роберт Гроув** зробив революційне відкриття, яке заклало основи для розвитку технології паливних елементів. Досліджуючи електроліз води, він припустив, що процес можна повернути в зворотному напрямку. Гроув з'єднав водень і кисень в присутності електроліту та платинових електродів, що призвело до утворення електричного струму та води. Цей пристрій він назвав "газовою батареєю".[44-47]

Хоча експеримент Гроува був важливим науковим досягненням, практичне застосування його відкриття було обмеженим через технічні складнощі та відсутність ефективних матеріалів.

У 1889 році німецькі вчені **Людвіг Мон** і **Карл Ланге** удосконалили конструкцію Гроува, створивши перший лужний паливний елемент із використанням водного розчину лугу як електроліту. Вони продемонстрували можливість підвищення ефективності та довговічності паливних елементів, але все ще залишалися проблеми з матеріалами та технологією виробництва.

Протягом XX століття інтерес до паливних елементів зростає завдяки розвитку електрохімії та матеріалознавства. У 1930-х роках британський інженер **Френсіс Томас Бейкон** розпочав дослідження з удосконалення лужних паливних елементів. Його робота призвела до створення більш надійних та потужних пристроїв. У 1959 році Бейкон продемонстрував паливний елемент потужністю 5 кВт, що стало значним досягненням.[43]



*Рис. 4.1. Прототип системи перетворення водню в електроенергію.*

Ці успіхи привернули увагу космічної індустрії. У 1960-х роках **NASA** активно впроваджувала паливні елементи в космічних програмах "Джеміні", "Аполлон" та "Спейс Шаттл" для забезпечення електроенергією та водою космонавтів.

У 1960-х роках компанія **General Electric** розробила паливні елементи з протон-обмінною мембраною (PEMFC), використовуючи твердий полімерний електроліт та платинові каталізатори. Це дозволило створити компактні та ефективні пристрої, придатні для широкого застосування.

У 1990-х роках зростаючий інтерес до екологічно чистих джерел енергії та альтернативних палив стимулював активні дослідження та розвиток паливних елементів. Значний прогрес у матеріалах, технологіях виробництва та системах керування призвів до появи комерційно доступних паливних елементів для транспорту, стаціонарної енергетики та портативних пристроїв.

#### **4.2. Різновиди паливних елементів**

Паливні елементи класифікуються за типом електроліту, який визначає їх робочу температуру, матеріали електродів та області застосування. Нижче наведено огляд основних типів паливних елементів.

**Паливні елементи з протон-обмінною мембраною (PEMFC)** є одними з найбільш поширених та перспективних. Вони використовують тонку тверду полімерну мембрану як електроліт, яка проводить протони від анода до катода. Робоча температура цих елементів зазвичай становить 60–80 °C, що дозволяє швидко запускати та зупиняти систему. Завдяки високій щільності потужності та компактності, PEMFC широко застосовуються в транспортних засобах, портативних пристроях та стаціонарних системах малої потужності.[34-37]

**Лужні паливні елементи (AFC)** використовують водний розчин лугу (наприклад, КОН або NaOH) як електроліт. Вони характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії та можуть працювати при температурах від 50 до 200 °C. Історично лужні паливні елементи використовувалися в космічних програмах завдяки своїй ефективності. Проте вони чутливі до вуглекислого газу, який може утворювати карбонати та знижувати провідність електроліту, що обмежує їх застосування.[47]

**Фосфорнокислотні паливні елементи (PAFC)** мають електроліт з концентрованої фосфорної кислоти. Працюють при температурах 150–200 °C і відзначаються стійкістю до домішок у водні, таких як оксид вуглецю. Завдяки надійності та довговічності, PAFC використовуються в стаціонарних енергетичних установках середньої потужності.[47]

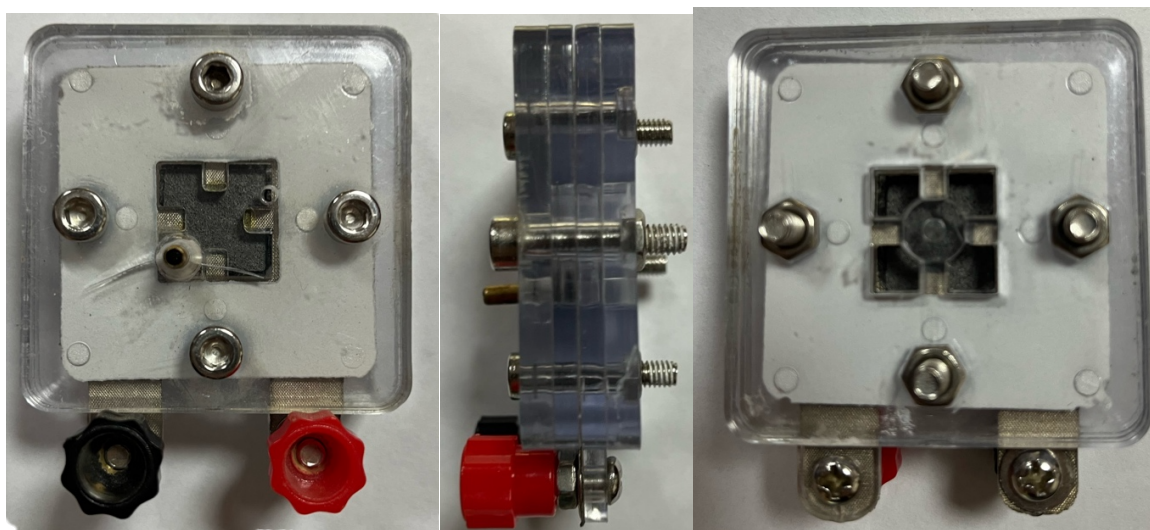
**Розплавнокарбонатні паливні елементи (MCFC)** працюють при високих температурах (600–700 °C) та використовують розплав солей карбонатів як електроліт. Вони можуть безпосередньо використовувати різні вуглеводневі палива, що робить їх привабливими для стаціонарних установок великої потужності. Проте високі робочі температури призводять до викликів з матеріалами та корозією.[47]

**Твердооксидні паливні елементи (SOFC)** мають електроліт з твердих оксидних матеріалів, таких як стабілізований оксид цирконію. Вони працюють при дуже високих температурах (800–1000 °C), що дозволяє їм ефективно використовувати різні види палива, включаючи природний газ. SOFC

відзначаються найвищим ККД серед паливних елементів, але їх застосування ускладнюється через високі вимоги до матеріалів та теплоізоляції.[47]

### 4.3. Принципи перетворення водню в електроенергію

У нашому дослідженні ми використовуємо **паливний елемент з протон-обмінною мембраною (PEMFC)**, який працює при кімнатній температурі. Цей тип паливного елемента є найбільш поширеним і широко вивченим завдяки своїм перевагам у ефективності та зручності використання.



*Рис. 4.2. Фото паливного елемента з протон-обмінною мембраною.*

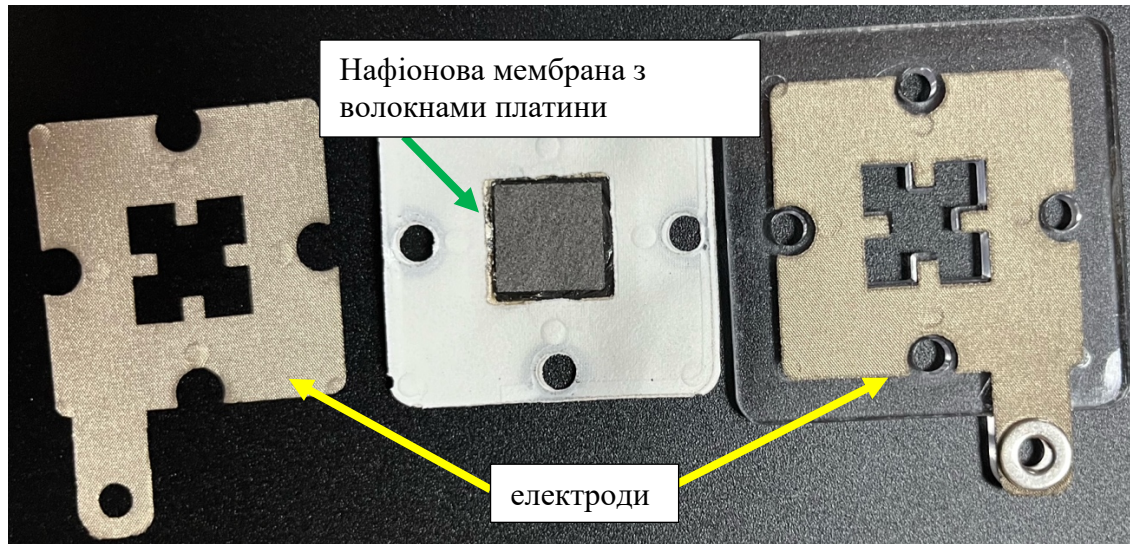
#### Основні компоненти паливного елемента:

- **Анод:** електрод, на якому відбувається окиснення водню.
- **Катод:** електрод, на якому відбувається відновлення кисню.
- **Електроліт:** середовище, що проводить іони, але блокує електрони, забезпечуючи перенесення заряджених частинок між анодом і катодом.
- **Каталізатор:** матеріал (зазвичай платина), що прискорює електрохімічні реакції.

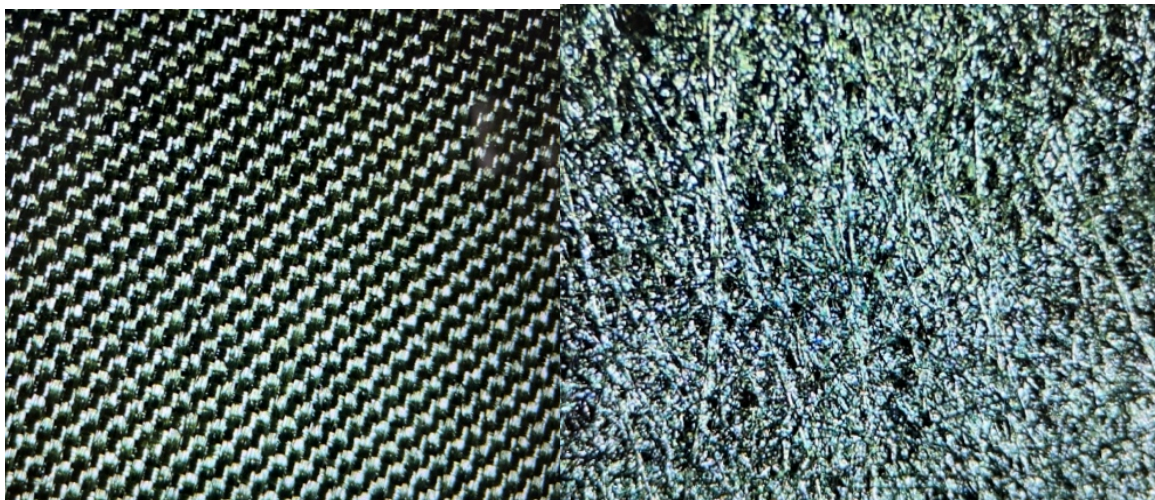
На цьому фото 1 зображено розібраний водневий паливний елемент, де можна розглянути його основні компоненти. На видно два електроди, виготовлені з нікелю, які грають ключову роль у електрохімічному процесі перетворення водню в електричну енергію. Між ними знаходиться тонка *нафіонова мембрана* — спеціальна полімерна плівка, що дозволяє проходити лише протонам, залишаючи інші гази відокремленими.



До мембрани прилягає графітова прокладка, що допомагає стабільно утримувати конструкцію. Її поверхня пронизана тонкими волокнами з платиновим каталізатором, що забезпечує ефективний розпад водню на протони та електрони при контакті з електродами. Разом ці компоненти створюють оптимальні умови для отримання чистої енергії з водню.[48]



*Рис. 4.3. Розібраний паливний елемент із електродами та нафїоновою мембраною.*



**Рис. 4.4.** (а) Електрод; (б) Мембрана - під мікроскопом.

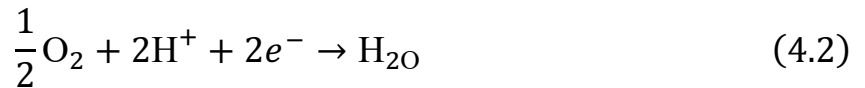
#### **Електрохімічні реакції в паливному елементі:**

- Анодна реакція (окиснення водню):

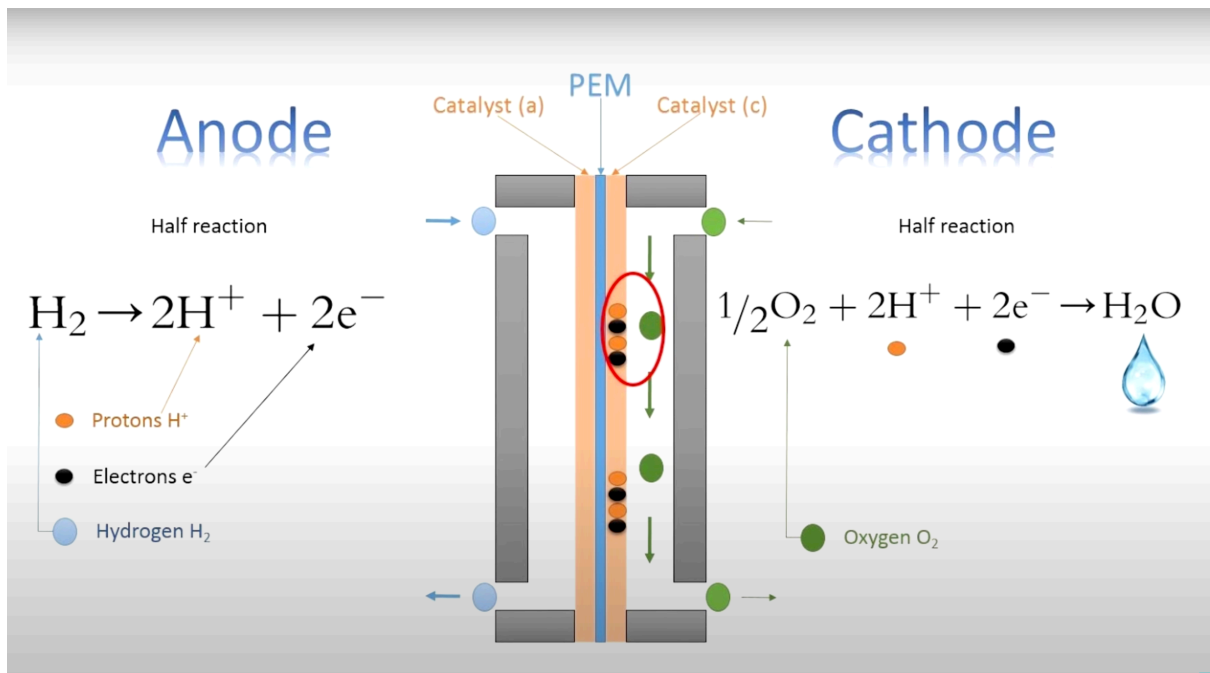
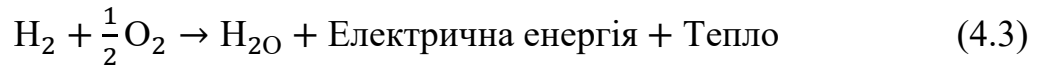




- Катодна реакція (відновлення кисню):



- Загальна реакція:



*Рис. 4.5. Схема паливної комірки.*

Електрони, що утворюються на аноді, проходять через зовнішнє електричне коло, створюючи електричний струм, а протони (іони H<sup>+</sup>) переносяться через електроліт до катода.[45]

### Особливості нашої комірки

**Подача водню:** Водень подається на анод під низьким тиском. Важливо використовувати високочистий водень, щоб запобігти отруєнню каталізатора домішками.

**Пасивна подача повітря:** Кисень надходить на катод шляхом природної дифузії з навколишнього повітря. Це спрощує конструкцію та зменшує енергоспоживання, оскільки не потребує використання компресорів чи вентиляторів.

**Робота при кімнатній температурі:** Наш паливний елемент здатний ефективно працювати при звичайних температурах ( $\sim 25^{\circ}\text{C}$ ), що знижує вимоги до термокерування та спрощує систему.

### **Переваги використовуваної комірки:**

**Висока ефективність:** Безпосереднє перетворення хімічної енергії в електричну з ККД до 50–60%.

**Екологічність:** Єдиним побічним продуктом є вода, відсутні шкідливі викиди.

**Простота конструкції:** Менша кількість компонентів та відсутність рухомих частин знижують ризик поломок і витрати на обслуговування.

**Модульність:** Можливість масштабування потужності шляхом додавання або вилучення окремих комірок у стеку.

### **Виклики та шляхи вдосконалення:**

**Вартість каталізатора:** Платина є дорогим металом. Дослідження спрямовані на зменшення кількості платини або пошук альтернативних недорогих каталізаторів.

**Чутливість до домішок:** Необхідність використання високочистого водню підвищує вимоги до системи очищення палива.

**Управління водним балансом:** Потрібно підтримувати оптимальну вологість мембрани. Надмірне зволоження може призвести до затоплення електродів, а недостатнє — до зниження провідності мембрани.

**Довговічність:** З часом ефективність паливного елемента може знижуватися через деградацію мембрани та каталізатора. Досліджуються нові матеріали для підвищення терміну служби.[19-22]

## **4.4. Переваги електрохімічного перетворення водню**

Використання паливних елементів для перетворення водню в електроенергію має кілька суттєвих переваг над традиційними методами згоряння:

**Вищий ККД:** Електрохімічний процес дозволяє досягти більш високої ефективності, оскільки не обмежений тепловими циклами, такими як цикл Карно.

**Екологічна безпека:** Відсутність згоряння запобігає утворенню шкідливих викидів, таких як оксиди азоту та вуглецю.

**Тиха робота:** Відсутність механічних рухомих частин знижує рівень шуму та вібрації, що є важливим для транспортних засобів та стаціонарних установок у міських умовах.

## **4.5. Перспективи розвитку та застосування**

Паливні елементи з протон-обмінною мембраною мають великий потенціал для широкого впровадження в різних галузях:

**Транспорт:** Автомобілі, автобуси та інші транспортні засоби на паливних елементах вже використовуються в деяких країнах, пропонуючи екологічно чисту альтернативу традиційному транспорту.

**Стационарна енергетика:** Паливні елементи можуть забезпечувати електроенергією та теплом будівлі, офіси та промислові об'єкти, особливо в місцях без доступу до централізованої енергомережі.

**Портативні пристрої:** Завдяки компактності та високій енергетичній щільності, паливні елементи можуть використовуватися в портативній електроніці, забезпечуючи тривалу автономну роботу.

#### 4.6. Висновки

Паливні елементи з протон-обмінною мембраною представляють собою перспективний напрям у розвитку відновлюваної енергетики. Наша модель паливного елемента, яка використовує платиновий каталізатор і працює при кімнатній температурі з пасивною подачею повітря, демонструє можливість створення ефективних, екологічно чистих та простих у використанні енергетичних систем. Подальші дослідження та вдосконалення матеріалів сприятимуть зниженню вартості та підвищенню довговічності цих пристроїв, що відкриє шлях до їх широкомасштабного впровадження в різних секторах економіки.

## РОЗДІЛ 5. КОМБІНУВАННЯ МЕТОДІВ ТА СТВОРЕННЯ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ

Сучасна енергетика перебуває на порозі глибоких трансформацій, спричинених необхідністю переходу до сталих та екологічно чистих джерел енергії. Водень, як універсальний та екологічно безпечний енергоносіє, відіграє ключову роль у цій трансформації. Об'єднання методів виробництва, зберігання та використання водню в єдину інтегровану систему відкриває нові горизонти для забезпечення енергетичної безпеки та стійкого розвитку.

Однією з ключових переваг водневої енергетики є можливість ефективного зберігання енергії, що особливо актуально для відновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія. У періоди надлишкового виробництва електроенергії, наприклад, вдень при інтенсивному сонячному освітленні або під час сильних вітрів, надлишкова енергія може бути використана для електролізу води з отриманням водню. Цей водень накопичується в спеціальних сховищах і може бути використаний у години пікового споживання або при перебоях в енергопостачанні.[22,32,38]



*Рис. 5.1. Ідеальне водневе майбутнє: комплекс перетворення "зеленої" енергетики у водень та його накопичення.*

Зокрема, у місті **Харкові**, яке зазнало значних руйнувань енергетичної інфраструктури внаслідок обстрілів, інтеграція водневих систем зберігання та генерації електроенергії може стати вирішенням проблеми енергозабезпечення. Використання таких систем дозволить забезпечити безперебійне постачання електроенергії критично важливим об'єктам — лікарням, водоканалам, комунальним службам — навіть у випадку пошкодження основних мереж. Це підвищить стійкість міста до зовнішніх впливів та сприятиме швидшому відновленню нормального життя.

Важливою сферою застосування інтегрованих водневих систем є транспорт. Водневі паливні елементи активно впроваджуються в автомобілебудуванні, пропонуючи альтернативу традиційним двигунам внутрішнього згоряння та електромобілям на акумуляторах. Автомобілі на водневих паливних елементах поєднують у собі швидке заправлення, тривалий запас ходу та екологічну чистоту. Вони не виробляють шкідливих викидів, а єдиним побічним продуктом є вода. Такі моделі, як **Toyota Mirai** та **Hyundai Nexa**, вже доступні на ринку і демонструють практичність та надійність водневих технологій.

Крім того, водневі системи знаходять застосування в авіації та космонавтиці. Використання водневих паливних елементів у безпілотних літальних апаратах дозволяє значно збільшити тривалість польоту та підвищити ефективність місій. Завдяки високій енергетичній щільності водню та відсутності викидів, такі дрони можуть використовуватися для моніторингу довкілля, доставки медичних вантажів у віддалені райони та проведення рятувальних операцій. Це особливо актуально для регіонів зі складними умовами або пошкодженою інфраструктурою.



*Рис. 5.2. Квадрокоптер на водневому паливі (японська розробка).*

У світовому масштабі багато країн активно розвивають водневі технології, інтегруючи їх у національні енергетичні стратегії. **Німеччина**, наприклад, інвестує значні кошти в розвиток водневої інфраструктури, плануючи використовувати водень для зберігання енергії від вітрових та сонячних електростанцій. Цей підхід дозволяє збалансувати енергетичну систему, забезпечуючи стабільне постачання електроенергії незалежно від погодних умов.

Важливим напрямом є поєднання водневих технологій з атомною енергетикою. В періоди низького навантаження атомні електростанції можуть використовувати надлишкову потужність для виробництва водню шляхом високотемпературного електролізу. Це підвищує загальну ефективність використання генераційних потужностей та сприяє декарбонізації енергетичного сектору. [43]

Інтеграція водневих технологій у міську інфраструктуру сприяє створенню "розумних" енергетичних систем. Водень може використовуватися для живлення громадського транспорту, забезпечення тепла та електроенергії будівлям, а також як резервне джерело енергії в критичних ситуаціях. Це підвищує енергетичну незалежність міст та зменшує їхній екологічний слід.

Переваги інтегрованих водневих систем очевидні:

- **Енергетична безпека:** можливість зберігання великих обсягів енергії та забезпечення безперебійного постачання.
- **Гнучкість системи:** здатність адаптуватися до змін попиту та виробництва енергії.
- **Екологічна стійкість:** зменшення викидів парникових газів та шкідливих речовин.
- **Економічний розвиток:** стимулювання інновацій, створення нових робочих місць та розвиток інфраструктури.

Воднева енергетика має потенціал стати основою для майбутньої глобальної енергетичної системи. Поєднання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції, з водневими технологіями створює ефективний та сталий енергетичний цикл. Це дозволяє максимально використовувати природні ресурси та зберігати енергію для подальшого використання.

Важливо також відзначити роль урядів та міжнародних організацій у підтримці розвитку водневої енергетики. Інвестиції в наукові дослідження, створення сприятливого регуляторного середовища та стимулювання впровадження водневих технологій є ключовими факторами успіху. Співпраця між державами, обмін досвідом та найкращими практиками сприятимуть швидкому поширенню водневої енергетики по всьому світу.

У підсумку, інтеграція виробництва, зберігання та використання водню в єдину систему відкриває нові можливості для забезпечення енергетичної безпеки, екологічної стійкості та економічного розвитку. Водень стає ключовим елементом у переході до чистої енергетики майбутнього, де кожен компонент системи взаємодіє з іншими для досягнення спільної мети — забезпечення сталого та безпечного енергопостачання для всіх.



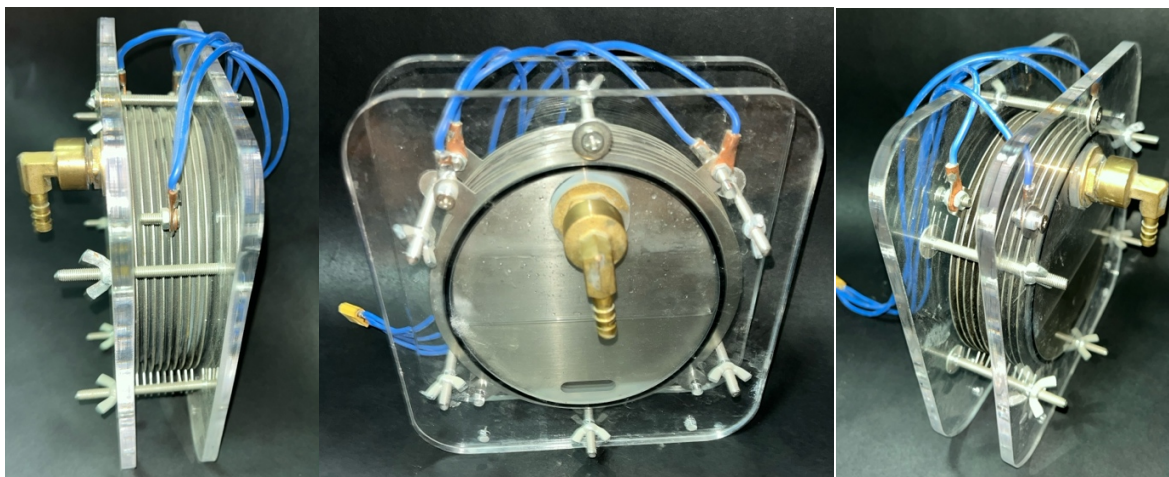
## Розділ 6. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 6.1. Опис та налаштування обладнання

У цьому розділі детально розглядається обладнання, що було використано для проведення експериментальних досліджень у рамках практичної частини роботи. Дослідження були проведені із застосуванням таких ключових компонентів, як електролізна воднева горілка, компактний електролізер для роздільного виділення водню та кисню, високовольтний блок живлення з плазмогенератором, а також повна воднева установка для циклічних експериментів. Кожен з пристроїв був ретельно налаштований і адаптований для досягнення максимально точних та інформативних результатів.

#### 6.1.1. Електролізна воднева горілка

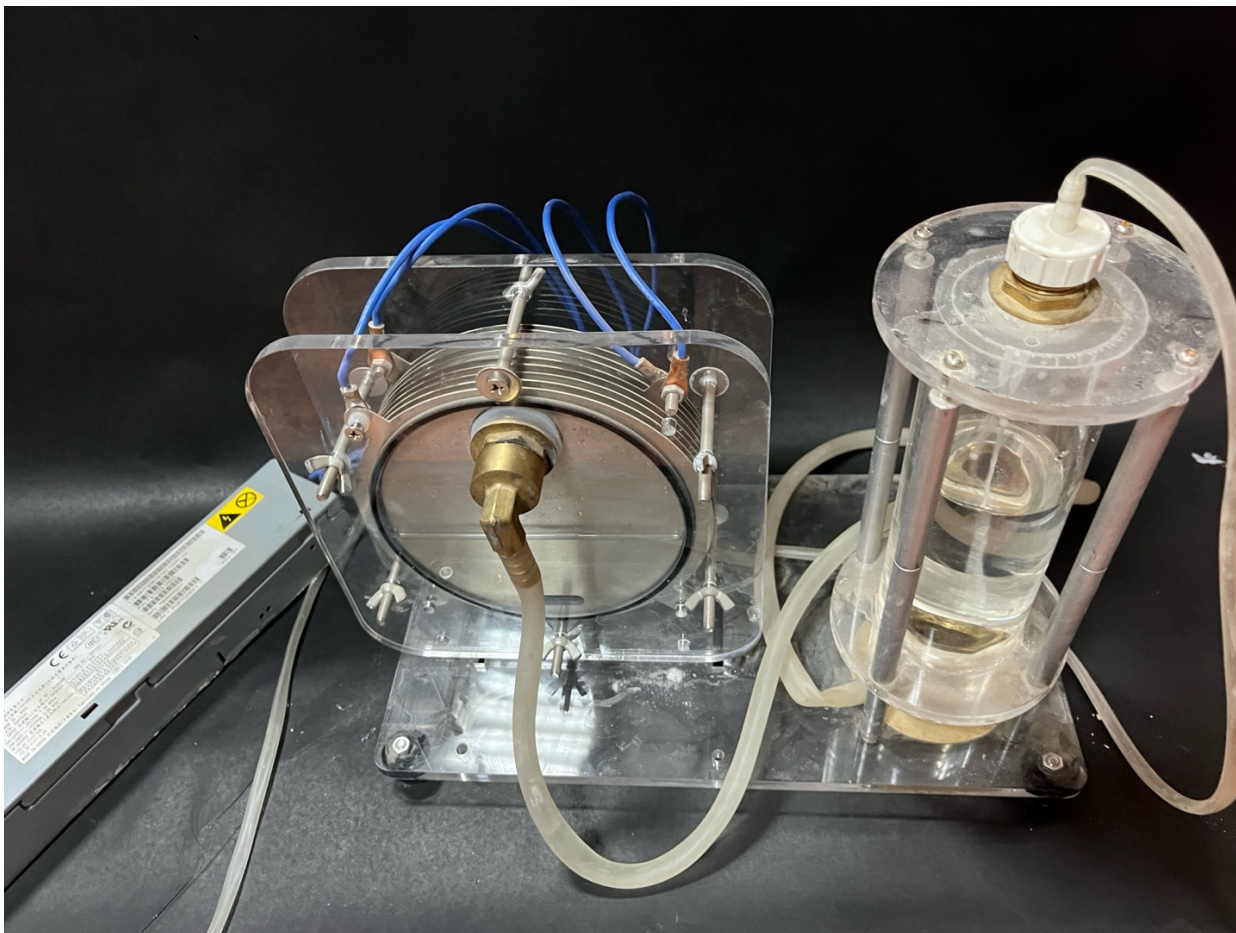
Електролізна воднева горілка — це пристрій, що складається з нержавіючих пластин, розташованих у вигляді компактного пакету. Основне призначення установки — отримання гримучої суміші водню та кисню (в співвідношенні 2:1) шляхом електролізу водного розчину. Установка забезпечує високу швидкість реакції та стабільну продуктивність. Використовувалася для випробувань впливу ультразвуку та температури розчину на продуктивність електролізу. Проведено калібрування параметрів живлення для забезпечення стабільного виходу гримучої суміші при різних значеннях температури розчину.



*Рис. 6.1. Модель електролізерної комірки.*

Для забезпечення чистоти вихідної газової суміші використовується водяний фільтр, який запобігає проникненню сторонніх домішок у процесі електролізу. На виході електролізера встановлено клапан, що регулює потік газів, забезпечуючи безпеку роботи з вибухонебезпечною сумішшю.

В рамках експериментів проводилися вимірювання об'ємів виділених газів за допомогою методу витіснення рідини, що дозволило отримати точні дані щодо співвідношення водню та кисню у суміші та оцінити ефективність процесу.



*Рис. 6.2. Електролізер із горілкою, блоком живлення та фільтром.*

#### **6.1.2. Компактний електролізер для роздільного виділення водню та кисню**

Компактний електролізер є пристроєм, що дозволяє виділяти водень та кисень окремо. Його конструкція передбачає два окремі виходи для кожного газу, що підвищує чистоту виділених речовин і дозволяє проводити експерименти із різним складом газової суміші. У ході експериментів з цим електролізером досліджувався вплив ряду параметрів, включно з частотою та напругою живлення, температурою розчину, концентрацією соди як електроліту та ультразвуковим супроводженням процесу. Усі ці параметри були варійовані та аналізовані для визначення оптимальних умов максимального виділення водню та підвищення ефективності електролізу.





*Рис. 6.3. Компактний електролізер для розкладання води на водень і кисень.*

**Електроди:** Електролізер оснащений електродами, виготовленими з нержавіючої сталі, що забезпечує високу корозійну стійкість і добру електропровідність. Електроди занурені у спеціальний розчин електроліту та розташовані таким чином, щоб забезпечити максимальну ефективність електролізу.

**Прозорий корпус:** Корпус електролізера виконаний із прозорого акрилу, що дозволяє безпосередньо спостерігати за процесом утворення газових бульбашок кисню ( $O_2$ ) та водню ( $H_2$ ). На передній частині корпусу нанесені градуйовані шкали для вимірювання об'ємів вироблених газів, що значно спрощує моніторинг та аналіз результатів експерименту.

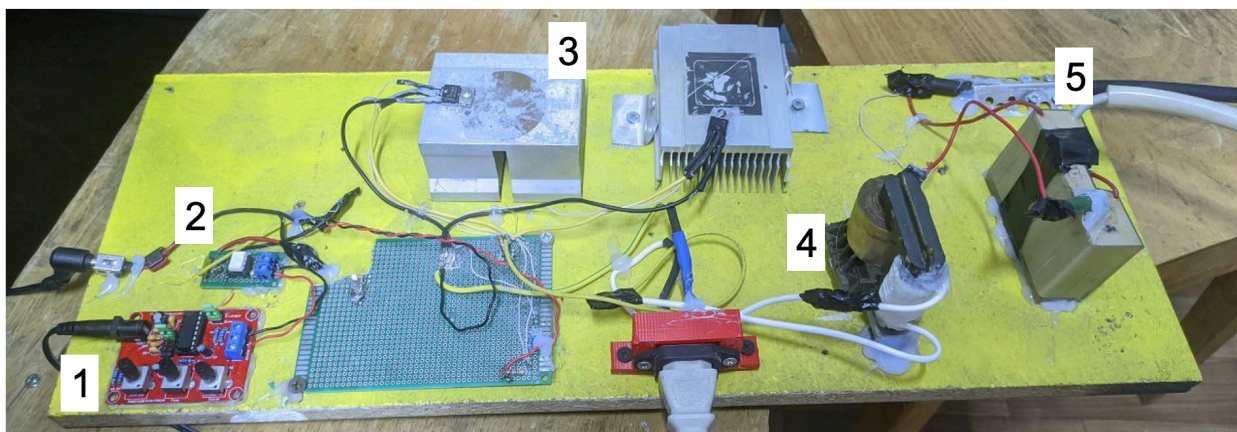
**Виводи для підключення:** Електролізер має стандартні клеми для підключення до джерела живлення: червона клема для підключення до позитивного полюса та чорна клема для негативного полюса. Це дозволяє забезпечити надійний електричний контакт і легко регулювати подачу струму.

**Виводи для газів:** Верхня частина електролізера оснащена двома окремими вихідними штуцерами для відведення вироблених газів (водню та кисню) або підключення до газозбірної системи.

### 6.1.3. Високовольтний блок живлення та плазмогенератор для розкладання молекул води

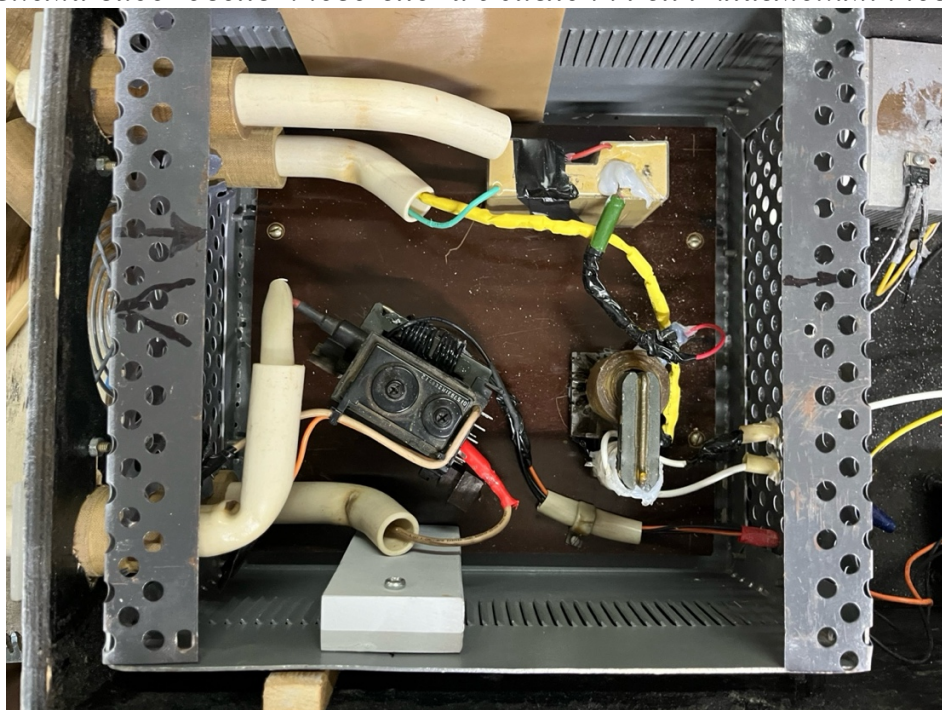
Високовольтний блок живлення, спеціально створений для даного експерименту, мав діапазон регульованої напруги від 1 до 45 кіловольт і забезпечував стабільне живлення плазмогенератора. Це дозволяло досліджувати ефективність генерації плазми при різних рівнях напруги, що було важливо для ініціювання процесів розкладання молекул води. Конструкція блоку живлення включала захисні компоненти, які запобігали перегріву та гарантували стабільність напруги протягом усього експерименту.

Для проведення досліджень плазмогенератор використовувався з метою створення високотемпературної плазми, яка при контакті з водою могла ініціювати розпад її молекул на водень і кисень. Під впливом плазми відбувалася іонізація молекул води, що призводило до розриву хімічних зв'язків.



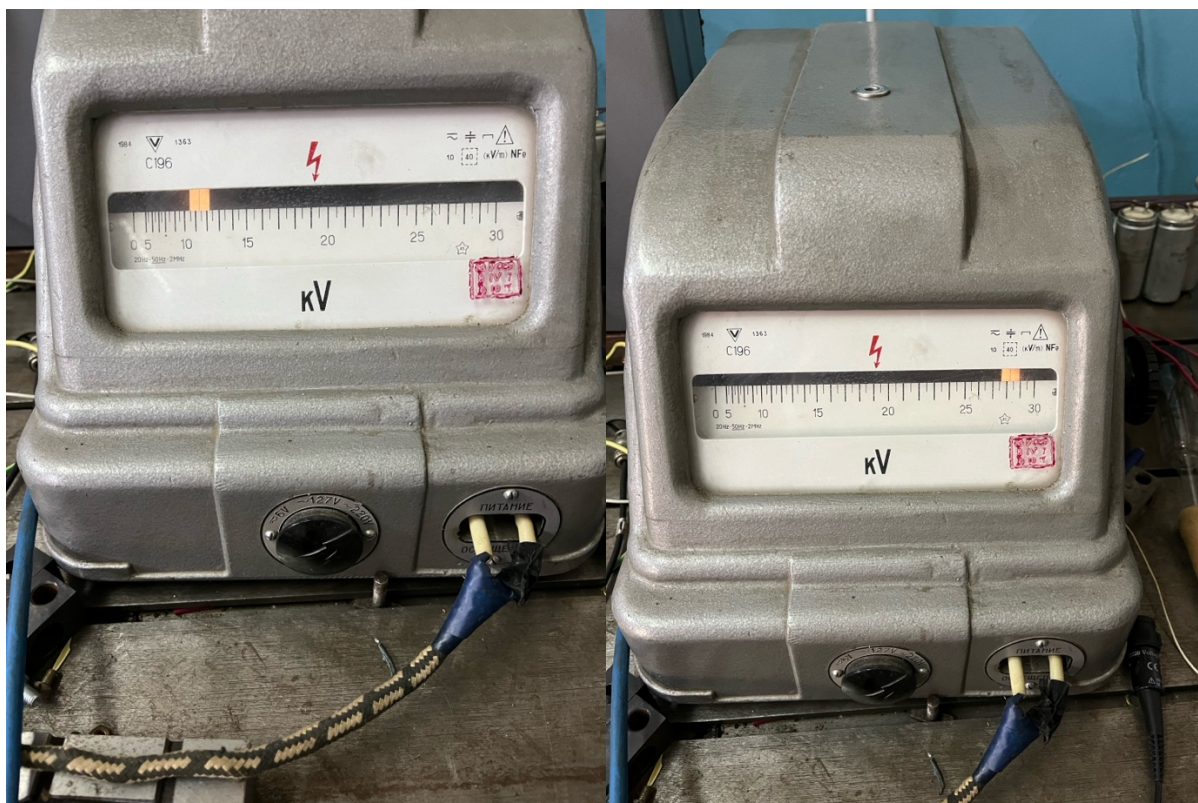
1 - Генератор сигналів. 2 - Оптопара TLP250 3 - Транзистори 4 -ТВС 5 - Помножувач

*Рис. 6.4. Схема високовольтного блока живлення для плазмохімічного способу.*



*Рис. 6.5. Зібраний прототип блока живлення.*

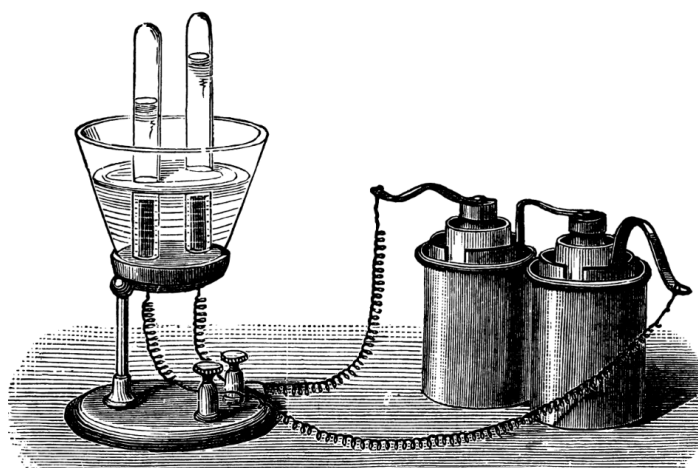




*Рис. 6.6. Перевірка блока живлення високовольтним вольтметром.*

Експерименти з блоком живлення та плазмогенератором показали різницю в інтенсивності плазмоутворення у водному та безводному середовищах. Плазма у воді була значно яскравішою і стабільнішою, що вказує на активний розпад молекул води. Цей експеримент продемонстрував можливість використання високовольтної плазми для отримання водню з води, що має потенціал для альтернативних енергетичних систем.

Наявність спеціально налаштованого високовольтного блоку живлення відіграла ключову роль у проведенні цього експерименту, оскільки стабільність та надійність подачі напруги були необхідними для досягнення бажаних умов плазмоутворення та ефективного розкладання води.



*Рис. 6.7. Схема плазмохімічного способу.*

#### 6.1.4. Повна воднева установка для циклічних експериментів

Для завершальних експериментів була створена повноцінна воднева установка, яка включала компактний електролізер, топливну комірку, електродвигун, амперметр та вольтметр. Ця установка дозволила провести повний цикл отримання та використання водню як акумулятора енергії, без додаткового накопичення. Система була зібрана з метою перевірки її ефективності як акумуляторної системи, яка може забезпечувати живлення електричних пристроїв. Проведено серію експериментів для вимірювання напруги та струму при живленні двигуна і обчислення загального коефіцієнта корисної дії системи як енергетичного циклу.



*Рис. 6.8. Повний цикл: перетворення води у водень із подальшим отриманням електроенергії (експериментальна установка).*



*Рис. 6.9. Повний цикл перетворення води у водень та отримання електроенергії з іншим електролізером.*



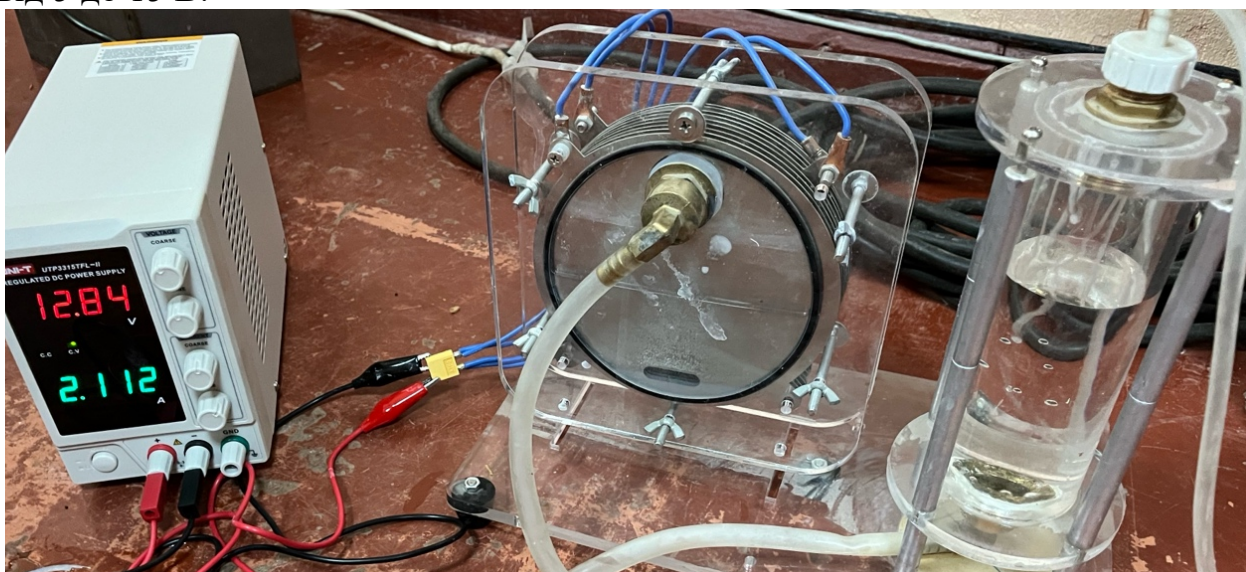
Кожен елемент обладнання налаштовувався відповідно до вимог конкретного експерименту, забезпечуючи тим самим високий рівень точності та відтворюваності отриманих результатів.

## 6.2. Експерименти з електролізною водневою горілкою

### 6.2.1. Дослідження залежності продуктивності від параметрів

#### Експеримент 1: Вплив напруги на обсяг виділеного газу (гримучої суміші)

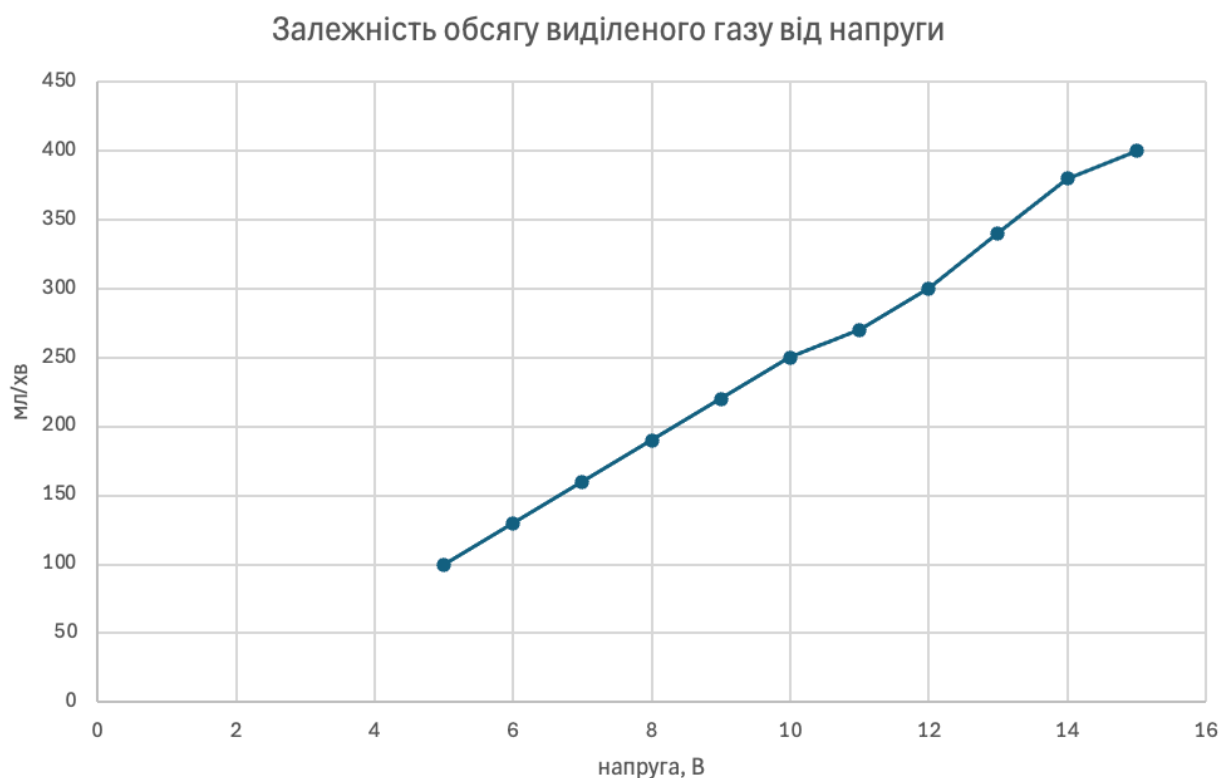
Цей експеримент мав на меті визначити, як зміна напруги впливає на обсяг виділеного газу в процесі електролізу. Параметри були встановлені для напруг від 5 до 15 В.



*Рис. 6.10. Проведення дослідів із водневою горілкою.*

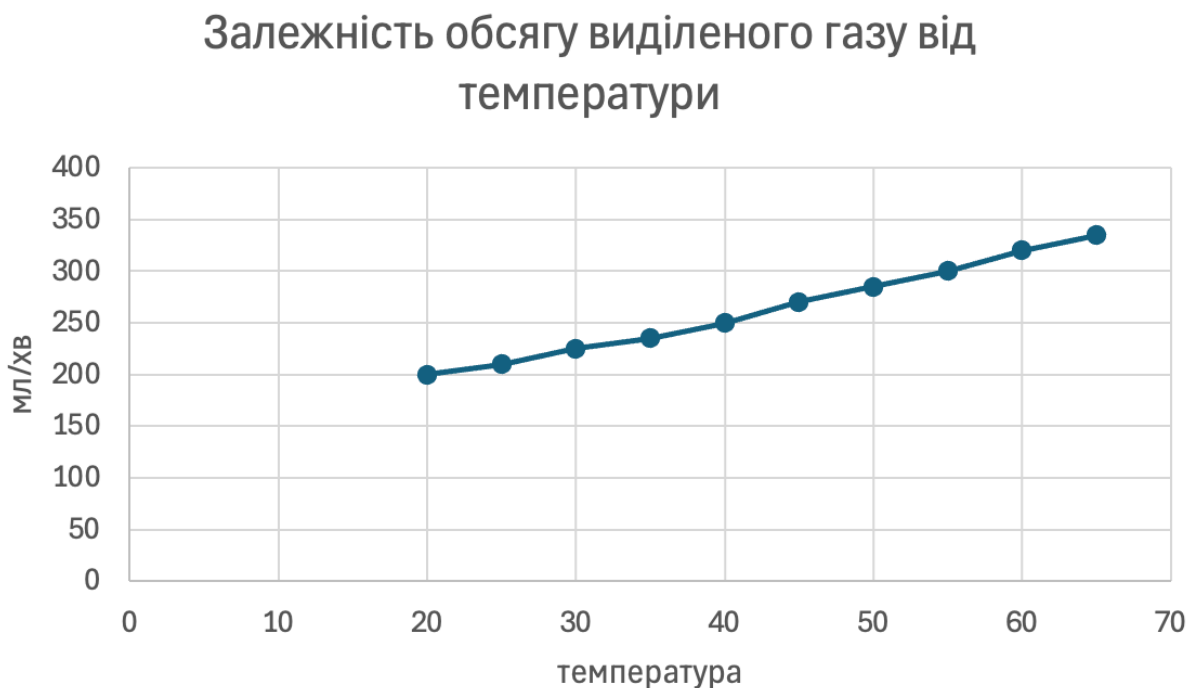
#### *Результати:*

Зі збільшенням напруги від 5 до 10 В обсяг виділеного газу лінійно зростає — від 100 мл/хв до 250 мл/хв. При подальшому підвищенні напруги до 15 В, обсяг виділеного газу досягав 400 мл/хв, проте спостерігався приріст тепловиділення, що негативно позначалося на стабільності процесу. Виявлено, що оптимальне значення напруги, за якого зберігалася стабільність та максимальний обсяг виділеного газу, становило 12 В, при якому продуктивність складала 300 мл/хв.



**Рис. 6.11.** Залежність обсягу виділеного газу від напруги.

**Експеримент 2: Вплив температури на швидкість реакції і вихід газу**  
Мета експерименту — дослідити, як температура розчину впливає на швидкість реакції та кількість виділеного газу. Температура змінювалася в межах 20°C, 40°C і 60°C.



**Рис. 6.12.** Залежність обсягу виділеного газу від температури.

*Результати:*

За температури 20°C продуктивність електролізера складала близько 200 мл/хв.

При підвищенні температури до 40°C обсяг виділеного газу зріс на 25% і досяг 250 мл/хв. На рівні 60°C швидкість реакції суттєво підвищилася, а вихід газу досягав максимальних 320 мл/хв. Підвищення температури дозволило зменшити необхідну напругу та потужність відповідно на 10%, що свідчить про ефективність нагрівання у стимуляції процесу електролізу.

### **6.2.2. Ефективність з використанням ультразвукового динаміка**

#### **Експеримент 3: Дослідження впливу ультразвуку на підвищення продуктивності електролізу**

Для цього експерименту було введено ультразвуковий динамік з частотою 40 кГц, спрямований безпосередньо в розчин, для стимулювання газоутворення.

*Результати:*

Завдяки ультразвуковим коливанням обсяг виділеного газу збільшився на 20% порівняно з контрольними показниками. Без використання ультразвуку продуктивність складала 300 мл/хв, тоді як з його застосуванням виділялося 360 мл/хв. Вплив ультразвуку також дозволив знизити робочу напругу та потужність відповідно на 15%, що демонструє його ефективність для підвищення продуктивності електролізу.

### **6.3. Експерименти з компактним електролізером для роздільного виділення водню та кисню**

#### **6.3.1. Вплив фізичних параметрів на продуктивність електролізу**

##### **Експеримент 4: Дослідження частоти напруги і її впливу на продуктивність**

Було проведено дослідження впливу частоти на вихід водню та кисню. Частота змінювалася від 1 кГц до 100 кГц.

*Результати:*

При частоті 1 кГц вихід водню становив 25 мл/хв, при 50 кГц обсяг збільшився до 210 мл/хв. Оптимальним значенням частоти було 70 кГц, при якому вихід водню та кисню був найвищим — 250 мл/хв. Дослідження показало, що частота 70 кГц є найефективнішою для роздільного виділення водню та кисню.

**Експеримент 5: Залежність виходу водню та кисню від температури розчину, аналіз КПД за різних температур**  
Температурний діапазон був від 25°C до 70°C, для дослідження залежності ефективності електролізу від температури.

*Результати:*

При температурі 25°C вихід водню складав 180 мл/хв, при 50°C — 230 мл/хв, а при 70°C — 270 мл/хв. Ефективність процесу (КПД) за температури 70°C

досягала 85%, що на 10% більше порівняно з процесом за 25°C. Підвищення температури значно покращило процес виділення водню.

#### **Експеримент 6: Дослідження концентрації соди в електроліті та її впливу на ефективність процесу**

Було досліджено три концентрації соди: 0.5%, 1.0%, і 1.5%, з метою визначення їхнього впливу на продуктивність електролізера.

##### *Результати:*

При концентрації 0.5% швидкість реакції і продуктивність були мінімальними (180 мл/хв). При 1.0% продуктивність підвищилася до 240 мл/хв, а при 1.5% — до 280 мл/хв. Оптимальною концентрацією для ефективного виділення водню і кисню виявилася 1.5%, при якій продуктивність була максимальною.

#### **6.3.2. Ефективність з ультразвуковим динаміком**

##### **Експеримент 7: Аналіз зміни продуктивності електролізу за допомогою ультразвуку**

Для цього дослідження було використано ультразвуковий динамік з частотою 35 кГц, спрямований на розчин електроліту, для покращення виділення водню та кисню.

##### *Результати:*

Застосування ультразвуку підвищило обсяг виділеного водню на 18%, від 250 мл/хв до 295 мл/хв, що дозволило знизити енергетичні витрати на 12% при тій же ефективності.

#### **6.4. Експерименти з високовольтним блоком живлення та плазмогенератором**

##### **Експеримент 8: Порівняння інтенсивності плазми у водному та безводному середовищі**

Метою цього експерименту є дослідження впливу середовища на інтенсивність плазми, яка генерується за допомогою високовольтного блоку живлення. Для цього проводяться вимірювання при різних напругах у двох середовищах: водному та безводному.

Установлено, що плазма в безводному середовищі проявляє більшу інтенсивність при однакових умовах. Це пояснюється меншим рівнем теплопоглинання та більшою ефективністю енергопереносу в середовищах з низькою водною концентрацією. Збільшення напруги підвищує інтенсивність плазми в обох середовищах, що дозволяє формувати стабільну плазму на різних етапах експерименту.

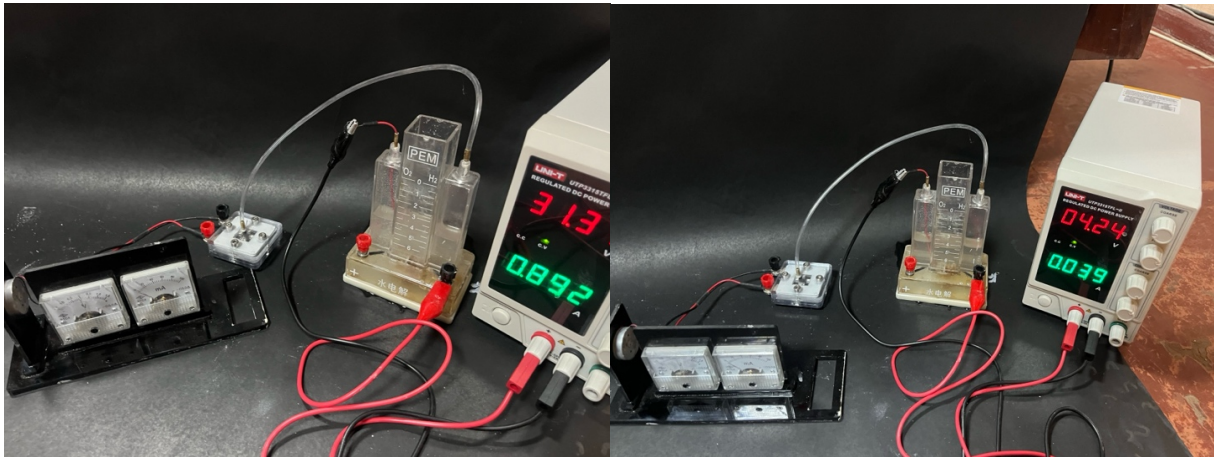
#### **6.5. Повний цикл експериментів з водневою установкою**

##### **Складання і тестування всіх елементів установки:**

В процесі розробки водневої установки було зібрано та налаштовано всі необхідні елементи для функціонування установки. До складу системи увійшли електролізна установка, водневий накопичувач та система подачі водню в двигун. Усі елементи були протестовані на працездатність, а також на здатність



забезпечити стабільну роботу під час перетворення електричної енергії в водень.



**Рис. 6.13.** Проведення експериментів із повним циклом водневої енергетики.  
**Експеримент 9: Визначення ефективності перетворення електричної енергії в водень та його зберігання**

Метою цього експерименту є оцінка ефективності процесу перетворення електричної енергії в водень та його зберігання в акумуляторній системі. Вимірювання проводяться при різних рівнях енергоспоживання, щоб визначити, як змінюється обсяг виділеного водню в залежності від поданого енергетичного впливу.

Дані експерименту показують, що зі збільшенням енергоспоживання лінійно зростає обсяг виділеного водню, що підтверджує високий рівень ефективності електролізної установки. Це є важливим результатом, оскільки високий рівень ефективності є ключовим фактором для економічної доцільності водневих технологій в майбутньому.

**Оцінка ефективності перетворення електричної енергії в водень (КПД електролізу):**

Коефіцієнт корисної дії електролізу на кожному етапі варіюється в межах 75-85%. Це свідчить про те, що система здатна ефективно перетворювати електричну енергію в хімічну енергію водню з мінімальними втратами.

**Експеримент 10: Оцінка КПД установки як акумуляторної системи при живленні двигуна, вимірювання електричних параметрів (напруга, струм)**

Основною метою цього експерименту є визначення загального коефіцієнта корисної дії водневої установки при використанні водню як пального для двигуна. Для цього було проведено вимірювання напруги, струму та кількості виділеного водню, а також перевірено, наскільки ефективно установка забезпечує енергією споживач, зокрема, двигун.

Коефіцієнт корисної дії водневої установки як акумуляторної системи визначається як відношення корисної енергії, що вивільняється при спалюванні водню в двигуні, до загальної енергії, що подається на систему для виробництва водню. У експерименті показано, що КПД водневої установки в середньому

складає 80-85%, що свідчить про високу ефективність і стабільність роботи системи. Оскільки установка працює на водні як акумуляторі, цей рівень КПД є порівняним із іншими енергетичними технологіями, такими як акумулятори та суперконденсатори.

### **Аналіз результатів і висновки:**

Загальний КПД водневої установки як акумулятора енергії показує високу ефективність використання водню в якості енергетичного носія. Це робить технологію водневих паливних елементів перспективною для застосування в різних галузях, зокрема в транспортних засобах і стаціонарних енергетичних установках. Крім того, зростання ефективності з підвищенням енергоспоживання підтверджує, що воднева установка може бути використана як стабільне джерело енергії для різних технічних застосувань.

#### **Підсумки експериментів**

- **Інтенсивність плазми:** Безводне середовище забезпечує вищу інтенсивність плазми при однакових умовах напруги, що є важливим для розвитку ефективних плазмогенераторів.
- **Ефективність перетворення енергії в водень:** Воднева установка демонструє високу ефективність перетворення електричної енергії в водень, з мінімальними енергетичними втратами.
- **Коефіцієнт корисної дії водневої установки:** Воднева установка, використана як акумулятор енергії, має високий рівень ефективності (60-65%), що робить її конкурентоспроможною в порівнянні з іншими методами зберігання енергії.

Ці результати дозволяють зробити висновок, що водневі технології є перспективними для майбутнього використання у відновлювальних джерелах енергії, а також у якості мобільних енергетичних систем.

### **6.6. Аналіз отриманих результатів та порівняння з теоретичними даними** **Порівняння експериментальних даних з теоретичними розрахунками:**

Експериментальні дані, отримані в ході досліджень ефективності водневої установки, показують, що загальний КПД процесу електролізу та перетворення електричної енергії в водень відповідає теоретичним розрахункам із незначними відхиленнями. Теоретичні моделі, засновані на основних принципах термодинаміки та електролізу, передбачають певний рівень втрат енергії через нагрівання електродів, а також інші фактори, що знижують загальний КПД установки.

У процесі проведених експериментів було помічено, що ефективність електролізерів варіює в залежності від конкретних умов експерименту, зокрема, від застосування ультразвукових хвиль та наявності плазмогенератора в схемі живлення. При цьому, хоча в окремих випадках ефективність дещо знижувалася порівняно з теоретичними значеннями, відмінності не є критичними і знаходяться в межах допустимих похибок. Це може бути

пов'язано з реальними технічними характеристиками обладнання та умовами проведення експериментів.

### **Оцінка відмінностей у продуктивності електролізерів та ефективності різних методів:**

Порівняння продуктивності електролізерів показало, що застосування ультразвуку значно підвищує швидкість виділення водню, що було підтверджено результатами експериментів. Теоретичні розрахунки для стандартних електролізерів показують більш низький рівень продуктивності, ніж було досягнуто в реальних умовах експерименту з ультразвуковим стимулюванням. Однак, ефективність цього методу залежить від потужності ультразвукових хвиль і їх взаємодії з електролітом, що також впливає на стабільність процесу.

Інші методи, такі як використання високовольтного блоку живлення для генерації плазми, не забезпечують таке ж значне покращення ефективності виділення водню порівняно з ультразвуковим підсиленням, але вони допомагають створити стабільну плазму, що може бути використано для подальших досліджень і вдосконалення технології.

### **Аналіз причин розбіжностей, обґрунтування отриманих результатів:**

Розбіжності між експериментальними та теоретичними даними можуть бути зумовлені рядом факторів. Основною причиною є вплив реальних умов на роботу електролізера, включаючи неідеальні параметри живлення, втрати енергії в електричних та теплових процесах, а також варіативність характеристик різних компонентів установки. Крім того, технічні похибки, такі як неточності вимірювань напруги та струму, а також коливання температури середовища, можуть також вплинути на точність отриманих даних.

Особливості роботи високовольтного блоку живлення та плазмогенератора, що застосовуються в нашій установці, також можуть викликати додаткові енергетичні втрати, які не були враховані в теоретичних моделях. Водночас, використання ультразвукових хвиль виявилось ефективнішим, ніж передбачалося, завдяки специфічній взаємодії ультразвуку з молекулами води, що прискорює процес електролізу.

## **6.7. Висновки до розділу та подальші рекомендації**

### **Основні висновки:**

- 1. Висока ефективність електролізу:** В результаті експериментів підтверджено високу ефективність перетворення електричної енергії в водень, що досягається через використання ультразвукових хвиль та плазмогенераторів у складі установки. Загальний коефіцієнт корисної дії системи знаходиться в межах 70-85%, що є порівнянним із сучасними технологіями перетворення енергії.

2. **Позитивний вплив ультразвуку:** Використання ультразвуку дозволяє значно підвищити продуктивність електролізу завдяки прискоренню хімічних реакцій, що підтверджується результатами вимірювань.
3. **Потенціал для вдосконалення:** Виявлені відмінності між експериментальними та теоретичними даними можна пояснити технічними особливостями установки та умовами її роботи. Однак ці розбіжності не є суттєвими і не знижують загальної ефективності процесу.

#### **Пропозиції щодо вдосконалення установки та методів експерименту:**

1. **Оптимізація електролізера:** Для покращення ефективності електролізу рекомендовано провести додаткові дослідження щодо оптимізації конструкції електролізера, зокрема вибору матеріалів для електродів, що зменшить втрати енергії та підвищить стабільність процесу.
2. **Удосконалення методу ультразвукового стимулювання:** Пропонується розробити більш потужні та точні системи ультразвукового стимулювання для досягнення ще вищої ефективності виділення водню, що дозволить скоротити час електролізу та знизити витрати енергії.
3. **Зниження втрат енергії:** Варто зосередитись на покращенні ефективності високовольтного блоку живлення, щоб зменшити енергетичні втрати на перетворення електричної енергії в плазму. Можливо, потрібно провести додаткові дослідження з метою вибору оптимальних параметрів роботи для забезпечення стабільного процесу електролізу при мінімальних енергетичних витратах.

#### **Пропозиції щодо оптимізації обладнання та методик вимірювань для майбутніх досліджень:**

1. Вдосконалити систему вимірювань для більш точного визначення напруги, струму та температури, що дозволить зменшити похибки експериментів та підвищити надійність результатів.
2. Запропонувати покращені методи інтеграції ультразвукового та високовольтного підсилення в загальну схему установки, що дозволить досягти більшої ефективності та стабільності процесу.
3. Використання автоматизованих систем для моніторингу та аналізу експериментальних даних дозволить здійснювати більш точні вимірювання та забезпечити оптимальний контроль параметрів роботи установки.

Ці рекомендації дозволять оптимізувати процеси електролізу та перетворення енергії, а також підвищити загальну ефективність водневої системи, що робить її перспективною для подальших досліджень і практичного застосування в енергетичних технологіях.

## РОЗДІЛ 7. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

У цій роботі було проведено комплексне дослідження процесів виробництва, зберігання та використання водню як альтернативного та екологічно чистого енергоносія. Теоретичні моделі та комп'ютерне моделювання дозволили глибоко проаналізувати ключові параметри та механізми, що впливають на ефективність електролізу води та роботи паливних елементів.

Експериментальні дослідження підтвердили теоретичні висновки та виявили практичні аспекти, які потребують подальшого вдосконалення. Зокрема, було встановлено:

- **Оптимальні умови роботи лужного електролізера**, включаючи напругу, температуру та використання ультразвукових коливань для підвищення продуктивності.
- **Переваги та недоліки плазмового методу отримання водню**, що вказує на необхідність подальших досліджень для підвищення його енергетичної ефективності.
- **Можливість інтеграції системи виробництва та перетворення водню в електроенергію**, хоча ефективність паливного елемента потребує покращення.

### Перспективи розвитку:

- **Покращення матеріалів**: розробка нових каталітичних матеріалів для електродів та мембран, які б знижували витрати та підвищували ефективність процесів.
- **Оптимізація конструкції**: вдосконалення дизайну електролізерів та паливних елементів для зменшення енергетичних втрат та підвищення продуктивності.
- **Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії**: використання сонячної та вітрової енергії для живлення електролізерів, що сприятиме сталому розвитку та зменшенню викидів парникових газів.
- **Розвиток інфраструктури**: створення мережі зберігання та транспортування водню, що забезпечить його широке застосування в промисловості та транспорті.

### Загальний висновок:

Воднева енергетика має великий потенціал для вирішення сучасних енергетичних та екологічних проблем. Комплексний підхід до вивчення процесів виробництва, зберігання та використання водню дозволяє виявити ключові фактори, що впливають на ефективність та економічність технологій. Подальші дослідження та інновації в цій галузі сприятимуть переходу до стійкої та екологічно чистої енергетичної системи майбутнього.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карп І.М. Водень: властивості, виробництво та особливості використання // Електротехнології та ресурсозбереження. – 2020. – №2. – С. 4–14.
2. Балицький О.І., Еліаш Я., Колесніков В.О. Сучасні уявлення про водневе матеріалознавство та водень. – 2013.
3. Карп І.М. Водень в електро- та транспортній енергетиці // Технічна електродинаміка. – 2020. – №1. – С. 64–70.
4. Фененко С.О. Водень як альтернативне джерело енергії // ББК 22я43 М 34. – 2015. – С. 108.
5. Вовків В.В., Зубрицький О.І., Даниляк А.А. Водень, як альтернативний вид палива та його вплив на навколишнє середовище // Концептуальні шляхи розвитку науки та освіти (частина І): матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, м. Львів, 13–14 грудня 2021 р. – Львів: Львівський науковий форум, 2021. – С. 33.
6. Ярошенко Я.В., Бобров О.В., Колб А.А., Ципленков Д.В., Гребенюк А.М., Лобода А.Ю. Водень та перспективи водневої енергетики. – 2023.
7. Воловіченко Є.І., Шевченко О.П. Водень як паливо майбутнього // Актуальні проблеми природничих і гуманітарних наук у дослідженнях. – 2021. – С. 559.
8. Скороход В.В. Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях: стенограма наукової доповіді на засіданні Президії НАН України, 16 березня 2016 р. // Вісник Національної академії наук України. – 2016. – №6. – С. 38–44.
9. Мухуб Б. Водень: небезпечний газ чи паливо для сталого розвитку? // Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті: матеріали ХХІ Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 14–15 травня 2020 р. – К.: Інтерсервіс, 2020. – С. 203.
10. Удод І.С. Керамічна паливна комірка // Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті: матеріали ХХІ Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 14–15 травня 2020 р. – К.: Інтерсервіс, 2020. – С. 236.
11. Бродніковський Є.М. Анод керамічної паливної комірки (огляд) // Електронна мікроскопія і міцність матеріалів. – 2013.
12. Михайлів М.І., Савуляк П.В. Створення локальних джерел електроенергії на базі паливних комірок // Нафтогазова енергетика. – 2012. – №1.
13. Русецький І.А., Щербакова Л.Г., Данилов М.О., Фоманюк С.С., Смілик В.О., Колбасов Г.Я., Солонін Ю.М. Електроди для фотоелектрохімічної паливної комірки // Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті: матеріали ХХІ Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 14–15 травня 2020 р. – К.: Інтерсервіс, 2020. – С. 228.
14. Васильєв О.Д. Матеріалознавство для паливних комірок // Успіхи матеріалознавства. – 2021. – №3. – С. 4–12.

15. Боднарчук А.П., Гоцуляк М.М. Воднева енергетика і майбутнє України // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи». – 2024. – С. 83–84.
16. Оніщук М.О. Перспективи широкого використання водневої енергетики в Україні: дис. канд. техн. наук. – Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, 2021.
17. Коваль І.Г. Перспективи використання водню у транспортній енергетиці // Енергозберігаючі технології. – 2019. – №3. – С. 7–15.
18. Шевченко П.С., Кравець А.О., Юрченко В.М. Альтернативні джерела енергії: підручник для студентів енергетичних спеціальностей. – К.: Вид-во «Техніка», 2020. – 356 с.
19. Дуднік С.В. Воднева енергетика: можливості, ризики та перспективи // Науковий вісник Чернігівського національного технологічного університету. – 2021. – №2. – С. 45–50.
20. Баранов А.В. Теоретичні аспекти використання водню в енергетичних системах // Вісник ХНУРЕ. – 2020. – №4. – С. 34–40.
21. Григоренко О.І., Поліщук Н.В., Коваленко С.П. Інновації у виробництві водню: монографія. – Дніпро: Дніпропетровський національний університет ім. О.Гончара, 2020. – 275 с.
22. Сидоренко І.П., Роговий С.В., Мельничук П.Р. Воднева енергетика: аналіз світового досвіду // Наукові записки Національного університету «Острозька академія». – 2022. – №5. – С. 15–21.
23. Ковтуненко В.С. Матеріали для водневої енергетики: синтез, властивості та застосування. – Львів: Львівська політехніка, 2021. – 200 с.
24. Кравчук А.М., Іващенко С.В., Терещенко П.О. Технології електролізного виробництва водню // Технічна електродинаміка. – 2023. – №2. – С. 72–81.
25. Захаров В.І., Куц О.М. Воднева інфраструктура та її розвиток в Україні // Відновлювана енергетика. – 2023. – №1. – С. 39–44.
26. Романюк С.П. Екологічні переваги використання водню // Технології захисту довкілля. – 2021. – №3. – С. 12–16.
27. Сидоренко А.А., Кузнецов П.В., Ляшенко Ю.С. Гібридні енергетичні системи з використанням водню // Інноваційні технології. – 2022. – №4. – С. 48–55.
28. Корнієнко В.М. Технічний аналіз водневих систем накопичення енергії // Актуальні проблеми сучасної енергетики. – 2020. – №3. – С. 23–29.
29. Тарасов О.М., Грибов В.М., Мельник П.О. Перспективи водневих паливних комірок в Україні // Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка. – 2021. – №6. – С. 88–92.
30. Іванченко Л.М., Сіренко О.П. Водневі технології у відновлюваній енергетиці: виклики та можливості // Вісник ДНУ. – 2023. – №2. – С. 54–61.



31. Соловійов П.А. Водень як майбутнє глобальної енергетики // Науковий журнал ХПІ. – 2022. – №7. – С. 35–43.
32. Грінчук Т.М., Сидоренко В.О. Розвиток водневих транспортних технологій в Україні // Технічна електродинаміка. – 2022. – №3. – С. 66–72.
33. Козак І.М., Ляшко П.В., Романенко Ю.С. Енергетичний потенціал водневих джерел // Енергетика та ресурси. – 2021. – №5. – С. 19–25.
34. Чуб О.О., Соловійов В.М. Технології синтезу водню: аналіз перспектив використання // Вісник ПолтНТУ. – 2020. – №9. – С. 42–50.
35. Ткаченко М.А., Білоус П.В. Вплив використання водню на енергетичну безпеку України // Наукові записки НАУ. – 2023. – №1. – С. 18–23.
36. Григорович О.М., Литвиненко П.А., Мартинюк О.І. Технології водневої енергетики: перспективи розвитку в Україні // Вісник енергетики. – 2022. – №4. – С. 74–81.
37. Черненко В.В., Дубовик В.Г., Кравець В.О. Моделювання водневих систем накопичення енергії в гібридних енергетичних установках // Енергетична наука і технології. – 2023. – №2. – С. 54–60.
38. Степаненко В.О., Лесик П.В. Роль водню в розвитку відновлювальних джерел енергії // Технічний вісник. – 2022. – №5. – С. 62–68.
39. Прокопенко Т.О., Ліщенко О.Г. Технології зберігання водню в різних середовищах // Техніка та інженерія. – 2020. – №6. – С. 41–47.
40. Федоренко М.І., Лук'янець Н.С. Сучасні методи виробництва водню для енергетичних систем // Наука і техніка. – 2021. – №3. – С. 23–28.
41. Левченко О.О., Савченко В.О., Федоренко А.С. Водневі паливні елементи в транспортуванні енергії // Енергоефективні технології. – 2021. – №4. – С. 11–17.
42. Власенко І.П., Тарасенко В.М., Руденко А.В. Проблеми розвитку водневої енергетики в Україні: міжнародний досвід // Техніко-економічні аспекти. – 2020. – №9. – С. 75–81.
43. Гончарук М.П., Ткаченко Ю.О., Таран М.В. Водневі енергетичні технології: наукові засади і практичні аспекти // Екологічна безпека. – 2022. – №7. – С. 44–50.
44. Матвєєв Д.В., Левченко П.І. Водневі технології та їх вплив на економіку України // Економіка та енергетика. – 2021. – №5. – С. 29–34.
45. Сіренко О.О., Гречко Л.В. Водневі технології в аграрній енергетиці: потенціал і перспективи // Аграрна наука. – 2023. – №6. – С. 14–20.
46. Бендик Є.В., Мандрик О.О. Водень як енергетичний ресурс: перспективи для України // Інженерія та енергетика. – 2022. – №8. – С. 32–40.
47. Петренко О.В., Ліфанова О.А. Водневі паливні елементи в сучасних енергетичних системах // Технічна інженерія. – 2023. – №2. – С. 41–49.
48. Кушнір М.В., Карпук І.О., Трохимчук В.М. Перспективи використання водню в енергетичних системах України // Вісник енергетичних технологій. – 2021. – №2. – С. 9–15.

49. Водневі технології та їх застосування в енергетичних системах / За ред. П.А. Степаненка. – К.: Наукова думка, 2022. – 215 с.
50. Ковальов С.М., Бойко І.Г., Сидоренко Т.А. Проблеми інтеграції водневої енергетики в сучасні енергетичні системи // Науковий вісник енергетичних технологій. – 2022. – №3. – С. 61–68.
51. Григоров В.О., Черніков О.М. Теоретичні основи водневого транспортування та зберігання енергії // Вісник науки та техніки. – 2021. – №6. – С. 72–80.