

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра механіки та інженерії  
агроекосистем

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

Сіренко Костянтин Борисович

УДК 620.92

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКТУ  
ВОДНЕВОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ТВАРИННИЦЬКОЇ ФЕРМИ

208 „Агроінженерія”

подається на здобуття освітнього ступеня магістра

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання  
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Керівник роботи

В.О. Шубенко

К.т.н., доцент

Житомир – 2022

## ЗМІСТ

Анотація .....	3
Вступ .....	4
РОЗДІЛ I. Проблеми та перспективи розвитку водневої енергетики в світі та Україні. Види видобутку водню .....	6
1.1. Водень як енергетичний ресурс .....	6
1.2. Аналіз методів видобутку водню .....	
РОЗДІЛ II Аналіз можливостей застосування водню в енергетичних системах .....	13
2.1 Відновлювальна енергетика як основне джерело енергії для електролізу .....	13
2.2. Перспективи і проблеми використання водню в енергетичних системах .....	14
2.3. Принцип дії паливної комірки.....	17
РОЗДІЛ III обґрунтування обладнання та схема для опалення тваринницької ферми .....	20
3.1. Аналіз роботи водневого котла опалення .....	20
3.2. Обґрунтування комплексу обладнання для опалювання ферми .....	22
Висновки .....	27
Список використаних джерел .....	28

## АНОТАЦІЯ

Сіренко К.Б. **Обґрунтування використання комплекту водневого обладнання для енергозабезпечення тваринницької ферми.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2022.

В роботі обґрунтовано використання альтернативного палива – водню для енергетичного забезпечення тваринницької ферми. Запропоновані рішення вписуються в майбутній напрям розвитку, що передбачає значне зменшення викидів парникових газів та перехід на відновлювальні джерела в енергетиці. Одним з перспективних напрямків є використання водню, як альтернативу викопному паливу.

## SUMMARY

Sirenko K.B. **Rationale for the use of a set of hydrogen equipment for energy supply of a livestock farm.** - Qualification work on the rights of the manuscript. Qualifying work for a master's degree in specialty 208 - agroengineering. - Polissya National University, Zhytomyr, 2022.

The paper substantiates the use of alternative fuel - hydrogen for energy supply of livestock farms. The proposed solutions fit into the future direction of development, which provides for a significant reduction in greenhouse gas emissions and the transition to renewable energy sources. One of the promising areas is the use of hydrogen as an alternative to fossil fuels.

## ВСТУП

Сучасні тенденції зміни клімату та курсу більшості країн на зменшення викидів парникових газів вимагають швидких темпів розвитку технологій альтернативної енергетики. Ціль даного розвитку – зменшення частки енергії в світі, яка видобута за рахунок спалення органічного палива – вугілля, нафти, газу. В розвинених країнах постійно зростає частка видобутої енергії за рахунок вітряків, сонячних панелей, використання котлів для альтернативного палива.

Одним з таких видів палива є водень. Роботи з воднем розпочались досить давно на автомобільному транспорті. Близько 30 років тому були створені зразки перших водневих автомобілів, водень уже давно використовується в якості палива для космічних ракет.

Сьогодні воднева енергетика лише зароджується в світі, причому – в найбільш розвинених країнах. Уряди активно інвестують у розробки технологічних моделей водневої енергетики. А світові експерти в галузі енергетики називають водень «паливом майбутнього».

*Актуальність роботи:* тенденції сучасного розвитку світової енергетики та промисловості передбачають значне зменшення кількості викидів парникових газів, зміни законодавства в цій галузі та введення податків та акцизів на спалювання органічного палива. Це призведе до дорожчання та дефіциту палива, збільшенню затрат та собівартості продукції. Тому побудова систем, які використовують нові види палива та відновлювану енергетику буде актуальною в розвитку всіх країн.

*Мета роботи:* показати можливість застосування водню в якості альтернативного палива для покриття потреб невеликого підприємства.

*Завдання досліджень:*

1. Обґрунтувати використання водню в якості палива для системи опалення ферми та проаналізувати переваги та недоліки такої системи.

2. Запропонувати комплект обладнання, який використовує водень в якості палива для побудови системи опалення тваринницької ферми.

*Предмет і об'єкт дослідження:* процеси видобутку, зберігання, транспортування та спалення водню, техніка і обладнання для побудови системи опалення, яка працює на водні в якості палива.

*Практичне значення отриманих результатів:* запропонована система енергозабезпечення невеликого сільськогосподарського підприємства дозволить знизити затрати на придбання та використання органічного палива. В умовах глобального світового зменшення кількості викидів парникових газів та дорожчання процесу використання органічного палива така система забезпечить енергонезалежність та можливість зменшення затрат на випуск продукції.

*Структура та обсяг роботи.* Робота виконана на 34 сторінках друкованого тексту, містить вступ, 3 розділи, висновки, список використаної літератури із 14 джерел.

## РОЗДІЛ І

### ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В СВІТІ ТА УКРАЇНІ. ВИДИ ВИДОБУТКУ ВОДНЮ

#### 1.1. Водень як енергетичний ресурс

На зустрічі світових лідерів в Глазго в жовтні 2021р було окреслено шляхи на розвиток енергетики та сільського господарства на найближчі 50 років. Головним трендом є значне зменшення викидів парникових газів, які впливають на зміни клімату. Основними галузями, які найбільше впливають на довкілля є світова енергетика, сільське господарство, автотранспорт та промисловість.

Тому зараз швидкими темпами розвиваються технології альтернативної енергетики. Ціль даного розвитку – зменшення частки енергії в світі, яка видобута за рахунок спалення органічного палива – вугілля, нафти, газу. В розвинених країнах постійно зростає частка видобутої енергії за рахунок вітряків, сонячних панелей, використання котлів для альтернативного палива.

Одним з таких видів палива є водень. Роботи з воднем розпочались досить давно на автомобільному транспорті. Близько 30 років тому були створені зразки перших водневих автомобілів, які в силу певних технологічних та економічних причин не отримали належного розвитку.

Сьогодні воднева енергетика лише зароджується в світі, причому – в найбільш розвинених країнах. Уряди активно інвестують у розробки технологічних моделей водневої енергетики. А світові експерти в галузі енергетики називають водень «паливом майбутнього» [3].

Водень – надзвичайно енергоємний ресурс. Він горить при такій же температурі, як і природний газ. Водночас, при згорянні речовини на одиницю маси виділяється майже в 3,5 разу більше тепла, ніж коли згоряють вуглеводні нафти чи вугілля. Водневе паливо – набагато більш ефективне, ніж дизельне, або авіаційне паливо. Цей ресурс можна транспортувати як трубопроводами (з тією ж

швидкістю, що й вуглеводні), так і за допомогою ємностей для стисненого, або зрідженого газу, – при наднизьких температурах.

У контексті декарбонізації промисловості, транспорту, комунального сектору й будівництва, воднева енергетика сьогодні стала одним із наріжних трендів в ЄС, США, Японії та в інших розвинених країнах світу. В Україні топчиновники також анонсували рух до цієї нової, перспективної технології. Але, в контексті водневої енергетики об'єктивно існують значні економічні, інфраструктурні, технологічні й інші ризики та перепони [5].

Потенційний ефект цієї технології важко переоцінити. Використання водню як альтернативного енергетичного носія й ресурсу не лише зменшить залежність економік від викопного палива (вугілля, газ, нафта), а й суттєво скоротить викиди парникових газів, які спричиняє стара «вуглеводнева» економіка.

Відтак, водневий тренд ідеально «лягає» в концепцію «Європейського зеленого курсу» ЄС (2019). Так, у липні минулого року Єврокомісія затвердила «Водневу стратегію для кліматично нейтральної Європи» ЄС, яка визначає план дій зі створення водневої енергетики. Це, зокрема, – розбудова сталого промислового ланцюга створення вартості, стимулювання попиту на «чистий» водень, законодавчі інструменти, створення профільної інфраструктури й логістики, транскордонна співпраця для створення глобального ринку водню і т.д. Тоді ж було створено «Європейський альянс з чистого водню», до якого входять публічні агенції, дослідницькі центри, фінансові інститути, провідні енергетичні й промислові компанії ЄС.

Пріоритетом для ЄС є саме «зелений» водень, для виробництва якого в ЄС до 2024 року планується використання електролізерних систем до 1 млн тонн водню на рік. Назагал, фокус в ЄС – це застосування енергетичного водню для добового і сезонного балансування електроенергосистеми, що ґрунтується на відновлюваних джерелах. З 2025 по 2030 рік планується довести потужність електролізерів до 40 ГВт, а річне виробництво водню – до 10 млн тон. Також передбачається, що до 2050 року за рахунок «зеленого» водню буде

забезпечуватися четверта частина в енергетичних ресурсах, а його щорічні продажі складуть 630 млрд євро [11].

Менше з тим, сьогодні можна говорити лише про пілотну стадію в контексті впровадження водневої енергетики в світі. Так, ще в 2018 р. потяги на водні розпочали регулярні перевезення в Німеччині. Зараз у цій країні розглядається можливість використання водневого палива для повітряного й водного транспорту. Необхідно зазначити, що в Німеччині вперше у світі затверджено водневу стратегію, що передбачає державне фінансування в 9 млрд євро на реалізацію низки пілотних проектів.

## 1.2. Аналіз методів видобутку водню

Водень є найлегшим елементом у Всесвіті та найпоширенішим, тому перспективно водневе паливо має багато переваг. Хоча водень рідко існує на Землі самостійно, його можна виробляти з використанням чистої енергії для розщеплення по суті невичерпних молекул води, виробляючи лише кисень як побічний продукт [15].

Проте сьогодні 96% водню виробляється безпосередньо з викопного палива – переважно природного газу, потім вугілля, а потім нафти. Для цього використовується процес, відомий як парове реформування, при якому виділяється вуглекислий газ [12].

У світі виробляють 70 мільйонів тонн водню щороку, в основному для використання у виробництві аміачних добрив і хімічних речовин, таких як метанол, а також для видалення домішок під час переробки нафти. Прихильники використання водню як чистого палива вважають, що незабаром він також може зіграти важливу роль у декарбонізації інших секторів, включаючи вантажівки, авіацію та важку промисловість [15].

Водень діє як хімічний енергоносіє, скоріше, як нафта або газ, який можна по трубопроводу або транспортувати туди, де це необхідно. Він зберігає в три



рази більше енергії на одиницю маси, ніж звичайний бензин, і коли він «згорає» на повітрі, вивільняючи накопичену енергію, він просто з'єднується з киснем, щоб знову утворити воду [10].

Різні види виробництва водню позначені кольором. «Сірий» водень отримують з викопного палива за допомогою парової реформації. Коштує приблизно 1 долар за кілограм. «Синій» водень також використовує викопне паливо, але захоплює та зберігає CO<sub>2</sub>. Синій коштує близько 2 доларів за кілограм за найдешевшим. Нарешті, є «зелений» водень, що виробляється електролізом води з використанням відновлюваної енергії. Здебільшого це коштує понад 4 долари за кілограм [15].

У водневих технологіях точаться живі дебати про те, які методи виробництва переможуть. Зелений – це підхід до зменшення викидів вуглецю, оскільки синій зазвичай в кращому випадку вловлює від 85 до 90 відсотків CO<sub>2</sub>. Хоча 10-15 відсотків втрачених викидів CO<sub>2</sub> може здатися не так багато, це може мати значні наслідки зміни клімату, якщо виробництво буде розширено. Прихильники блакитного водню стверджують, що він відіграє ключову роль, оскільки він набагато дешевший, ніж зелений водень [5].

За останні роки низка країн і блоків запустили водневі стратегії, зокрема план Європейського Союзу про зелений водень у липні 2020 року. Щоб знизити вартість блакитного та зеленого водню, щоб конкурувати з забрудненим сірим воднем, урядам знадобиться багато років підтримки та величезні інвестиції (150 мільярдів доларів за десятиліття, за даними Bloomberg New Energy Finance) [15].

Сьогодні потенційні нові можливості використання водню варіюються від заміни коксівного вугілля у виробництві сталі до виробництва електроенергії, що забезпечує гнучкість, щоб допомогти енергетичним мережам впоратися з періодами слабого вітру та недостатньої сонячної енергії. Деякі країни та компанії вважають, що це може навіть зіграти велику роль в опаленні будівель, хоча інші вважають, що способи електрифікації опалення, такі як теплові насоси, швидше за все, виграють. Аерокосмічна компанія Airbus вважає, що водень є більш перспективним для літаків з декарбонізації, ніж батареї, через енергію, яку

він може накопичувати за вагою. Модифікуючи свої існуючі двигуни внутрішнього згорання, вони кажуть, що можуть використовувати водень для палива своїх літаків [15].

Основною перепоною, з якою стикається будь-яка воднева енергетична революція, є зберігання та транспортування. Молекули водню настільки малі, що можуть витікати з контейнерів, а це означає, що трубопровідні мережі, які раніше використовувалися для метану, можливо, доведеться модернізувати, перш ніж вони стануть придатними для отримання водню [15].



Рис 1.1. Установа для електролізу [6]

Вартість найбільш екологічного, «зеленого» водню, залежить від цін на електричну енергію. За розрахунками Національного інституту стратегічних досліджень, «зелений» водень стає конкурентоздатним щодо неекологічного «синього» лише в діапазоні розцінок від 30 до 45 дол. за МВт [16].

При порівнянні ж конкурентоздатної ціни електроенергії для електролізерів з ціною «зеленого» кіловату в Україні – від 15 центів для сонячних станцій та від 11,5 центів для вітрових (без ПДВ і різних надбавок), то «зелений» водень буде в нашій країні збитковим у горизонті 2-3 десятиліть. Навіть у США, де енергія ВДЕ – чи не найдешевша у світі, очікують, що собівартість «зеленого» водню зрівняється з ціною на природний газ лише на межі 2030 року [15].

Якщо говорити про виробництво і енергетичне використання «зеленого» водню, то акцент робиться на позитивному екологічному ефекті, водночас, з економічної точки зору – цей сегмент наразі є аж надто вартісним, потребує значних фінансових вливань і виглядає наразі збитковим.

Для того, щоб водень і справді був екологічним енергоресурсом, його потрібно виготовляти методом електролізу із застосуванням відновлювальних джерел енергії. Проте, найголовніша в цьому контексті проблема – для побудови великих потужностей відновлювальної енергетики потрібні накопичувальні системи або високоманеврені електростанції для балансування енергосистеми, а надто – промислові електролізери великої потужності. А в Україні якраз із цією інфраструктурою – величезна проблема, «зелену» енергію банально ніде накопичувати і зберігати!

Відтак, для уникнення дисбалансів в енергосистемі в зв'язку з перевиробництвом електроенергії, держава змушена вимикати «дешеві» енергоблоки атомних станцій для «пріоритетності» дорогих ВДЕ. Хоч як парадоксально, але в Україні роль маневрених потужностей виконують вугільні ТЕС, які, за статистикою, є найбільшими забруднювачами навколишнього середовища. Отже, за нинішнього енергетичного статус-кво, продукування «зеленого» водню навряд чи є виправданим і реалістичним.

Водночас, для виробництва великої кількості «зеленого» водню за допомогою електролізу потрібні значні обсяги очищеної води. Однак, Україна є сьогодні однією з найменш забезпечених питною водою серед європейських країн, а глобальне потепління клімату спричиняє все більший дефіцит водних ресурсів. Це може стати чи не найбільш серйозною перепорою на заваді розвитку водневої енергетики в нашій країні.

Рожевий водень є різновидом зеленого водню. Особливістю є те, що він виробляється за допомогою електроенергії з атомних електростанцій за допомогою електролізу води. За експертними розрахунками, в су часних енергетичних умовах він є найбільш конкурентоспроможним.

Однак, низка еколого-захисних організацій вважає технологію добування «рожевого» водню вкрай ризикованою і навіть небезпечною для навколишнього середовища й здоров'я людей, оскільки всі її аспекти ще недостатньо вивчені навіть у розвинених країнах.

## РОЗДІЛ II

### АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ВОДНЮ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

#### 2.1 Відновлювальна енергетика як основне джерело енергії для електролізу

Якщо говорити про екологічний зелений водень, то він справді буде екологічно чистим, якщо на електроліз буде використовуватись енергія з відновлюваних джерел. Інакше потрібно бути спалювати органічне паливо, що зведе нанівець всю стратегію зменшення викидів парникових газів [14].

На малюнку рис 2.1. наведений графік розвитку відновлюваної енергетики в нашій країні за останні роки

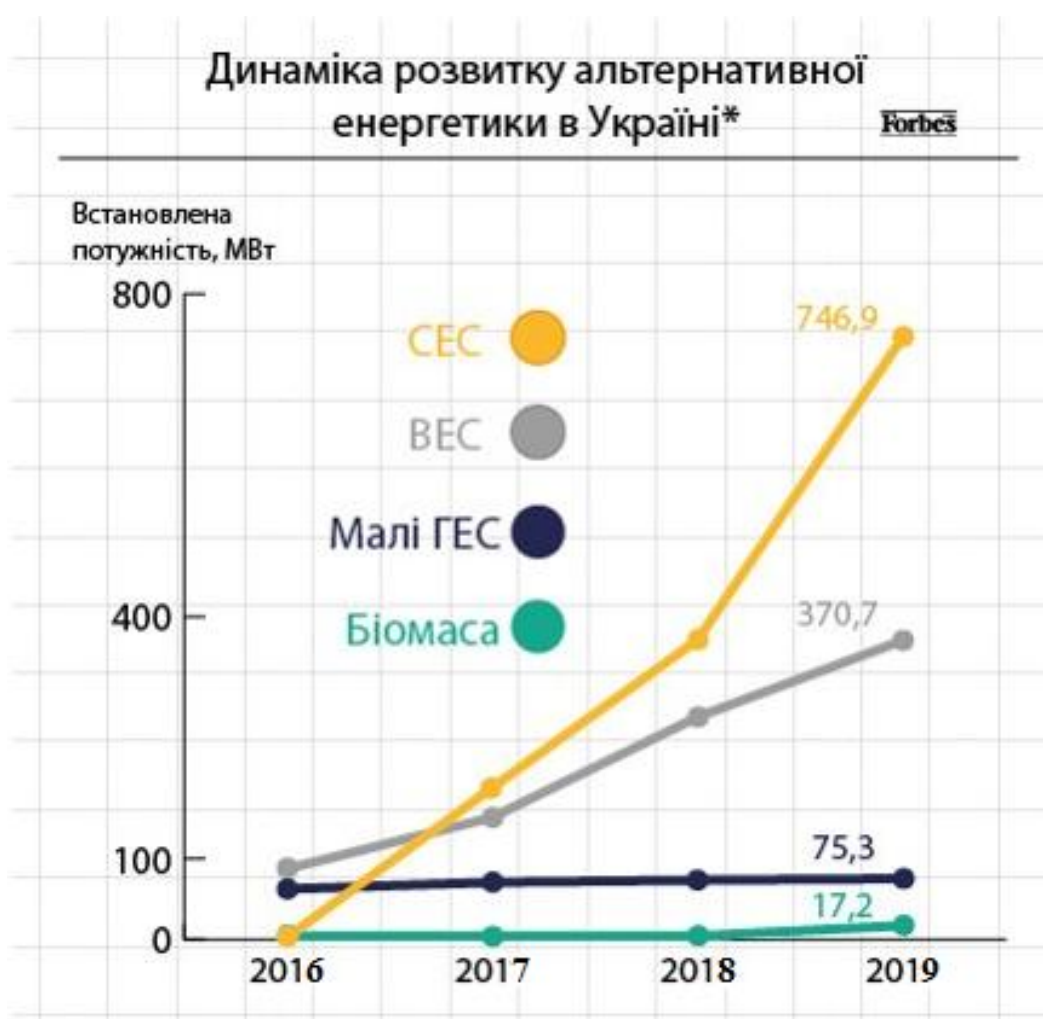


Рис 2.1. Розвиток відновлюваної енергетики в Україні [14]

Чи є електроліз води єдиним способом отримання зеленого водню? Ні! Є й інша техніка. Пірогазифікація складається з нагрівання органічної речовини (деревної біомаси, відпрацьованої деревини, рослинних решток тощо), а також різних форм вуглецевмісних відходів (тверде відновлене паливо, старі шини, пластик, який не підлягає вторинній переробці, висушений осад із очисні споруди тощо) до температур від 900°C до 1200°C у присутності невеликої кількості кисню. Цей процес витягує складний газ, що містить водень. Оскільки це рішення все ще з'являється, електроліз на даний момент залишається найпоширенішою технікою.

Коли для електролізу використовується виключно відновлювана енергія (гідравлічна, вітрова або сонячна), тоді водень є зеленим, також називається «відновлюваним». З іншого боку, низьковуглецевий водень отримують на основі природного газу для формування парів (який складається з «розбивання» молекули метану при 700°C за допомогою каталізаторів) із уловлюванням та зберіганням CO<sub>2</sub>, електроліз електрикою з мережі, якщо вона достатньо декарбонізована.

Основною перешкодою на шляху розвитку відновлюваного водню є вартість його виробництва [9].

## 2.2. Перспективи і проблеми використання водню в енергетичних системах

Однак, сьогодні слід враховувати те, що левову частку водню – як у світі, так і в Україні – поки що виготовляють з вугілля. Так, за даними МЕА, сьогодні 99% водню отримується з викопних видів палива, а його глобальне вироблення становить близько 70 млн тонн. Як наслідок, виробництво водню призводить до викидів близько 830 млн тонн вуглекислого газу на рік, що еквівалентно викидам Великої Британії та Індонезії, взятих разом. У той час, як синій водень вважається

деякими вітчизняними експертами, чиновниками й великим бізнесом чи не найперспективнішим напрямком водневої енергетики, його масове виробництво на великих промислових підприємствах неминуче призведе до ще більшого забруднення навколишнього середовища й непропорційних витрат викопних ресурсів [13]. Це, власне, зводить нанівець саму ідею екологічно-чистої водневої енергії.

Водень як чисте джерело енергії та носій швидко зайняв центральне місце в останні роки. За оцінками, він становить 75% всієї маси у Всесвіті і має найвищий вміст хімічної енергії за масою серед усіх газоподібних і рідких палив. Він є у великій кількості всюди на Землі, і існує ряд способів, за допомогою яких водень можна як виробляти, так і використовувати з низьким вмістом вуглецю, з невеликими шкідливими наслідками для навколишнього середовища, такими як забруднення або викиди потепління клімату [16]. Однак на Землі водень зустрічається в природі лише у вигляді сполуки, переважно у воді, але також у вуглеводнях, тому для використання його потрібно звільнити від зв'язків з іншими хімічними елементами, такими як кисень та вуглець. Для цього потрібна енергія, і як це зробити безпечно, економічно ефективним способом, який не збільшує викиди CO<sub>2</sub> та інших викидів, — це суть питання.

На даний момент найпоширенішим методом отримання водню є використання природного газу та техніка, яка називається паровим реформуванням метану. Це поєднує метан з газу з водою при дуже високих температурах (приблизно 900°C) для отримання суміші оксиду вуглецю, вуглекислого газу та водню. Контролюючи кількість повітря, води та метану в реакції, можна змінити кількість необхідної енергії та відпрацьованих газів. Водень, отриманий таким чином, має вуглецевий слід приблизно 10...12 кг CO<sub>2</sub> на кілограм водню, якщо для утилізації CO<sub>2</sub> не використовується уловлювання та зберігання вуглецю (CCS, рис. 2.2) [16].

Іншим методом отримання водню є використання електрики для поділу води на водень і кисень за допомогою електролізу, вода зазвичай нагрівається до температури від 20° до 100°C. Ця технологія здатна виробляти водень у різних

масштабах та застосувань, від невеликих заправних станцій для електромобілів до великих морських проектів електролізу. Очевидно, що найважливішим фактором з точки зору викидів  $\text{CO}_2$  в даному випадку є те, як виробляється електроенергія, яка використовується в процедурі; тільки якщо електроенергія має вуглецевий слід менше ніж  $250 \text{ кг CO}_2 \text{ e/MВт}\cdot\text{год}$  (приблизно половина інтенсивності викидів сучасної електростанції з комбінованим циклом, що працює на природному газі), водень від електролізу менш інтенсивний, ніж виробництво водню з природного газу. А для того, щоб водень, отриманий при електролізі, був дійсно низьковуглецевим, необхідно використовувати відновлювану або ядерну електрику [16].

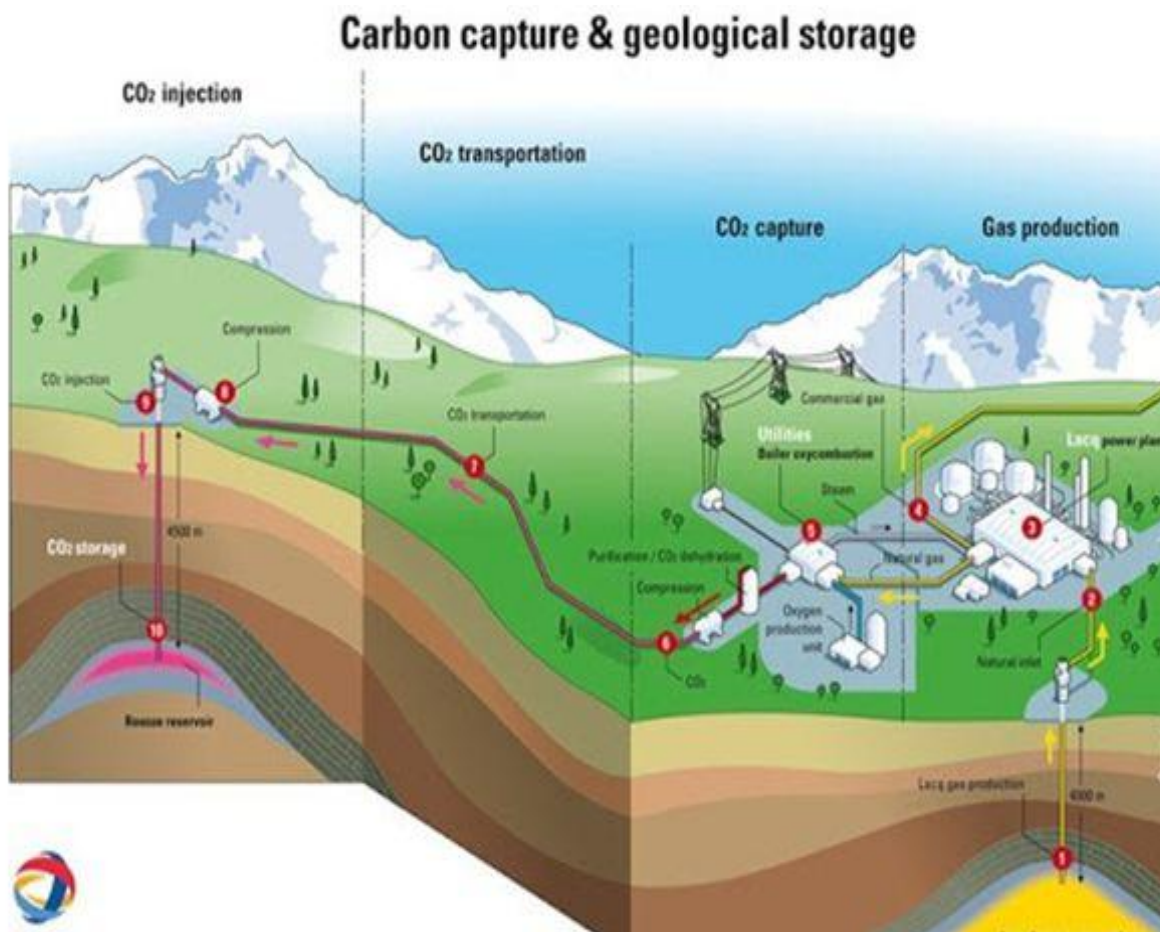


Рис 2.2. Технологія CCS для вуглекислого газу [14]

Таким чином навіть «екологічно чиста» електролізна технологія виробництва енергетичного водню пов'язана зі значними викидами вуглекислого



газу, що лише погіршуватиме екологічну ситуацію. Отже, розвиток водневої енергетики неможливий без впровадження ефективних технологій утилізації, чи переробки  $\text{CO}_2$ . Наразі за кордоном використовуються (поки що в обмежених масштабах) методи закачування вуглекислого газу «під землю» – зокрема, до свердловин, що залишилися від видобутку нафти й газу, соленосних й вугільних шарів, що втратили своє промислове значення [15].

Найоптимальнішим способом транспортування енергетичного водню є трубопроводи, при цьому його змішують з газом. Європейський досвід свідчить, що більшість тамтешніх мереж можуть нормально працювати при концентрації водню до 10-20%. Але через летючість і малу атомну масу водень вислизає через найменші щілини і при цьому є вибухонебезпечним. Як показали нечисленні статичні випробування, реалізовані одним із газових операторів, навіть при невисокій концентрації водню, типовими місцями витоків були різьбові та муфтові з'єднання, місця під'єднання датчиків тиску та регуляторів, а також зварні шви [12].

### 2.3. Принцип дії паливної комірки

Паливний елемент (комірка) – це пристрій, який виробляє електроенергію в результаті хімічної реакції. Кожен паливний елемент має два електроди, які називаються відповідно анодом і катодом (рис. 2.4). На електродах відбуваються реакції, які виробляють електрику. Кожен паливний елемент також має електроліт, який переносить електрично заряджені частинки від одного електрода до іншого, і каталізатор, який прискорює реакції на електродах. Водень є основним паливом, але паливні елементи також потребують кисню. Однією з чудових переваг паливних елементів є те, що вони виробляють електроенергію з дуже невеликим забрудненням – велика частина водню і кисню, які використовуються для виробництва електроенергії, в кінцевому підсумку об'єднуються, утворюючи нешкідливий побічний продукт, а саме воду.

Один паливний елемент генерує невелику кількість електроенергії постійного струму. На практиці багато паливних елементів зазвичай збираються в батарею. Метою паливного елемента є вироблення електричного струму, який можна направити за межі елемента для виконання роботи, наприклад, для живлення електродвигуна або освітлення міста. Через те, як поводить електрика, цей струм повертається в паливний елемент, завершуючи електричний ланцюг.

Існує кілька видів паливних елементів, і кожен з них працює по-різному. Але загалом атоми водню потрапляють у паливний елемент на аноді, де хімічна реакція позбавляє їх електронів. Атоми водню тепер «іонізовані» і несуть позитивний електричний заряд. Негативно заряджені електрони забезпечують струм через дроти для виконання роботи. Якщо потрібен змінний струм (АС), вихід постійного струму паливного елемента має бути спрямований через пристрій перетворення, який називається інвертором.

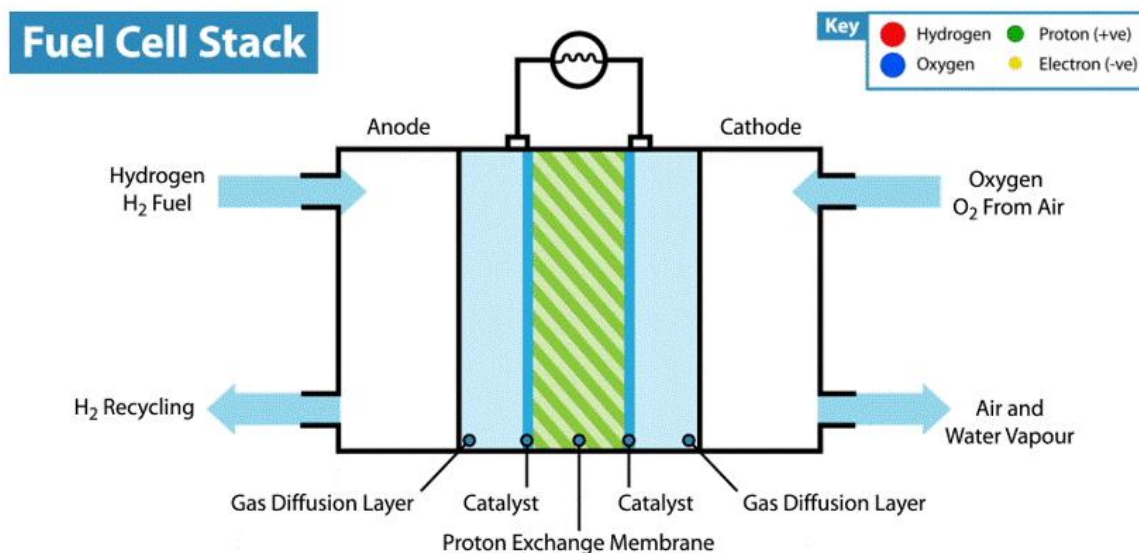


Рис 2.4. Принцип роботи паливної комірки [9]

Кисень надходить у паливний елемент на катоді і в деяких типах елементів він поєднується з електронами, що повертаються з електричного кола, та іонами водню, які пройшли через електроліт з анода. В інших типах клітин кисень

захоплює електрони, а потім проходить через електроліт до анода, де з'єднується з іонами водню.

Ключову роль відіграє електроліт. Він повинен дозволяти лише відповідним іонам проходити між анодом і катодом. Якби вільні електрони або інші речовини могли проходити крізь електроліт, вони порушили б хімічну реакцію. Незалежно від того, з'єднуються вони на аноді чи катоді, водень і кисень утворюють воду, яка витікає з клітини. Поки паливний елемент забезпечений воднем і киснем, він вироблятиме електроенергію. Оскільки паливні елементи виробляють електрику хімічним шляхом, а не шляхом згорання, вони не підпорядковуються термодинамічним законам, які обмежують звичайну електростанцію. Тому паливні елементи більш ефективно витягують енергію з палива. Відпрацьоване тепло від деяких елементів також можна використовувати, що ще більше підвищить ефективність системи.

Але створення недорогих, ефективних, надійних паливних елементів – справа набагато складніша. Вчені та винахідники розробили багато різних типів і розмірів паливних елементів у пошуках більшої ефективності, і технічні деталі кожного виду відрізняються. Багато варіантів, які стоять перед розробниками паливних елементів, обмежені вибором електроліту. Конструкція електродів, наприклад, і матеріали, які використовуються для їх виготовлення, залежать від електроліту. Сьогодні основними типами електролітів є луг, розплавлений карбонат, фосфорна кислота, протонообмінна мембрана і твердий оксид. Перші три – рідкі електроліти; останні два є твердими тілами.

Тип палива також залежить від електроліту. Деякі клітини потребують чистого водню, і тому вимагають додаткового обладнання, такого як «реформатор» для очищення палива. Інші клітини можуть переносити деякі домішки, але для ефективної роботи можуть знадобитися вищі температури. У деяких клітинах циркулюють рідкі електроліти, для чого потрібні насоси. Тип електроліту також диктує робочу температуру елемента – «розплавлені» карбонатні елементи нагріваються, як і впливає з назви. Кожен тип паливних елементів має переваги та недоліки порівняно з іншими, і жоден ще не є

достатньо дешевим та ефективним, щоб широко замінити традиційні способи виробництва енергії, такі як вугільні, гідроелектростанції чи навіть атомні електростанції.

### РОЗДІЛ III

## ОБГРУНТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СХЕМА ДЛЯ ОПАЛЕННЯ ТВАРИННИЦЬКОЇ ФЕРМИ

### 3.1. Аналіз роботи водневого котла опалення

Опалювальні котли на водні почали застосовуватись всього кілька років тому. Компанія з Нідерландів BDR Thermea Group першою у світі почала виробляти побутові котли для опалення будинку, що працюють виключно на водні. У порівнянні із звичайними газовими котлами вони мають певні відмінності в системі керування та налаштування тиску, а також деякі конструктивні особливості пальника, але зрештою мало відрізняються від звичайних газових котлів (Рис3.1).



Рис 3.1. Водневий котел опалення

Котел спалює чистий водень, який на 100% було отримано від енергії сонця чи вітру. Для розподілу та транспортування водневого палива можна користуватися існуючими газопроводами чи будинковою газовою мережею. Понад 400 котлів від BDR Thermea були призначені у Великобританії для випробувального проєкту водневого опалення невеликого містечка. Цей пілотний проєкт довів, що чинну інфраструктуру для викопного палива (наприклад, газопроводи) можна перепрофілювати для майбутнього водневого опалення. Він також показав, що нейтральні до викидів вуглецю ВДЕ, такі як вітер та сонячна енергія, можуть ефективно та гнучко використовуватися для вилучення молекул водню з води, які й будуть використовуватися як паливо [17].

Водневі котли, які зараз розробляються Worcester Bosch, Viessmann і BAXI, можуть використовувати як природний газ, так і водень як джерело палива. Водневі котли виглядають майже так само, як і сучасні газові котли, а також встановлюються майже так само. Як і газові котли, вони будуть підключені до газової магістралі і звідти до них подається водень або природний газ [17].

Внутрішні компоненти також будуть дуже схожі на сучасні газові котли. Незначні відмінності включають різні компоненти, такі як пристосований до водню детектор полум'я та пальник.

Вважається, що коли та якщо газова мережа перейде на використання водню, інженери з безпеки газу отримають нову підготовку, яка конкретно охоплюватиме водневий газ та встановлення водневих котлів.

1) водень може транспортуватися існуючою газовою або окремо збудованою системою трубопроводів;

2) водень також можна купувати і зберігати в балонах або інших ємностях;

3) водень можна виробляти за допомогою електролізу – водневого генератора (рис. 3.2).



Рис 3.2. Електролізер для виділення водню

Останній спосіб має сенс, коли використовується надлишкова енергія з відновлюваних джерел (вітрогенератори, сонячні панелі). При наявності такої енергії відкриваються додаткові можливості. Завжди є проблема накопичення та зберігання надлишкової енергії відновлюваних джерел. Електричні ємності дорогі та мають певні обмеження. Окрім того зберігання хімічного водню має найбільший енергетичний потенціал [16, 17].

### 3.2. Обґрунтування комплексу обладнання для опалювання ферми

Найбільш ефективним застосуванням опалення за допомогою водню є комплексне використання альтернативних джерел (рис. 3.3). Перш за все мається на увазі, що постачання ферми електричною енергією відбувається за допомогою альтернативних джерел. Це може бути як вітрова станція, так і сонячні панелі. Наявність альтернативної енергії дозволяє проводити видобуток водню за допомогою водневого генератора та накопичувати його в спеціальних ємностях.



Така технологія дозволяє не тільки запасатись воднем як паливом, але і накопичувати та зберігати надлишкову електричну енергію. Адже для зберігання електричної енергії на пряму використовують спеціальні літій –іонні акумулятори, які є дорогими та не ресурсними.



Рис. 3.3. Водень та відновлювальні джерела [15]

Таким чином, для оптимального використання водню в якості палива на фермі (або в будь якому іншому господарстві, в тому числі і приватній садибі), повинні бути джерела енергії, такі як вітрова електростанція і сонячні панелі. Для накопичення енергії використовують акумулятори (Рис 3.4), які досить дорогі в експлуатації. Збільшення ємності накопичення призводить до різкого зростання втрат.

Управляє енергетичною системою господарства контролер. В його функції входить керування і перемикання енергетичних потоків. Частина енергії направляється на безпосереднє забезпечення роботи господарства, інша накопичується в акумуляторі. Надлишок енергії за допомогою контролера живить водний генератор, або електролізер. Генератор за допомогою спеціальних



запірних пристроїв накопичує водень у резервуарі, або безпосередньо живить котел опалення, коли той працює.



Рис. 3.4. Енергетичне обладнання для забезпечення роботи ферми [12]

Як альтернативу водню котел може використовувати природний газ. Алгоритм роботи водневого опалення наведений на рис. 3.5.

Взагалі ми розглянули в якості джерела водню електролізер. Але його використання доцільно лише при наявності дешевої альтернативної енергії. Існують і інші ресурси для отримання водню. На ферму можна закуповувати водень та зберігати його.

Для пікових та екстремальних навантажень для опалення, окрім водня можна застосовувати інші види палива. Якщо є можливість застосування

природного газу, то не потрібно навіть встановлювати інший котел. При такій схемі опалення при нестачі водню або електроенергії, в пікові навантаження, особливо зимою при морозах доцільно використовувати газ. Можливості альтернативи завжди підвищують безпеку системи та знижують загальну ціну за витрачене паливо.

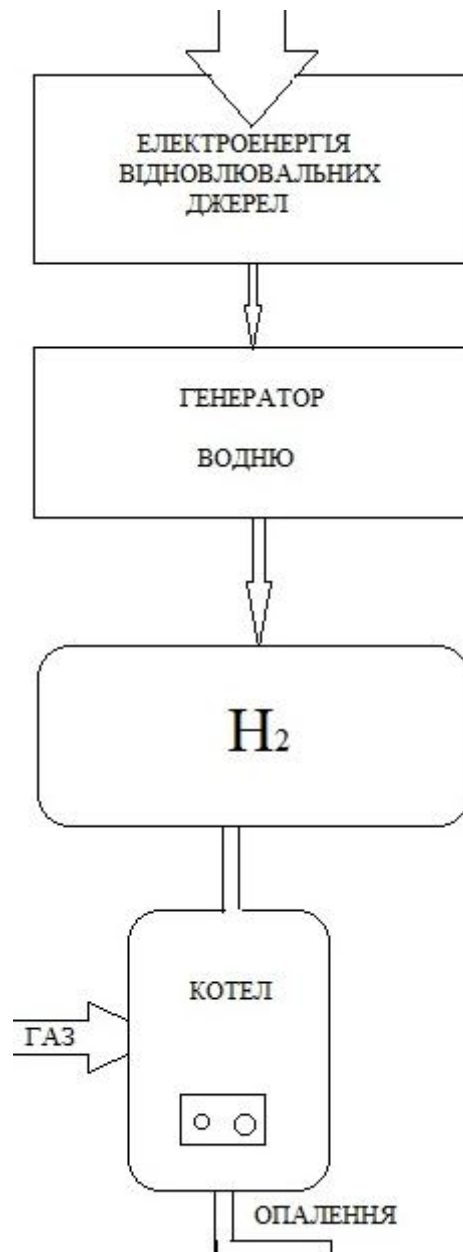


Рис. 3.5. Алгоритм водневого опалення

Представлена система енергетичного забезпечення ферми є максимально повною. Для побудови такої система потрібні великі затрати. Але в залежності від умов можливо будувати спрощені системи, наприклад з одним альтернативним

джерелом енергії, з котлом з вбудованим електролізером, який фактично спалює вироблений водень напряду.

В будь-якому випадку сучасні тенденції розвитку світової економіки, підтвержені на останньому саміті країн в Глазго, вказують на зменшення споживання органічного палива та зменшення викидів парникових газів. Буде змінено законодавство, в тому числі і в сільськогосподарській галузі, що призведе до здороження традиційних видів палива, податків на викиди та ін. Тому застосування альтернативних видів палива в майбутньому стане обов'язковим.

## ВИСНОВКИ

Світові тенденції розвитку розвинених країн передбачають поступову відмову від використання органічного палива – вугілля, нафти і газу. Можливі обмеження, податки, акцизи, дорожчання ціни на паливо ведуть до нестабільної роботи підприємств, збільшення собівартості продукції, можливих енергетичних і інших криз. Тому постійно збільшується частка енергії, яка виробляється з відновлюваних альтернативних джерел.

В таких умовах розробляються енергетичні системи, які використовують альтернативне паливо. Водень є найбільш прийнятним для використання в різних системах – автомобілях, паливних котлах та ін. В залежності від способу видобутку розрізняють зелений і синій водень. З екологічної точки зору для зменшення кількості викидів парникових газів раціонально використовувати зелений водень, який видобувають з води методом електролізу.

Використання процесу електролізу раціонально лише за умови використання електричної енергії з відновлюваних джерел, таких як вітрові і сонячні електростанції. Одночасно з цим ми якщо на видобуток водню ідуть надлишки енергії, що використовується в господарстві, то накопичення такого водню є своєрідною акумуляцією енергії, більш вигідною ніж накопичування її в електричні накопичувачі або продаж в мережу по зеленому тарифу.

Водневий котел опалення, який буде забезпечувати теплом ферму, може паралельно працювати на природному газі. Тому ми отримуємо ще одне неорганічне джерело енергії. Така система більш дешева в експлуатації, особливо при постійно зростаючих цінах на органічне паливо, не залижить критично тільки від одного типу палива і вписується в світовий тренд розвитку енергетики та промисловості.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gas Decarbonisation Methods 2020–2050. Gas for Climate. Retrieved: <https://fuelcellsworks.com/news/gas-for-climate-study-describes-gas-decarbonisation-pathways-from-2020-to-2050-identifies-required-investments-to-scale-up-hydrogen-and-biomethane/>.
2. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Підручник. Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2012. 495 с.
3. Репкін О.О. Плани ЄС щодо розвитку водневої галузі до 2030 року та перспективи України у цій екосистемі.
4. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії України. НАН України, Інститут відновлюваної енергетики, Держ. ком. України з енергозбереження. Київ: 2005. 45 с.
5. Стратегія інтеграції енергетичних систем.
6. Thermophilic hydrogen production from sugarcane bagasse pretreated by steam explosion and alkaline delignification / R. Ratti, T. Delforno, I. Sakamoto, M. Amâncio Varesche // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2015. 40, № 19. P. 6296-6306.
7. Mortensen, A. W., Mathiesen, B. V., Hansen, A. B., Pedersen, S. L., Grandal, R. D., Wenzel, H. (2020). The role of electrification and hydrogen in breaking the biomass bottleneck of the renewable energy system – A study on the Danish energy system. *Applied Energy*, 275, 1-14.8. National Hydrogen Roadmap. CSIRO, Australia, 2018. (18-00314\_EN\_NationalHydrogenRoadmap\_WEB\_180823.pdf).
8. Baeyens, J., Zhang, H., Nie, J., Appels, L., Dewil, R., Ansart, R., Deng, Y. (2020). Reviewing the potential of bio-hydrogen production by fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 1-16.
9. Кудря С.О. Системи акумулювання і перетворення енергії відновлюваних джерел // Докт. дис., Київ, 1996. – 548 с.
10. Guo L, Li XM, Bo X, Yang Q, Zeng GM, Liao D xiang, et al. Impacts of sterilization, microwave and ultrasonication pretreatment on hydrogen producing using waste sludge. *Bioresour Technol* 2008;99:3651–8.

11. [https://pidruchniki.com/1274082337977/ekologiya/vodneva\\_energetika](https://pidruchniki.com/1274082337977/ekologiya/vodneva_energetika).
12. Відновлювана енергетика в аграрному виробництві / Скидан О.В., Голуб Г.А., Кухарець С.М., Ярош Я.Д., Чуба В.В., Медведський О.В., Цивенкова Н.М., Соколовський О.Ф., Кухарець В.В.; за ред. О.В. Скидна і Г.А. Голуба. – Київ-Житомир: НУБіП України-ЖНАЕУ, 2018. – 320 с.
13. Виробництво і використання біопалив в агроєкосистемах. Механіко-технологічні основи: монографія / Голуб Г. А., Кухарець С.М., Чуба В. В. Марус О.А.; за ред. Г. А. Голуба. – К.: НУБіП України, 2018. – 254 с.
14. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії України. НАН України, Інститут відновлюваної енергетики, Держ. ком. України з енергозбереження. Київ: 2005. 45 с.
15. <https://www.newscientist.com/definition/hydrogen-fuel/>
16. <https://www.geoexpro.com/articles/2020/11/hydrogen-and-ccs-in-future-energy>
17. <https://heatable.co.uk/boiler-advice/hydrogen-boilers>