

ШЛЯХИ УСУНЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ВОДНЕВА ЕНЕРГЕТИКА

ЕЛЕКТРОННІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І. І. МЕЧНИКОВА
ФАКУЛЬТЕТ ХІМІЇ ТА ФАРМАЦІЇ
КАФЕДРА АНАЛІТИЧНОЇ ТА ТОКСИКОЛОГІЧНОЇ ХІМІЇ

ШЛЯХИ УСУНЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ВОДНЕВА ЕНЕРГЕТИКА

ЕЛЕКТРОННІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
спеціальності ЕЗ Хімія, ОНП Хімія

Одеса
ОНУ імені І. І. Мечникова
2026

УДК 504:03
Ш708

Укладачі:

Р. Є. Хома, доктор хімічних наук, професор, професор кафедри аналітичної та токсикологічної хімії;

Т. С. Беньковська, аспірант кафедри аналітичної та токсикологічної хімії.

Рецензенти:

Т. В. Кокишарова, доктор хімічних наук, професор, професор кафедри неорганічної хімії та хімічної освіти Одеського національного університету імені І. І. Мечникова;

Н. Ф. Федько, кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри органічної та фармацевтичної хімії Одеського національного університету імені І. І. Мечникова.

*Рекомендовано вченою радою факультету хімії та фармації
ОНУ імені І. І. Мечникова.
Протокол № 1 від 10 вересня 2025 р.*

Шляхи усунення вуглецевого сліду. Воднева енергетика
Ш708 [Електронний ресурс] : електрон. метод. вказівки для здобувачів третього (освіт.-наук.) рівня вищ. освіти спец. ЕЗ Хімія, ОНП Хімія / уклад.: Р. Є. Хома, Т. С. Беньковська. Одеса : ОНУ імені І. І. Мечникова, 2026. 38 с. 1,1 МБ.

Методичні вказівки складено відповідно до програми спецкурсу «Хімічна наука: вплив новітніх задач та тенденцій». Вони містять інформацію про фізико-хімічні шляхи усунення вуглецевого сліду, промислові способи отримання водню як вторинного джерела енергії, переваги та недоліки водневої енергетики. питання для самоконтролю та тестові завдання, призначені здобувачам факультету хімії та фармації ОНУ імені І. І. Мечникова.

Можуть бути рекомендовані для здобувачів природничих факультетів при самостійній підготовці до занять з таких дисциплін «Наукові засади критичного аналізу екологічних даних», «Методи збору, обробки та аналізу екологічних даних», «Аналітична хімія навколишнього середовища з основами броматології» та «Екотоксикологія» тощо.

УДК 504:03

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ СПОСОБИ ВИЛУЧЕННЯ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ІЗ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ	5
1.1. Технологічні способи	5
1.1.1. <i>Фізична абсорбція</i>	5
1.1.2. <i>Хемосорбційні методи</i>	7
1.1.3. <i>Адсорбція</i>	9
1.1.4. <i>Каталітичне гідрування</i>	11
1.1.5. <i>Мембранне вилучення</i>	12
1.1.6. <i>Ферментативне вилучення</i>	14
1.1.7. <i>Електрохімічне вилучення</i>	15
1.2. Перспективи використання CO₂	17
1.2.1. <i>Зберігання діоксиду вуглецю</i>	17
1.2.2. <i>Застосування вуглекислого газу</i>	17
2. РОЛЬ ВОДНЮ В ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ	20
2.1. Економіка водню: сучасний стан	21
2.2. Палітра водню	21
2.3. Водневі стратегії Брігіш Петролеум, Роял Датч Шелл та Тоталь	25
2.4. Стратегії EoN, EDF та RWE	28
2.5. Сектори споживання водню у світі	30
<i>Перелік питань для самоконтролю</i>	33
<i>Перелік тестових завдань</i>	34
<i>Рекомендована література</i>	36

ВСТУП

Зміна клімату, зумовлена викидами парникових газів, стає глобальною проблемою. Концентрація вуглекислого газу в атмосфері Землі у 2024–2025 рр. подолати рекордну позначку 420 ppm (parts per million – кількість частинок CO₂ на мільйон частинок повітря). Причому до кінця століття очікується збільшення концентрації CO₂ приблизно в 2 рази. Незважаючи на цілеспрямоване зростання сонячної та вітрової енергетики, конкурентоспроможної альтернативи спалюванню вуглеводневих палив досі не існує. Це призводить до катастрофічних наслідків, таких як екстремальні погодні явища, підвищення рівня моря та деградація екосистем. У зв'язку з цим технології уловлювання та поховання вуглецю у вигляді CO₂ (CCS – carbon capture and storage technology) визнані критично важливими для стримування зростання середньої температури на планеті в межах 1,5 –2,0 °С до 2050 р. Застосування цих технологій дозволить обмежити обсяг викидів CO₂ «брудними» підприємствами. Використовуваний метод амінової очистки, через її дорожнечу, не знайшов широкого застосування у промисловості. Однак нові технологічні рішення (наприклад, застосування ферментів, мембран та хемосорбентів) сприятимуть здешевленню даного методу та його широкому впровадженню. Таким чином, дана проблема є актуальною з ресурсозберігаючої, екологічної та економічної точок зору.

1. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ СПОСОБИ ВИЛУЧЕННЯ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ІЗ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ

1.1. Технологічні способи

Методи очищення газів від діоксиду вуглецю поділяють на такі групи:

- фізична абсорбція – заснована на розчинності діоксиду вуглецю в полярних розчинниках (вода, метанол);
- хемосорбція – заснована на хімічній взаємодії діоксиду вуглецю зі сполуками лужного характеру (луг, етаноламін, розчини карбонатів, оксид кальцію);
- адсорбція – заснована на поглинанні діоксиду вуглецю твердими сорбентами (цеолітами);
- каталітичне гідрування;
- застосування мембран;
- застосування ферментів;
- електрохімічне вилучення CO₂

1.1.1. Фізична абсорбція

Абсорбція водою

Абсорбція діоксиду вуглецю водою має промислове значення для очищення деяких газів високого тиску (наприклад, при синтезі аміаку). Основними перевагами води як абсорбенту для видалення домішок із газу є її доступність та дешевизна. Застосування будь-якого іншого абсорбенту пов'язане з необхідністю створення герметичної системи та рекуперації, так як у процесі очищення абсорбент випаровується, і газ, що відходить, забруднюють атмосферу. Воду можна застосовувати з меншою небезпекою витоку газу та здебільшого без рециркуляції зі скиданням насиченого розчину. Для збільшення розчинності вуглекислого газу у воді процес проводять за підвищеного тиску (1,5–2,5 МПа).

Схему встановлення очищення газу від діоксиду вуглецю абсорбцією водою зображено на рис. 1.1.

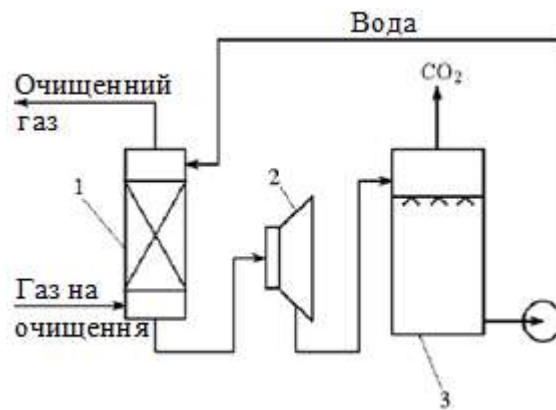


Рис. 1.1. Схема встановлення очищення газу від діоксиду вуглецю абсорбцією водою
1 – абсорбер; 2 – рекуперативна турбіна; 3 – десорбер

Газ, що очищається, надходить в абсорбер, де промивається водою при температурі 30–40 °С. Заповнений абсорбент направляється в десорбер, проходячи через рекуперативну турбіну, що дозволяє використовувати частину енергії шляхом зниження тиску рідини та подальшого розширення абсорбованого газу. У десорбері з допомогою зниженого тиску із води виділяється діоксид вуглецю. Регенований абсорбент насосом прокачується назад в абсорбер.

Перевагою процесу водної абсорбції є простота конструкції установки. Недоліки: невисока поглинальна здатність діоксиду вуглецю водою (8 кг CO₂ на 100 кг абсорбенту); недостатня чистота вуглекислого газу, що виділяється – 85 % (решта 15 % – сірководень, монооксид вуглецю, азот та інші гази).

Абсорбція метанолом

Метанол є добрим поглиначем вуглекислого газу. Низька температура та збільшення тиску в системі сприяють різкому підвищенню поглинальної здатності метанолу. На цій властивості заснований процес «Ректізол». При температурі –60 °С та атмосферному тиску розчинність становить 75 см³/г, зі збільшенням тиску до 0,4 МПа вона сягає 600 см³/г. Розчинення протікає зі значним екзотермічним ефектом. У результаті очищення газу, отриманого конверсією оксиду вуглецю (71,5 % H₂; 0,8 N₂, 0,9 % CH₄; 2,4 % CO; 24,4 % CO₂), утворюється газ складу: 92,8 % H₂; 1,1 % CH₄; 3,1 % CO; 2,0% CO₂.

Абсорбція включає:

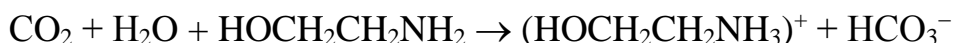
- охолодження газу до –35 °С при прямому контакті з холодоагентом (60 % водним розчином метанолу);
- власне абсорбція в колоні при температурі –35 ÷ –60 °С та тиску 2 МПа;
- десорбція шляхом послідовного зниження тиску до 800, 130, 60 та 25 кПа.

Повна регенерація метанолу досягається кип'ятінням. Перевага процесу – розчинність CO₂ у метанолі значно вища, ніж у воді. Недолік – громіздкість обладнання.

Крім метанолу можна використовувати й інші органічні розчинники: N-метилпіролідон, сульфолан, пропіленкарбонат, ціна яких значно вища. На даний момент широкого поширення вони не набули.

1.1.2. Хемосорбційні методи

При підготовці різних технологічних газів до переробки використовують хемосорбцію діоксиду вуглецю етаноламінами. Максимальну абсорбційну здатність по відношенню до діоксиду вуглецю має моноетаноламін (МЕА).



У процесі хемосорбції вуглекислого газу зазвичай використовують 15–20 % розчини моноетаноламіну. Хемосорбція протікає за температури 40–45 °С та тиску 1,5–3,0 МПа. Утворені карбонати і бікарбонати розкладаються в десорбері з виділенням діоксиду вуглецю при нагріванні потоку до 120 °С.

Схема установки моноетаноламінової очистки газу наведена на рис. 1.2. Сирий газ подається вниз абсорбера 2, а поглинач кислих газів – вгору. Виходячи з верху абсорбера, очищений газ надходить у сепаратор 1 відділення віднесених крапель розчину МЕА. Насичений розчин поглинача надходить у ємність 3 для відділення від розчинених вуглеводневих газів, потім проходить через теплообмінник 6 і направляє у відпарну колону 7. Кислі гази, пари води і МЕА зверху відпарної колони 7 після охолодження і конденсації збираються в конденсаторі від конденсату, який відкачується насосом 11 зрошення колони. Регенований розчин з низу колони проходить через теплообмінник 6, холодильник 5 і надходить у ємність 4, звідки направляє на зрошення абсорберу 2.

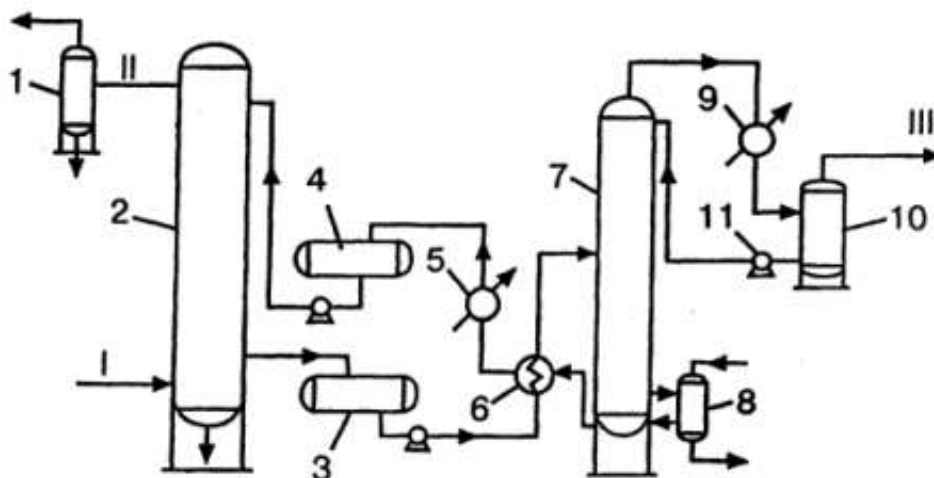


Рис. 1.2. Схема установки очищення газів від CO_2 розчином моноетаноламіну:

I – сирий газ; II – очищений газ; III – діоксид вуглецю; 1–10 – сепаратори; 2 – абсорбер; 3, 4 – ємності; 5 – холодильник; 6 – теплообмінник; 7 – відпарна колона; 8 – кип’ятильник; 9 – конденсатор-холодильник; 11 – насос

Недоліки: значна витрата тепла на регенерацію сорбенту, що зростає із збільшенням концентрації діоксиду вуглецю в очищеному газі; втрати летючого абсорбенту; утворення значних кількостей смолистих речовин через циклізацію моноетаноламіну у похідні оксазолідону-2 і далі на продукти їх перетворення.

Очищення розчинами карбонатів

Даний метод заснований на взаємодії діоксиду вуглецю з водними розчинами карбонатів натрію та калію (зазвичай поташу) з активуючими добавками оксидів полівалентних металів. Для підвищення розчинності діоксиду вуглецю в хемосорбенті та швидкості процесу поглинання використовують гарячі розчини карбонатів (110-120 °С). На практиці застосовують 25 %-вий водний розчин поташу, активований миш'яком. Тиск на стадії абсорбції 1,0–2,0 МПа.

Принципова технологічна схема регенерації насиченого розчину поташу зображена на рис. 1.3.

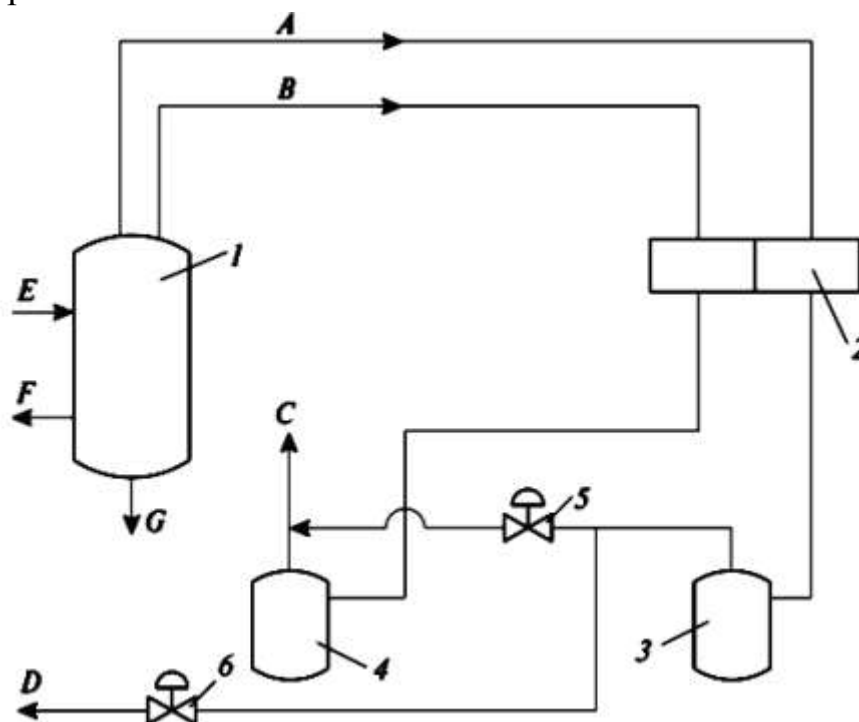


Рис. 1.3. Принципова технологічна схема регенерації насиченого розчину поташу:
 1 – регенератор (десорбер); 2 – повітряний холодильник; 3, 4 – сепаратори; 5, 6 – засувки;
 А – «чистий» CO₂; В – «брудний» CO₂; С – «брудний» CO₂ на переробку; D – «чистий» CO₂
 до споживача; E – вхід насиченого діоксидом вуглецю розчину;
 F, G – виходи «бідного» та «напівбідного» розчинів

Гази десорбції виводяться з регенератора двома потоками у вигляді «чистої» та «брудної» фракцій. «Чиста» фракція, що становить близько 85 % загальної кількості CO₂, відбирається нижче точки введення насиченого

розчину в регенератор з температурою не більше 100 °С і з надлишковим тиском вище 0,039 МПа. Вона охолоджується у повітряному холодильнику 2 до температури нижче 57 °С і після відділення вологи в сепараторі 3 надходить через електрозасувку 6 до споживача. Вміст горючих компонентів у «чистому» потоці вбирається у 0,2 об. %. Після проходження сепаратора 4 «брудна» фракція вирушає на отримання рідкого діоксиду вуглецю.

Ступінь очищення газу від діоксиду вуглецю розчином поташу трохи нижче, ніж при очищенні розчином МЕА. Залишковий вміст діоксиду вуглецю в суміші, що очищається, після використання поташу – 0,05–0,1 % мас. Однак порівняно з МЕА поташ є більш дешевим хемосорбентом 5.

Добре відпрацьований у промисловості спосіб очищення технологічного газу від CO₂ використовують у агрегатах синтезу аміаку великої потужності. Схема очищення (процес «Карсол») відрізняється добрими техніко-економічними показниками (низька витрата тепла, малі витрати на теплообмінні поверхні). Використовується поглинач складу 25–28 % K₂CO₃ – абсорбент, 1,9 % діетаноламін – активатор, 0,4 % V₂O₅ – інгібітор корозії, температура процесу 100–103 °С, тиск 1,9–2,7 МПа.

Виділення CO₂ з димових газів у кальцієво-карбонатному циклі

Проривний характер носить технологія кальцієво-карбонатного циклу (ККЦ), яка використовує як хемосорбент оксид кальцію, що отримується з вапняків та доломітів. Технічна реалізація даної технології полягає в переміщенні сорбенту СаО між двома реакторами з киплячим шаром, в одному з яких при зниженій температурі відбувається поглинання CO₂, а в іншому при вищій температурі – розкладання карбонату кальцію. Застосування цієї технології орієнтоване насамперед на вугільні електростанції з високими викидами CO₂ на одиницю виробленої потужності.

Переваги ККЦ для вилучення CO₂ із димових газів: відносна дешевизна методу; значне скорочення кількості необхідного для реакції кисню; прискорення процесу поглинання вуглекислого газу завдяки високій температурі проведення реакції. У 2008 р. процес ККЦ був об'єднаний із паровою конверсією вугілля.

1.1.3. Адсорбція

Адсорбція цеолітами

Цеоліти є ефективними адсорбентами діоксиду вуглецю. Діаметр молекул вуглекислого газу становить близько 0.31 нм (3.1 Å), що дозволяє їм проникати у внутрішню структуру більшості цеолітів. Найпоширеніший цеоліт, що

застосовується в адсорбції – алюмосилікатний цеоліт СаА. Цеоліт поставляється у гранулах розміром від 3 до 5 мм та від 1.6 до 2.5 мм (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Синтетичний цеоліт СаА – поглинач CO_2 , алюмосилікат з високим ступенем стійкості до слабких кислотних середовищ

Розміри пор цього виду цеоліту 5 Å. Разом з діоксидом вуглецю цеоліти поглинають пари води. Тому одночасно з очищенням газів від діоксиду вуглецю відбувається їхнє осушення. Десорбцію поглинених компонентів здійснюють зниженням тиску та підвищенням температури. Схема адсорбційної очистки газу від діоксиду вуглецю цеолітом представлена на рис. 1.5.

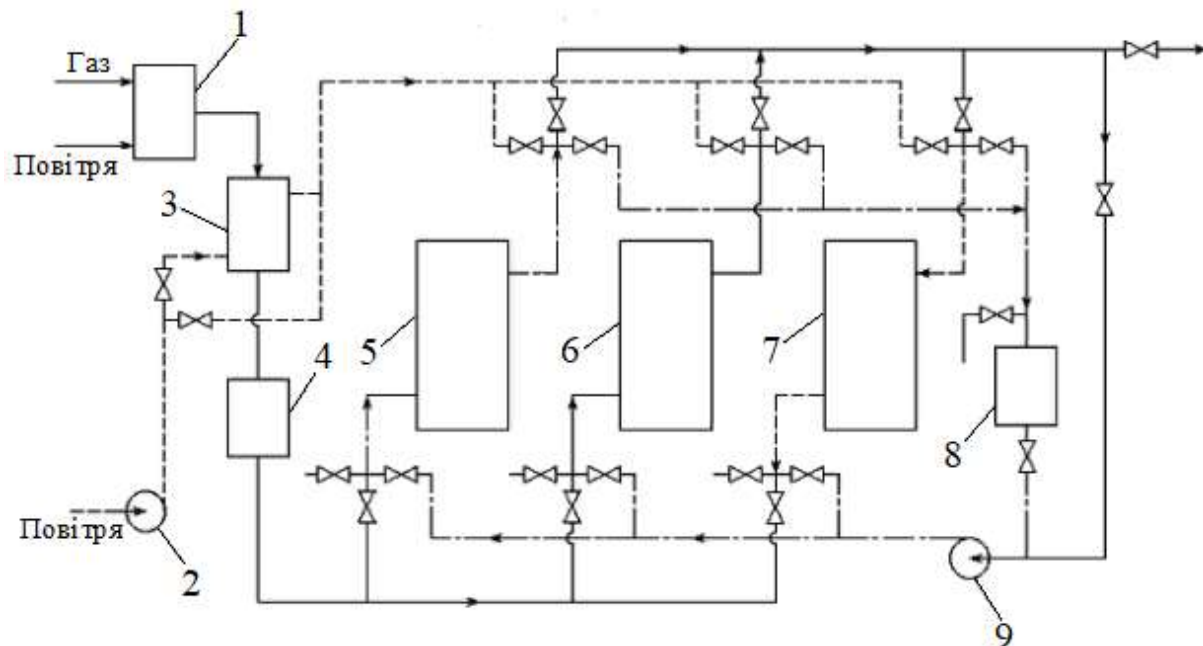
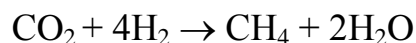


Рис. 1.5. Схема адсорбційного очищення газу від діоксиду вуглецю цеолітом СаА 17:
 1 – газогенератор; 2 – вентилятор; 3 – газоповітряний теплообмінник;
 4, 8 – водяні холодильники; 5-7 – адсорбери; 9 – циркуляційна газодувка

Природний газ спалюється киснем повітря, взятим у нестачі, в газогенераторі 1. Продукти неповного згоряння, що містять CO₂, після охолодження в теплообмінниках 3 і 4 і виділення вологи надходять в один з адсорберів 5, 6 або 7, заповнених цеолітом СаА, де відбувається осушка газу нагрітим в теплообміннику 3 повітрям, що подається вентилятором 2. Цеоліти на стадії регенерації нагрівають до температури не нижче 235 °С. Охолодження їх проводиться чистим газом, що циркулює через систему і холодильник 8 за допомогою газодувки 9, причому у початковий період охолодження газ після продування через цеоліти викидається в атмосферу, а потім циркулює в замкнутому контурі з постійним підживленням свіжим газом.

1.1.4. Каталітичне гідрування

Каталітичне гідрування застосовується для видалення невеликих кількостей (порядку частини відсотка у суміші газів) діоксиду вуглецю. Метод заснований на наступній реакції:



Реакції протікають при тисках 0,1–30 МПа, температурі 300–350 °С з використанням каталізатора на основі заліза або при 200 °С на нікель-хромовому або нікель-алюмінієвому каталізаторі.

Каталізатори, активні в реакції гідрування СО, зазвичай активні і в гідруванні СО₂. Найбільша кількість досліджень, метою яких була розробка каталізаторів метанування СО₂, присвячено нікелевим каталізаторам. Для синтезу використовується широке коло носіїв: оксиди алюмінію, алюмосилікати, кізельгур, кераміка, каолін, алюмінати кальцію та ін.

На даний момент відомо, що найактивнішими каталізаторами метанування СО₂ є метали VIII групи: рутеній, родій, платина, паладій, нікель. Однак нікель схильний до завуглецювання, а застосування благородних металів через високу вартість вимагає зниження їхньої витрати. Запропоновані нанесені каталізатори на основі металокомплексів рутенію та родію з триоктиламінами (ТОА) складу: Ru(OH)Cl₃ + 2ТОА/γ-Al₂O₃ та RhCl₃·4H₂O + 2ТОА//γ-Al₂O₃. Щоб відновити діоксид вуглецю в метан, визнаний промисловий метод включає реакцію водню та діоксиду вуглецю з використанням каталізатора на основі рутенію при температурі від 400 до 500 °С.

Новий спосіб метанування СО₂ включає реакцію наночастинок оксиду церію з діоксидом вуглецю в присутності рутенієвого каталізатора при накладенні електричного поля. Результати показують, що за наявності електричного поля каталізатор виявляє високу та стабільну каталітичну

активність у гідруванні діоксиду вуглецю в метан з більшою конверсією, ніж без електричної дії (рис. 1.6).

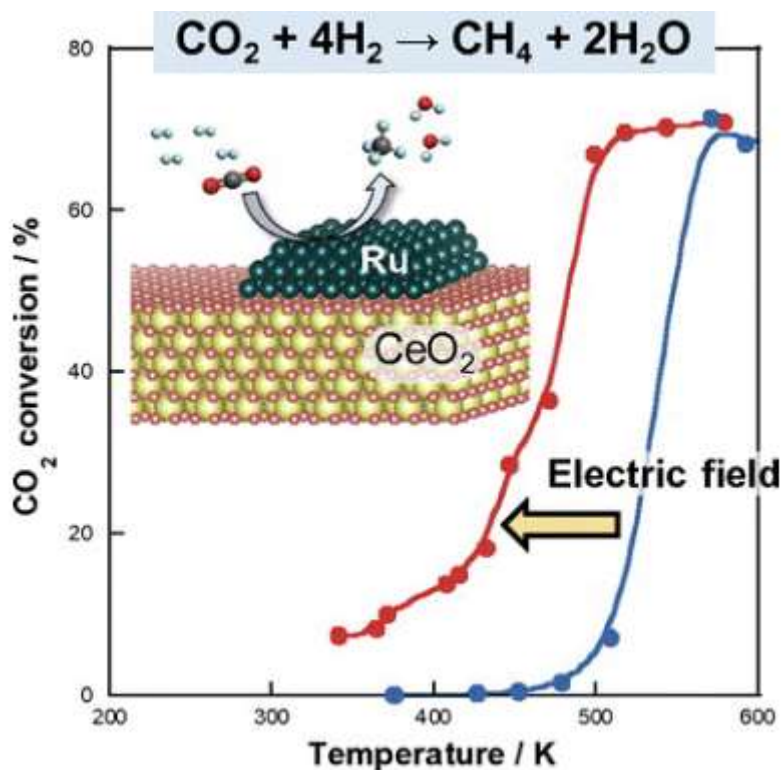


Рис. 1.6. Метанування CO₂ на Ru-Ce каталізаторі при накладенні електричного поля (червона лінія) та без накладання електричного поля (синя лінія)

1.1.5. Мембранне вилучення

Процес мембранного поділу компонентів газів заснований на їхній різній здатності проходити через напівпроникну перегородку, що розділяє масообмінний апарат на дві робочі зони. Під тиском газова суміш, що розділяється, подається в напірний клапан, причому легко проникаючі компоненти проходять через мембрану, важко проникні – виводяться з розділового апарату (рис. 1.7). Використовують полімерні мембрани. Застосування таких мембран дає змогу з високою ефективністю очистити газ від кислих компонентів.

Найбільше значення мають асиметричні (або анізотропні) мембрани, що характеризуються високою продуктивністю та селективністю. Вони складаються з тонкого (товщиною 0,1–1 мкм, а в окремих випадках 0,005 мкм) непористого полімерного матеріалу, нанесеного на мікропористу підкладку (товщина її 10–100 і більше мкм).

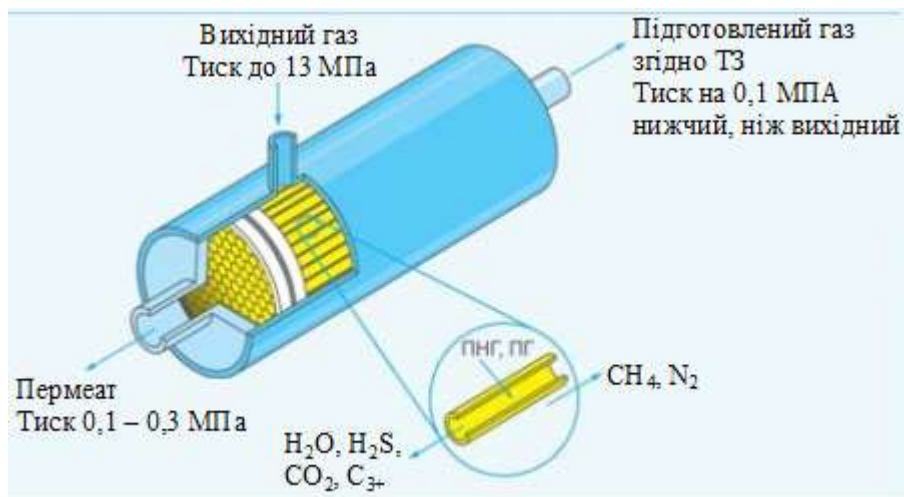


Рис. 1.7. Схема поділу суміші газів мембранним способом

Як полімерну частину асиметричної мембрани використовують натуральний каучук, полівінілтриметилсилан, тефлон та інші, а також блоксополімери високопроникних силоксанів з мономерами типу акрилатів.

Технологічна еволюція мембранних систем: у 1981 р. побудовано першу установку з ацетатцелюлозною мембраною для уловлювання CO₂ (Монсанто, США), 1995 р. – відкриття першого мембранного заводу (Кадамварі, Пакистан), 2012 р. – винахід керамічних мембран (MIT2 мембран, наповнених ферментами очищення димових газів (Sandia National Laboratories, США).

Схема мембранної очистки від вуглецю діоксиду за технологією Generon IGS представлена на рис. 1.8.

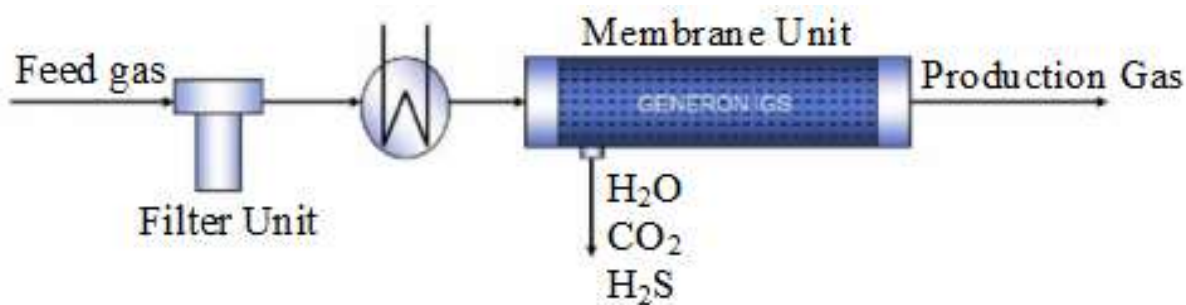


Рис. 1.8. Схема мембранної очистки від діоксиду вуглецю за технологією Generon IGS

Газ, що очищається, проходить через фільтр для видалення механічних домішок (Filter Unit), потім надходить у підігрівач і в мембрану (Membrane Unit). Діоксид вуглецю проходить через стінки мембран насамперед. Висококалорійний продуктивний газ, що залишився під тиском, відправляється споживачеві.

Перспективними є мембрани на основі наноматеріалів. В якості таких мембран використовують вуглецеві нанотрубки, що утворюють нанопори.

Молекули діоксиду вуглецю проходять через нанотрубки в резервуар для зберігання. Вуглецеві нанотрубки мають дуже гладку внутрішню поверхню, тому коли молекули CO_2 потрапляють в отвори цих нанотрубок, вони стикаються з меншим опором і більш ефективні. Серійне виробництво таких мембран планується з 2025–2030 рр.

1.1.6. Ферментативне вилучення

Одним з найбільш перспективних способів виділення CO_2 із суміші газів є застосування ферментів – органічних речовин білкової природи.

Ключова роль у ферментному уловлюванні CO_2 відводиться карбоангідразі, що імітує природний фермент людських легень, який захоплює та виводить CO_2 із крові та тканин. Вона каталізує хімічну реакцію між діоксидом вуглецю і водою, перетворюючи вуглекислий газ в бікарбонат, який згодом може зазнати переробки з отриманням харчової соди та крейди.

Для роботи у промислових умовах фермент іммобілізується з розчинником усередині реактора. При проходженні димового газу через розчинник фермент перетворює вуглекислий газ на гідрокарбонат.

У 2012 р. розроблено каталізатор, що імітує фермент карбоангідразу (Роджер Ейнс, США). Запропонована молекула – циклен з атомом цинку всередині та в комплексі з етанолом (рис. 1.9). Подібний комплекс веде себе подібно до ферменту карбоангідразу і здатний при високих температурах захоплювати молекулу CO_2 , займаючи просторове положення етанолу.

Передбачається, що каталізатор, утворюючи мономолекулярний шар на розділі фаз вода-рідина, прискорюватиме реакцію CO_2 з водою з утворенням бікарбонат іона та протона. Цей підхід є перспективним для уловлювання CO_2 на електростанціях.

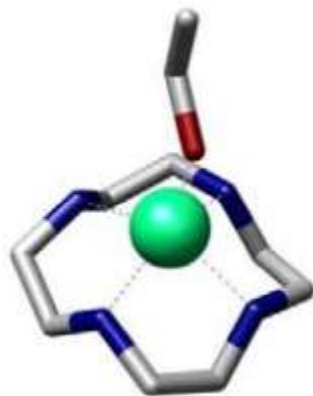


Рис. 1.9. Молекула комплексу цинку (зелений) з лігандом 1,4,7,10-тетраазациклододеканом та етанолом

У 2015 р. виявлено бактерії *Thiomicrospira cuponoga*, які можуть створювати фермент для конвертування CO_2 у карбонат. У цьому випадку необхідно підтримувати температуру процесу не вище $40\text{--}43\text{ }^\circ\text{C}$, щоб підтримувати активність бактерій.

Перевагами ферментативного вилучення є екологічність та рентабельність.

1.1.7. Електрохімічне вилучення

Даний спосіб уловлювання діоксиду вуглецю ґрунтується на застосуванні електричної енергії. Схема перетворень вуглекислого газу на різні продукти під впливом електрики наведено на рис. 1.10. Реакція відновлення CO_2 в CO здійснюється на Au-, Ag- або Pd-електродах.

Перетворення діоксиду вуглецю на формиати (HCOO^-) відбувається на нанокаталізаторах на основі олова, паладію, нікелю, вісмуту, кобальту або молібдену, нанесених на вуглецеві електроди.

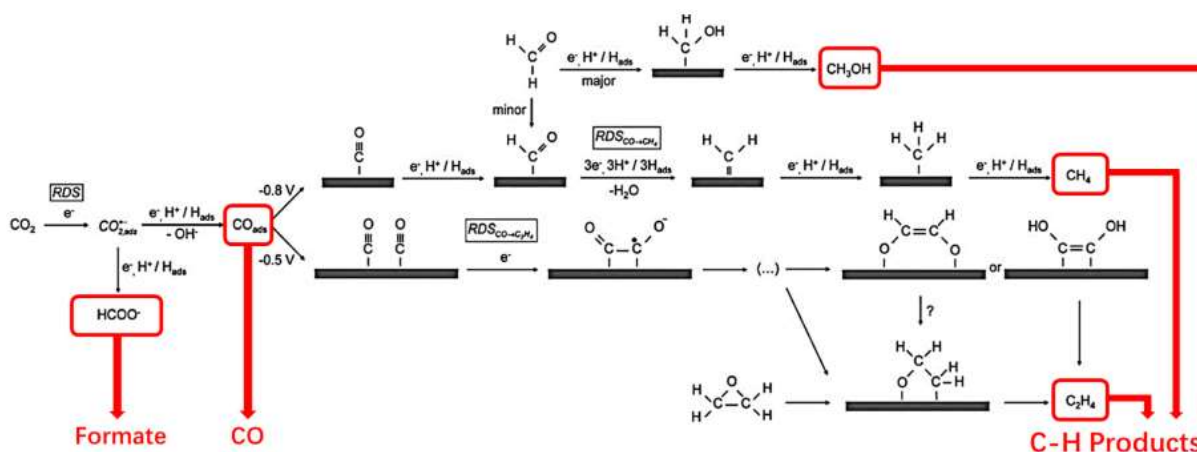


Рис. 1.10. Схема перетворень вуглекислого газу на різні продукти під дією електрики

Одержання вуглеводнів з діоксиду вуглецю протікає на мідному нанокаталізаторі у середовищі таких електролітів, як луги, етанол, пропанол, ацетати.

Електрохімічний каталіз процесу гідрування CO_2 в метан і C_1 -оксигенати можна провести із застосуванням платинового електрода (рис. 1.11). Суміш продуктів, що утворилася, пропонується як зелене паливо. По суті за допомогою цієї концепції в майбутньому метан може ефективно вироблятися з атмосферного вуглекислого газу.



Рис. 1.11. Схема електрохімічного відновлення CO₂ у зелене паливо

Інноваційні розробки, що реалізуються з низькими концентраціями CO₂, що існують у повітрі, запропоновані винахідниками Массачусетського технологічного інституту з Кембриджу. Метод вилучення заснований на пропусненні повітря через пакет заряджених електрохімічних пластин. Сам пристрій являє собою велику батарею, яка поглинає вуглекислий газ з повітря (або іншого газового потоку), що проходить через її електроди, коли вона заряджається, заповнюється CO₂, а потім пристрій може випускати CO₂ в процесі розрядки (рис. 1.12).

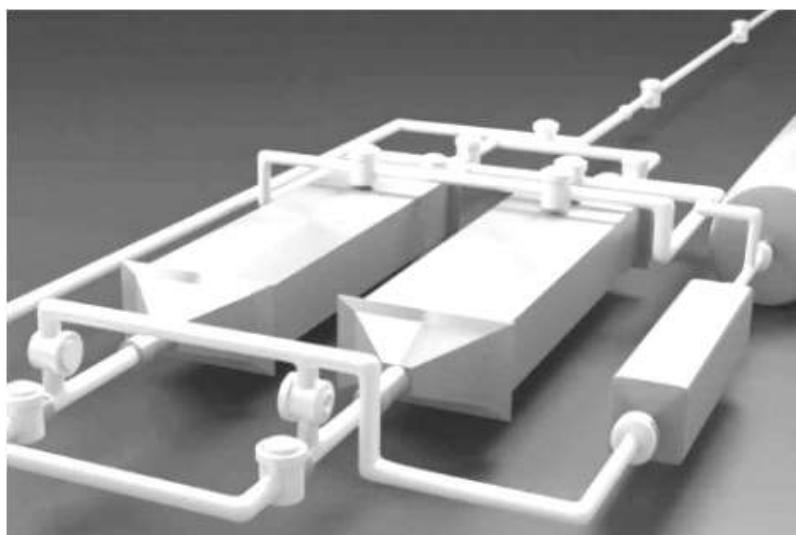


Рис. 1.12. Схема електрохімічної системи уловлювання CO₂ з повітря

Під час заряджання акумулятора CO₂ на поверхні кожного електрода відбувається електрохімічна реакція. Електроди покриті поліантрахіноном у вигляді нанотрубок. Такі електроди мають природну спорідненість з вуглекислим газом і легко реагують з його молекулами в газовому потоці,

навіть коли він присутній у дуже низьких концентраціях. Зворотна реакція відбувається, коли акумулятор CO₂ розряджається і в процесі виходить потік чистого вуглекислого газу. Вся система працює при кімнатній температурі та атмосферному тиску.

1.2. Перспективи використання CO₂

1.2.1. Зберігання діоксиду вуглецю

Варіанти геологічного зберігання діоксиду вуглецю:

- газові резервуари;
- глибоко залягаючі соленосні формації;
- вугільні пласти.

В останніх двох випадках геологічне зберігання CO₂ супроводжується його закачуванням у щільному стані у формацію породи, що знаходиться нижче за земну поверхню.

Геологічне зберігання CO₂ здійснюється в рамках трьох проектів промислового масштабу (проекти близько 1 Мт CO₂ на рік або більше): проект Слейпнера у Північному морі, проект Уейберна у Канаді та проект Ін-Салаха в Алжирі. Близько 3-4 Мт CO₂, який інакше був би викинутий в атмосферу, уловлюється і зберігається щорічно в геологічних формаціях.

Потенційним варіантом зберігання CO₂ є закачування після його уловлювання безпосередньо в глибинну частину океану (на глибини понад 1000 м), де більша частина буде ізольована від атмосфери протягом століть. Це може бути досягнуто шляхом транспортування CO₂ трубопроводами або суднами до місця зберігання в океані, де він закачується у водяний стовп океану або на морське дно.

Зберігання в океані ще не застосовувалося і демонструвалося на експериментальному рівні і зараз перебуває на етапі досліджень. Проте проведено експерименти на місцях невеликого масштабу, і протягом 25 років проводилися теоретичні, лабораторні та модельні дослідження цільового зберігання CO₂ в океані.

1.2.2. Застосування вуглекислого газу

Сфери застосування діоксиду вуглецю:

- хімічна промисловість (отримання питної, кальцинованої, кристалічної соди; виробництво миючих засобів);

- харчова промисловість – як консервант і розпушувач (на упаковці позначається кодом E290), у тому числі для газування лимонаду та питної води;
- медицина – в кріохірургії вуглекислий газ використовується як одна з основних речовин для видалення новоутворень в організмі пацієнта; як стимулятор для відновлення дихання пацієнта і при введенні його в наркоз;
- системи пожежогасіння, у тому числі вогнегасники;
- зварювальні роботи (як захисне середовище металу від нагрівання та окислення);
- сільське господарство – як добриво (при використанні сонячного світла);
- авіамоделювання (як джерело енергії для двигунів);
- сфера зброї – для створення тиску в пневматичній зброї.

У пожежогасінні та авіамоделюванні застосовується рідка вуглекислота. Останнім часом діоксид вуглецю (в газоподібному стані) застосовується як основа отримання джерела палива.

Тверда вуглекислота («сухий лід») використовується:

- у лабораторних дослідженнях для одержання низьких температур;
- для охолодження харчових продуктів при їх транспортуванні та зберіганні (наприклад, морозива);
- при випробуваннях та збиранні деяких агрегатів у машинобудуванні.

Перспективним напрямом застосування рідкого діоксиду вуглецю є закачування в нафтовмісні пласти з метою інтенсифікації нафтовидобутку, що забезпечує зниження енерговитрат, виключення ризику утворення газових гідратів, підвищення нафтовіддачі родовищ із високов'язкою нафтою. Цей підхід впроваджується в рамках проекту CCS-EOR Carbon Capture and Storage - Enhanced Oil Recovery.

Зіставивши вищеописані способи вилучення діоксиду вуглецю із суміші газів, можна зробити такі висновки:

- з економічної точки зору менш витратними процесами є абсорбція водою і хемосорбція розчинами карбонатів через дешевизну абсорбентів, але, з позиції вмісту діоксиду вуглецю в газі, що десорбується (85 % об.), обидва процеси можна вважати малоефективними;
- за ступенем очищення газу від CO₂ хемосорбція моноетаноламіном більш ефективна, ніж абсорбція метанолом (вміст діоксиду вуглецю в очищеному газі відповідно 2 % об. і менше 0,05 % об.);
- каталітичне гідрування, ферментативне уловлювання і електрохімічне вилучення діоксиду вуглецю на відміну від інших способів уловлювання

передбачають незворотне конвертування вуглекислого газу у різні продукти, тобто відсутність десорбції.

У світі в 2019 р. вдалося скоротити викиди вуглекислого газу, утворені при паливно-енергетичному спалюванні вуглеводнів. У країнах з розвинутою економікою викиди скоротилися більш ніж на 370 млн. т (або 3,2 %), причому на частку електроенергетики припало 85 % цього зниження. Насамперед, це пов'язано зі зростаючою роллю відновлюваних джерел (переважно вітру і сонця), переходу з вугілля та природного газу і збільшення виробництва атомної енергії в економічно розвинених країнах. Так, глобальні викиди CO₂ від використання вугілля скоротилися майже на 200 млн т або на 1.3 % порівняно з рівнем 2018 р.

Серед передових країн найбільше скорочення викидів зафіксовано у США: на 140 млн. т, або на 2,9 %. Слід зазначити, що американські підприємства ще минулого століття впровадили установки з уловлювання CO₂ (CCS). Викиди в Європейському союзі скоротилися у 2019 р. на 160 млн. т або на 5 % завдяки енергетичному сектору. У ЄС уперше вироблення електрики на основі природного газу вище, ніж на основі вугілля, а вітрова електроенергія майже наздогнала вугільну генерацію. Скорочення викидів у Євросоюзі очолює Німеччина. Викиди в Японії скоротилися на 45 млн т або близько 4 %, що є найшвидшим темпом зниження з 2009 р., оскільки збільшилися обсяги виробництва перезапущених ядерних реакторів.

Що ж до інших шляхів використання CO₂, особливий інтерес представляє перетворення їх у таку цінну хімічну речовину як метан. Тому багато країн підтримують програму CCS. Зокрема, метан можна використовувати не лише як паливо, а й як водневий носій.

Так, деякі заводи в Німеччині вже працюють на основі концепції Power to Gas (енергія у газ), яка дозволяє акумулювати та транспортувати енергію від електрики у вигляді стиснутого газу. У результаті CCS проекти з великою ймовірністю стають реальністю.

2. РОЛЬ ВОДНЮ В ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ

За останні п'ять років 29 країн світу, що формують 53 % світового ВВП, опублікували стратегії низьковуглецевого розвитку, які мають на увазі скорочення вуглецевого сліду найчастіше до нульового рівня. Вуглецевий слід – це сукупність викидів парникових газів, що прямо або опосередковано утворюються в результаті будь-якої діяльності. Викиди CO₂ формуються при видобутку корисних копалин, спалюванні палива, обробці (розчистці) земель, виробництві продуктів харчування, товарів та матеріалів.

Одна з ключових галузей економіки – електроенергетика – виробляє 30 % світових викидів парникових газів. Для декарбонізації цього сектора зараз активно використовуються інноваційні технології виробництва електроенергії, у тому числі на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Якщо 15 років тому до альтернативної енергетики ставилися як до моди на зеленість, то зараз ВДЕ-генерація – гідний конкурент традиційним електростанціям, позаяк у ряді випадків перевищує їх за показником кінцевої ціни.

«Зелена» генерація на відміну від електростанцій, що використовують для отримання електроенергії та тепла вуглеводні, не формує прямих викидів парникових газів. А непрямі викиди, що утворюються при виготовленні обладнання для зеленої генерації, у перерахунку на кВт·год енергії, що відпускається, становлять десятки грам. Більше того, у випадку, якщо заводи з виробництва обладнання для ВДЕ-генерації постачаються “зеленою” енергією, то вуглецевий слід на життєвому циклі може прагнути нуля. Непрямі викиди можуть бути знижені за рахунок підвищення енергоефективності.

Рівень вироблення ВДЕ залежить від погодних умов і для забезпечення надійності енергопостачання потребує комбінації з додатковими технічними рішеннями, наприклад, накопичувачами енергії. Оптимальний варіант для сезонного регулювання вироблення ВДЕ – водень. Він може вироблятися з використанням «зеленої» енергії у моменти наявності надлишків вироблення та споживатися, коли потужності ВДЕ не вистачає. Таким чином, електростанції на водні можуть відігравати роль резервної потужності в енергосистемах з превалюючою часткою відновлюваних джерел енергії.

В останні кілька років у світовій науковій дискусії щодо глобального енергетичного транзиту позначилася гаряча тема – водень. Водневі оптимісти вважають, що цей енергоносіє відіграє ключову роль у декарбонізації світової енергетики. За оцінками Водневої ради (Hydrogen Council), за оптимістичного сценарію до 2050 р. водень забезпечить 15 % світового попиту на первинну енергію. Розглядаються можливості використання водню в декарбонізації дорожнього, морського та авіаційного транспорту, теплоенергетики,

нафтопереробки та хімічної промисловості, виробництві сталі, цементу та скла, зберіганні електроенергії. На початок 2021 р. довгострокову стратегію розвитку водню різного ступеня деталізації оприлюднили вісімнадцять країн, на які припадає 70 % світового ВВП. Найбільш активний у просуванні водню Євросоюз та найбільші європейські країни, особливо Великобританія, Німеччина та Нідерланди. Водень є одним із ключових елементів дорожньої карти ЄС щодо досягнення нульових викидів парникових газів до 2050 р. Зокрема, до 2030 р. намічено побудувати електролізери сукупною потужністю 40 МВт для виробництва зеленого водню. Незважаючи на тривалу історію досліджень перспектив водневої енергетики, науковий аналіз переважно ведеться або на макрорівні, або на рівні окремих секторів і галузей економіки найбільших європейських енергетичних компаній. Зрештою, перспективи розвитку водневої енергетики залежать від можливості компаній реального сектора інтегрувати водень у свої бізнес-моделі.

2.1. Економіка водню: сучасний стан

В даний час приблизно 70 млн. т водню в чистому вигляді використовується як промислова сировина в нафтопереробці для очищення нафти та нафтопродуктів, а також у хімічній промисловості під час виробництва аміаку. У складі суміші інших газів ще 45 млн т водню застосовується у сталеливарній промисловості та при виробництві метанолу. Використання водню як енергоносія знаходиться у зародковому стані. При цьому в дослідженні зазначається, що водень можна застосовувати для організації альтернативного способу зберігання енергії. Існує кілька типів водню, за кожним із яких стоїть унікальний промисловий процес.

2.2. Палітра водню

Водень – вторинний енергоносіє. Тобто такий енергоносіє, який спочатку треба зробити: у природі водень зустрічається лише у хімічному зв'язку з іншими елементами.

Водень прийнято класифікувати за «кольорами», хоча сам по собі цей газ за стандартних умов не має ні кольору, ні запаху, ні смаку. Колір водню в даному випадку означає спосіб, яким він виготовлений. Більшість водню у світі нині виробляється із газу (методом парового риформінгу метану чи автотермічного риформінгу) чи з вугілля (методом газифікації вугілля). Водень

з природного газу називається «сірим», водень з вугілля – «коричневим», обидва кольори мають на увазі наявність викидів парникових газів. Якщо ж під час отримання «сірого» чи «коричневого» водню організувати уловлювання та поховання CO₂, то такий водень уже називається «блакитним».

Зелений водень. Так називають водень, виробництво якого вважається найекологічнішим: його одержують за допомогою енергії відновлюваних джерел, наприклад, сонячних, вітрових та гідроелектростанцій. Воду розщеплюють на водень та кисень методом електролізу. За такого способу не утворюються парникові гази.

Сірий водень. Це найпоширеніший нині водень. Для його отримання метан переробляють разом з водяною парою методом парової конверсії, при цьому утворюється вуглекислий газ. Частка сірого водню в енергетиці, як і раніше, велика через дешевизну його виробництва, але зі зростанням екологічних стандартів його витісняє газ інших кольорів.

Синій (блакитний) водень. Той же сірий, але з одним уточненням: вуглекислий газ, що утворюється, уловлюють і зберігають, а не відправляють в атмосферу. Такий підхід робить водень чистішим, проте технології вловлювання вуглецю поки що мало поширені.

Бірюзовий водень. Це щось середнє між сірим, синім та зеленим. Такий водень виробляють методом піролізу метану: газ нагрівають до високих температур при нестачі кисню та одержують водень та твердий вуглець. Вуглець не відлітає в атмосферу, як у випадку із сірим воднем, а зберігається або використовується в промисловості.

Смарагдовий водень. Новинка у водневій палітрі. Цей водень отримують з біометану та природного газу за допомогою термоплазмового електролізу – за рахунок води, електрики та плазми. Вчені вивчають та тестують технологію.

Жовтий (жовтогарячий) водень. Як і зелений, жовтий водень виробляють методом електролізу, але з використанням атомної енергії, що мінімізує утворення вуглецю під час виробництва. Однак називати його цілком екологічним не можна через ядерні відходи, які потрібно утилізувати, переробити чи поховати.

Рожевий водень. Цей водень отримують, як і жовтий, шляхом електролізу води за рахунок ядерної енергії, але прямо на атомних електростанціях.

Червоний водень. Технологія його отримання повторює спосіб виробництва рожевого водню, але розкладають воду не електролізом, а за допомогою хімічних реакцій і каталізаторів при високій температурі.

Пурпуровий водень. Цей газ можна буде одержати, коли створять термоядерні установки. За рахунок ядерної енергії та піролізу можна буде розкласти воду на кисень та водень.

«Блакитний» водень виробляється за допомогою парового риформінгу метану та використання систем уловлювання, зберігання та утилізації вуглекислого газу (CCUS), а «зелений» – за рахунок поділу води на кисень та водень на електролізних установках, які постачаються з відновлюваних джерел енергії. Розвиток інфраструктури для отримання «блакитного» водню де-факто пов'язано з впровадженням технологій CCUS, у тому числі уловлювання CO₂ за допомогою моноетаноламіну (безбарвної рідини з легким аміачним запахом, що добре абсорбує вуглекислий газ) і металорганічних каркасів – решітчастих структур з металу та органіки, які здатні утримувати сторонні сполуки, а при зміні температури та тиску – вивільняти їх.

За даними Energy Institute, глобальна потужність систем CCUS у 2023 р. збільшилася на 7 %, досягнувши 55 млн. т на рік. Застосування систем CCUS веде до подорожчання виробництва водню. Якщо отримання H₂ за допомогою риформінгу метану обходиться в середньому від 1,5 до 1,8 дол. на кг (залежно від вартості газу), то при використанні технологій CCUS питомі витрати зростають до 2,1–2,4 дол. на кг, за оцінкою Оксфордського інституту енергетичних досліджень (OIES). У свою чергу витрати на отримання «зеленого» водню варіюються в діапазоні від 3,3 до 6,5 дол. на кг, залежно від вартості «чистої» електроенергії та типу використовуваного електролізера.

Найбільшого поширення на сьогоднішній день набули два типи електролізних установок: лужні електролізери, які використовують для отримання H₂ рідкий розчин електроліту, та установки з протоннообмінною мембраною, на яких застосовується твердий полімерний електроліт. Обидва типи установок працюють при температурі 80 °С. Альтернативою є твердооксидні електролізери, які вимагають використання теплової енергії та працюють при температурі 1000 °С.

У цілому, нині технології отримання «блакитного» і «зеленого» водню перебувають у тому стадії комерціалізації, як і технології перевезення ЗПГ в 1960-ті рр., коли починали будуватися перші спеціалізовані танкери для міжконтинентального транспортування зрідженого газу. Поява нових груп споживачів, зокрема в електроенергетиці та транспорті, відбувається одночасно з формуванням кластерів з виробництва H₂. Одними з них можуть стати узбережжя північних морів з характерним для них надлишком вітрогенеруючих потужностей і наявністю густої мережі газопроводів, які можна модернізувати для транспортування H₂.

«Блакитний» водень не сприяє декарбонізації, навпаки, його використання має негативніший вплив на навколишнє середовище, ніж використання викопних джерел енергії. Про це йдеться у дослідженні вчених Роберта Ховарта з Корнеллського університету та Марка Якобсона зі Стенфорда, на яке посилається асоціація «Глобальна енергія».

«Блакитний» водень виготовляється з природного газу, використовуючи технології уловлювання та зберігання вуглецю. Багато країн у своїх стратегіях енергопереходу роблять ставку саме на цей вид палива. Однак дослідники стверджують, що при виробництві «блакитного» водню викиди парникових газів на 20 % вищі, ніж при спалюванні газу чи вугілля. За словами Ховарта та Якобсона, це пов'язано з великою кількістю природного газу, необхідного для виробництва водню, а також витоками метану із свердловин та у ланцюжку постачання.

Зібраний вуглекислий газ може зберігатися нескінченно довго, але це є оптимістичним і недоведеним твердженням. Навіть якщо це правда, використання «блакитного» водню важко виправдати з погляду клімату.

Дорожня карта ЄС щодо досягнення нульових викидів парникових газів до 2050 р. спрямована на розширення виробництва та використання саме зеленого водню. Доводиться його важлива роль у декарбонізації металургії. Проте в даний час цей вид водню неконкурентоспроможний у зв'язку з високими витратами виробництва (табл. 2.1). Згідно з Глобальним рейтингом S&P Global Ratings, щоб скласти конкуренцію викопним видам палива, витрати виробництва зеленого водню повинні до 2030 р. знизитися більш ніж на 50 % – до 22,5 дол. за кілограм. Це можна досягти з допомогою трьох чинників: зниження витрат виробництва зеленої електроенергії; зниження вартості виробництва електролізерів; підвищення коефіцієнта завантаження устаткування на всіх стадіях виробничого процесу.

Таблиця 2.1

**Витрати виробництва сірого, блакитного та зеленого водню,
дол. за 1 кг (дані на жовтень 2020 р.)**

	Нідерланди	США	Японія
Сірий водень	1,7	1,25–2	2,7
Блакитний водень	1,9		
Зелений водень (електроліз із протонною обмінною мембраною (PEM))	4,3	2,8–4,3	5,3

Невизначеність зберігається щодо витрат транспортування різних типів водню трубопроводами, особливо на далекі відстані, і, навіть по розподільним

мережам кінцевим споживачам. Дослідження, в яких автори повністю розкривають методологію розрахунків, цінові прогнози та експертні гіпотези, показують, що навіть й у 2050 р. блакитний водень буде дорожчою сировиною у секторі теплоенергетики Європи порівняно з конвенційними тепловими насосами.

Розрахунки S&P Global Ratings за актуальними даними підтвердили висновки наукових праць, щодо критичного фактору, що визначає швидкість розвитку енергетичного водню.

Навіть найзавзятіші прихильники масштабного розвитку водневої енергетики сходяться в тому, що просування водневого енергетичного контуру потребуватиме масштабних державних ресурсів і буде неможливим без кардинального зниження вартості генерації електроенергії з НВДЕ та технологій CCS. При цьому в оптимістичному варіанті прорив у водневій енергетиці можливий тільки після 2030 р.

2.3. Водневі стратегії Брітіш Петролеум, Роял Датч Шелл та Тоталь

До створення галузі енергетичного водню активно включилися найбільші європейські вертикально інтегровані нафтові компанії, які накопичили компетенції у роботі з воднем як сировиною у нафтопереробці та нафтохімії. При цьому нафтогазові компанії прагнуть просунути проекти не лише зеленого, а й блакитного водню, тобто водню, що отримується з природного газу, у комбінації з будівництвом потужностей CCS. Підхід виходить з того, що саме природний газ виступить як перехідне паливо або міст до декарбонізованої енергетичної системи.

Компанія British Petroleum поставила за мету завоювати десятивідсоткову частку глобального виробництва чистого водню до 2030 р. і активно просуває проекти зеленого та блакитного водню в США, Великобританії, Європі, Австралії та Китаї. Досягнення мети дозволить British Petroleum виробляти понад 100 тис. барелів біоенергії на день порівняно з 22 тис. в даний час. Компанія розвиватиме водневі проекти на тлі скорочення видобутку нафти та газу більш ніж на 40 % та зобов'язань British Petroleum щодо зниження викидів вуглецю на 35–40 % до 2030 р. Планується десятикратно збільшити інвестиції компанії у водневий сектор – до 5 млрд. дол. на рік.

Ще у 2018 р. німецький нафтопереробний завод (НПЗ) British Petroleum у м. Лінген став першим у світі НПЗ, який використовує поряд із сірим зелений водень у процесі отримання нафтопродуктів. У рамках реалізації стратегії з досягнення кліматичної нейтральності до 2050 р. British Petroleum у кооперації

з німецькими компаніями запланувала ввести в експлуатацію на НПЗ Лінген у 2024 р. електролізер потужністю 50 МВт, який дозволить довести частку зеленого водню в сукупному споживанні цієї сировини до 20 %. Остаточне інвестиційне рішення щодо цього проекту має бути ухвалене у 2022 р. залежно від того, чи зможе компанія отримати фінансову підтримку ЄС. У майбутньому British Petroleum розраховує повністю перевести НПЗ Лінген на зелений водень і продавати його кінцевим споживачам. Проект планується реалізувати у кілька етапів. До 2030 р. British Petroleum націлена збільшити потужність заводу до 1ГВт, що складе 20 % від плану уряду Великобританії з виробництва 5 ГВт водню. Вуглекислий газ, що утворюється в процесі отримання водню, уловлюватиметься і відправлятиметься на зберігання в обсязі до 2 млн т на рік. Проект заводу з виробництва водню інтегрований із будівництвом двох сховищ вуглекислого газу у тому ж регіоні, операторами яких буде British Petroleum.

За прогнозом British Petroleum до 2025 р. виробництво енергетичного водню становитиме від 0,6 до 3,6 млн т, до 2030 р. – від 1,8 до 13,4 млн т. Причому навіть у радикальному сценарії досягнення світовою економікою до 2050 р. нульових викидів парникових газів на 20–60 % та блакитного – 19 % сукупного виробництва водню. Основним майданчиком з розвитку водневих проектів для Royal Dutch Shell, яка поставила завдання поетапно збільшити свою нішу на ринку водню, що формується, стали Німеччина і Нідерланди. Стратегічна мета Royal Dutch Shell – стати великим виробником зеленого водню за допомогою електролізу з використанням таких відновлюваних джерел енергії, як вітер та сонце. Як і British Petroleum, Royal Dutch Shell має намір, як проміжне рішення, виробляти блакитний водень.

Діюча воднева програма Royal Dutch Shell розділена на кілька етапів, проте деякі поки що не мають чітких часових рамок (табл. 2.2).

У Німеччині компанія планує при отриманні співфінансування з боку ЄС побудувати електролізер REFHYNE, який вироблятиме зелений водень з використанням відновлюваних джерел енергії. Цей електролізер потужністю 10 МВт стане одним з найбільших, що використовують передову технологію протонної обмінної мембрани (ПОМ). Найпотужніший завод потужністю близько 219 тис. т водню на рік збудовано у м. Весселінг.

Royal Dutch Shell разом з компаніями RWE, Equinor, Gasunie та Groningen Sea Ports бере участь у найбільшому європейському проекті з зеленого водню NorthH2 в Нідерландах, який намічено реалізувати до 2040 р. У разі отримання фінансування, учасники проекту планують виробляти більше 800 тис. т зеленої водії. потужністю 10 ГВт у Північному морі.

Інший великий водневий проект Royal Dutch Shell – створення зеленого водневого хабу в порту Роттердама. У липні 2020 р. Шелл (Shell) і Єнеко

(Eneco) виграли тендер на будівництво офшорного вітроенергетичного проекту Hollandse Kust Noord потужністю 759 МВт у Північному морі, який повинен виробляти близько 18-22 тис. т водню на добу з 2023 р. Обидва проекти підтверджують, що реалізація водневої стратегії РДШ критично залежить від отримання зовнішнього фінансування. Темпи розвитку водневої енергетики цілком і повністю визначаються можливостями та політикою країн ЄС та Брюсселя загалом щодо підтримки корпоративних водневих проектів в умовах економічного відновлення після кризи COVID-19.

Таблиця 2.2

Етапи водневої програми компанії РДШ Royal Dutch Shell

Терміни	Етапи	Проекти
2020	Етап 0 Оцінка ринку водню, формування та запуск пілотних проектів, погодження фінансування зелених проектів ЄС, уточнення стратегії	Будівництво мережі водневих автозаправних станцій у Німеччині (100 станцій). Будівництво водневих автозаправних станцій у Каліфорнії (США). Демонстраційний проект транспортування рідкого водню у Японії.
2021	Етап 1 Власне використання, задоволення потреб у водні в рамках існуючих проектів, формування генеруючих потужностей.	Виробництво зеленого водню з НВДЕ в Німеччині (потужність 10 МВт з можливістю розширення до 100 МВт). Виробництво зеленого водню у Роттердамі (Нідерланди) (200 МВт).
не визначено	Етап 2 Забезпечення великих водневих хабів; обслуговування кінцевих споживачів у локальних водневих хабах; створення коридорів поставок водню та формування ринку транспортування водню	Будівництво електролізерів у Китаї (20 МВт). Будівництво електролізерів у Німеччині (100 МВт). Будівництво ще 50 водневих автозаправних станцій у Каліфорнії. (США). Проект із транспортування водню. Проект H-Vision (Нідерланди). Проект H2Accelerate - Phase 1 у Європі.
не визначено	Етап 3 Створення кластерів. Вихід на міжрегіональний та міжнародний рівень поставок. Вдосконалення інфраструктури	Розвиток проекту NortH2 (Нідерланди). Розвиток проекту H2Accelerate – Phase 2 у Європі.
2035	Етап 4 Формування ринку водню. Розширення мережі трубопроводів для транспортування водню, масове впровадження водневих технологій у транспорт	Забезпечення воднем авіаційного та морського транспорту

Водневі плани Total скромніші в порівнянні з британським і нідерландським нафтогазовими гігантами. Вони передбачають пілотні проекти у сфері водню. Total концентрується на дослідницьких розробках у виробництві блакитного та зеленого водню з використанням вуглецевих процесів на основі природного газу з уловлюванням та зберіганням вуглецю з метою декарбонізації галузей промисловості.

2.4. Стратегії EoN, EDF та RWE

Водню приділяється значна увага у стратегії міжнародної енергетичної компанії EoN. Однак варто зазначити, що основні водневі проекти віднесені до категорії довгострокових цілей. Компанія розраховує на фінансування ЄС у рамках програм «Зеленого курсу» та програми з декарбонізації у Німеччині. Зокрема EoN веде переговори з представниками Національної водневої ради ФРН з метою отримання державної підтримки своїх водневих проектів. Комплексні податкові рішення, вже апробовані німецьким урядом у ході розвитку нової відновлюваної енергетики, могли допомогти EoN та іншим компаніям знизити витрати розробки водневих технологій і, зрештою, прискорити процес енергетичної трансформації. Компанія бере участь у кількох інноваційних проектах у рамках програми Європейської комісії з фінансування «важливих проектів, що становлять загальноєвропейський інтерес» (IPCEI), метою якої є підтримка комплексних водневих проектів на всій території Європи. На середину 2021 р. основні водневі проекти EoN сконцентровані на формуванні мережі трубопроводів, що транспортують водень і синтетичний метан, для чого компанія планує вдосконалювати технології Power-to-Gas.

Згідно з діючими в Німеччині нормами у газопроводи при транспортуванні природного газу може бути без шкоди для труб додано до 10 % водню. EoN лобіює підвищення цієї норми до 20 %. Поряд із цим компанія вивчає можливості використання діючої газопровідної інфраструктури для прокачування чистого водню. У листопаді 2020 р. стартував унікальний проект дочірньої компанії EoN у м. Хольцвікед, де існуючий газопровід переоснащується для транспортування чистого водню.

У середині 2020 р. EoN та промисловий конгломерат Thyssenkrupp сформували партнерство з виробництва екологічно чистого водню з використанням зеленої електроенергії. Планується, що віртуальна електростанція EoN дистанційно управлятиме електролізерами, які автоматично включаться саме в той момент, коли в енергосистемі буде спостерігатися надлишок електроенергії, що генерується.

Істотну нішу на європейському ринку водню має намір зайняти один із головних виробників електроенергії у Франції – компанія EDF2. Для компанії новий напрямок бізнесу має особливе значення на тлі тиску Єврокомісії, що посилюється, націленого на зниження, а в перспективі і закриття атомної електроенергетики на території ЄС. Інтерес EDF Group до водню сформувався досить давно. Ще у 2018 р. EDF придбала близько 22 % акцій McPhy, компанії-виробника електролізерів. У 2019 р. EDF створила дочірню компанію Hynamics, що спеціалізується на водневих проектах та декарбонізації виробництва. Стрижневим водневим проектом EDF є будівництво одного з найбільших у Європі електролізерів потужністю 30 МВт у Хеммінгштедті (Німеччина).

Просування водню як ключового елемента енергетичного переходу в області річкового та морського транспорту Hynamics здійснює в рамках міжрегіонального проекту Північно-Західної Європи H2SHIPS, що включає три порти: Остенде (Бельгія), Амстердам та річковий порт Париж. Загальний бюджет проекту, в якому французька компанія є одним із ключових учасників, становить 10 млн. євро. Німецький концерн RWE виходить із того, що зелений водень є важливим фактором для успіху енергетичного переходу, а також матиме вирішальне значення для подальшого розширення відновлюваних джерел енергії.

Водень замінить викопне паливо в багатьох промислових процесах і використовуватиметься при транспортуванні в тих випадках, коли неефективні рішення з використанням електробатарей. В даний час RWE залишається єдиною німецькою компанією, що бере участь у всіх етапах ланцюжка створення вартості зеленого водню. Мета європейської водневої стратегії RWE полягає в тому, щоб забезпечити загалом 40 гігават електролізної потужності для виробництва зеленого водню до 2030 р. Логічно, що, будучи одним з найбільших генераторів електроенергії з відновлюваних джерел, компанія просуває численні проекти виробництва та транспортування зеленого водню.

Спираючись на накопичену компетенцію, компанія грає провідну роль у великих водневих проектах європейського значення. Зокрема, слід згадати відкритий міжсекторальний проект GET H2, у якому, крім RWE, беруть участь такі компанії, як Generation, Nowega, OGE, Gascade, БП, BASF, Stadtwerke Lingen, Hydrogenious Technologies та інші. Завдання цього амбітного проекту – побудувати інтегровану водневу інфраструктуру, яка дозволить зв'язати воєдино електроенергетику, теплоенергетику, промисловість та транспорт по всьому ланцюжку створення вартості. RWE також приділяє першочергову увагу одному з найамбіційніших водневих проектів Європи – NortH2, який вже згадувався вище. Цей масштабний проект, який, окрім RWE, реалізується найбільшими нафтовими компаніями РДШ (Royal Dutch Shell) та Equinor,

газотранспортною компанією та оператором газової мережі Gasunie (Нідерланди) та морським портом Гронінген, був ініційований у лютому 2020 р. з півночі Європи з метою створення центру зеленого водню в Нідерландах.

2.5. Сектори споживання водню у світі

Низьковуглецевий водень в першу чергу може бути використаний для декарбонізації галузей, в яких використовуються сірий і коричневий водні. Поточне річне споживання водню у світі становить 75 млн тонн, що призводить до викидів 0,6–0,7 млрд тонн вуглекислого газу на рік. Весь споживаний водень в основному необхідний для технологічних процесів у хімії – для одержання аміаку та метанолу, а також у нафтопереробці та металургії. До 2030 року за оцінками МЕА очікується збільшення споживання водню цих галузях на 20–25 %. У той же час, декарбонізація цих напрямів – лише мала частка, основне споживання водню планується все-таки в енергетиці та транспорті.

Для централізованого виробітку електроенергії за допомогою водню можуть бути використані водневі турбіни, як це вже планується в Японії та Кореї. У світі, починаючи з 1970-х років, проводяться експерименти з додавання водню до природного газу для вироблення електроенергії. Компанія Mitsubishi Power розробляє турбіни, які можуть працювати на суміші з 30 % водню та 70 % природного газу, викиди парникових газів при використанні такої суміші знижуються на 10 % щодо використання чистого природного газу. Водневі турбіни є перспективною технологією, і великі машинобудівні компанії заявляють про плани створення агрегатів, що працюють на чистому водні, протягом 5–10 років.

Для розподіленого виробництва електроенергії за допомогою водню можна використовувати водневі паливні елементи (Fuel Cell). Наприклад, Південна Корея поставила за мету впровадити 2,1 ГВт паливних елементів у приватні будинки до 2040 р. Паливні елементи є пристроєм, схожим на електролізер, але зі зворотним принципом роботи. У паливний елемент подається водень та кисень, які реагують без горіння з утворенням води, електроенергії та/або тепла. ККД паливних елементів, що виробляють тільки електроенергію, досягає 70 %, а ККД пристроїв, що виробляють і електроенергію, і тепло, сягає 85 %. Паливні елементи не є новою технологією, але все ще мають значний потенціал для оптимізації.

Принцип роботи водневого транспорту схожий на електротранспорт, тільки в електротранспорті енергія зберігається в акумуляторі, а у водневому транспорті – у вигляді водню. Для живлення двигуна водень подається в

паливний елемент і перетворюється на електроенергію. Ці технології конкурують одна з одною, і їх поширення залежатиме від багатьох факторів, включаючи споживчі переваги, а також технологічну та економічну обґрунтованість їх застосування при вирішенні тих чи інших завдань. Наприклад, водень перед тими ж Li-ion накопичувачами в транспорті має переваги у вигляді більшої енергоємності на кг ваги (750 Вт/кг проти 250 Вт/кг) та більш швидкій зарядці (заправка воднем здійснюється за 2–3 хв.). Це може стати серйозним фактором для поширення водневих технологій саме у секторі вантажного та міжміського пасажирського транспорту.

Водневий бум

У світі за останні роки стався буквально «водневий бум», країни та окремі компанії почали одна за одною випускати стратегії та ініціювати проекти з виробництва та використання водню. Основний вектор розвитку водневих технологій – транспорт. У Європі з 2018 р. почали рух водневі потяги, використання яких за словами власників обходиться дешевше за електрифікацію залізничних колій на непопулярних напрямках. Великі автомобілебудівні компанії розпочали розробку або вже виробляють водневі автомобілі, вводиться дедалі більше водневих поїздів, а компанія Airbus представила концепт водневого літака. Китай та Японія встановили цілі в 0,8 та 1 млн. водневих автомобілів на дорогах до 2030 р., а Корея – 5,9 млн. до 2040 р.

У липні 2021 р. Європейська комісія оприлюднила низку пропозицій щодо скорочення шкідливих викидів в атмосферу. У ньому присутні положення, згідно з якими з 2035 року в ЄС не продаватимуться автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). Тобто акцент зроблено саме на розвиток електричної та водневої заправної інфраструктури.

Для розвитку водневого транспорту потрібна підтримка як на рівні окремих технологічних проектів, так і на рівні інфраструктури. Уряди країн Європи та АТР розробили заходи підтримки водневих проектів, які включають субсидії на купівлю та впровадження водневих технологій, податкові пільги для споживачів цих технологій, знижений тариф на водень чи сировину для його виробництва. Розміри цих субсидій у деяких країнах значні. Наприклад, у Кореї покупцям водневих автомобілів компенсується понад 50 % їх вартості.

Невирішені проблеми

Незважаючи на запуск великої кількості проектів, залишаються невирішеними дві ключові проблеми водневої енергетики – це транспорт та зберігання. Водень – самий енергоємний газ на кг ваги, але водночас один із найнеенергоємніших на одиницю об'єму, що робить транспортування водню складним і дорогим. Найбільш дешевою опцією для наземного транспортування водню на великі відстані поки що є трубопровідний

транспорт. Найкращою опцією для транспортування водню на короткі відстані є автомобільний транспорт. Водень може перевозитися в ємностях під тиском або в зрідженому вигляді, але ці технології вимагають значно більших об'ємів сховищ і транспортних засобів на одиницю енергетичного еквівалента в порівнянні з поточною структурою транспортування енергоносіїв.

Для транспортування водню морським транспортом можна використовувати технології зрідження водню або переведення в аміак. Технології зрідження водню схожі з технологіями ЗПГ, тільки вимагають нижчих температур (до $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) і більше транспортних засобів, так як в 1 м^3 зрідженого водню міститься половина енергетичного еквівалента м^3 зрідженого газу. Перспективний спосіб транспортування водню – аміак, оскільки його транспортування відбувається у рідкому вигляді. Але з усієї транспортованої маси аміаку лише близько 17 % маси становить водень, що також призводить до необхідності транспортування великої кількості продукту. При цьому для переведення аміаку у водень необхідно проводити дорогий крекінг аміаку, витрати на який пропорційні вартості «блакитного» водню.

У той же час при переході на концепцію водневої енергетики є опція відмови від транспортування водню. Водень можна споживати в місці виробництва і передавати енергію по тим самим ЛЕП, необхідно тільки організувати дешеве зберігання. Зберігання водню в ємностях під тиском або в зрідженому вигляді досить дороге заняття і підходить тільки для короткочасного зберігання. Для сезонного зберігання водню оптимальне рішення – використання спеціальних геологічних підземних формацій, наприклад, соляних печер. У Європі потенційна ємність таких сховищ становить 84,8 ПВт·год, але більшість їх перебуває на шельфі. Місткість соляних печер на суші та на віддаленні до 50 км від берега становить 7,3 ПВт·год, що відповідає приблизно трьом річним виробленням електроенергії в Європі.

Перелік питань для самоконтролю

1. Що таке «зелена енергетика» і які основні принципи її розвитку?
2. Назвіть основні види відновлювальних джерел енергії (ВДЕ).
3. Які переваги та недоліки має використання відновлюваних джерел у порівнянні з викопним паливом?
4. Яке місце займає зелена енергетика у світовому енергетичному балансі?
5. Поясніть принцип роботи сонячної батареї.
6. Які чинники впливають на ефективність сонячних панелей?
7. У чому полягає принцип роботи вітрової турбіни?
8. Які види біомаси використовуються для виробництва біоенергії?
9. Які переваги і недоліки гідроенергетики?
10. Чим геотермальна енергетика відрізняється від інших видів ВДЕ?
11. Чому водень вважається універсальним енергоносієм?
12. Назвіть основні методи виробництва водню.
13. Які існують проблеми зберігання та транспортування водню?
14. У яких галузях найактивніше використовується водень?
15. Які міжнародні проекти у сфері водневої енергетики вам відомі?
16. Які основні джерела викидів CO₂ у світі та в Україні?
17. У чому полягає технологія вловлювання та зберігання вуглецю (CCS)?
18. Які інструменти передбачає Паризька угода для зниження глобальних викидів?
19. Опишіть ключові цілі Європейського зеленого курсу.
20. Які національні програми діють в Україні у сфері зменшення вуглецевого сліду?

Перелік тестових завдань

1. Який із наведених видів енергії належить до відновлювальних?

- A) Ядерна
- B) Вуглецева
- C) Сонячна
- D) Нафтова

✓ **Відповідь: C**

2. Основна сировина для виробництва «зеленого» водню:

- A) Метан
- B) Вода
- C) Вугілля
- D) Біомаса

✓ **Відповідь: B**

3. Який процес лежить в основі парової конверсії метану?

- A) Окиснення азоту
- B) Розкладання вуглеводнів на водень і CO
- C) Електроліз води
- D) Фотосинтез

✓ **Відповідь: B**

4. До основних переваг вітрової енергетики належить:

- A) Високі експлуатаційні витрати
- B) Шкідливі викиди в атмосферу
- C) Відновлюваність ресурсу
- D) Залежність від імпорту палива

✓ **Відповідь: C**

5. Найбільші викиди CO₂ спостерігаються у секторі:

- A) Сільського господарства
- B) Транспорту
- C) Освіти
- D) Охорони здоров'я

✓ **Відповідь: B**

6. Яка країна є одним із лідерів у розвитку водневої енергетики?

- A) Польща
- B) Японія
- C) Канада
- D) Єгипет

✓ **Відповідь: В**

7. Технологія CCS використовується для:

- A) Видобутку вугілля
- B) Вловлювання і зберігання CO₂
- C) Збагачення урану
- D) Осушення ґрунтів

✓ **Відповідь: В**

8. Яка з програм спрямована на зменшення викидів у ЄС?

- A) Європейський зелений курс
- B) Паризька угода
- C) Програма «Східне партнерство»
- D) Стратегія NATO Green Tech

✓ **Відповідь: А**

9. Біометан — це:

- A) Вископне паливо
- B) Побічний продукт фотосинтезу
- C) Газ, отриманий із біомаси
- D) Рідке паливо з нафти

✓ **Відповідь: С**

10. Який із напрямів НЕ належить до шляхів зменшення вуглецевого сліду:

- A) Використання ВДЕ
- B) Енергоефективність
- C) Збільшення споживання нафти
- D) Вловлювання CO₂

✓ **Відповідь: С**

Рекомендована література

1. Барило А. А., Бенменні М., Будько В. І. та ін. *Відновлювальні джерела енергії: монографія*. Київ: Національна академія наук України, Інститут відновлюваної енергетики. 2020. 392 с.
2. Дячук О. В., Кудря С. О. *Воднева енергетика: сучасний стан і перспективи розвитку в Україні*. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2023. 198 с.
3. Ma J., Li L., Wang H., Du Y., Ma J., Zhang X., Wang Z. *Carbon Capture and Storage: History and the Road Ahead*. Eng. 2022. Vol. 14, N 7. P. 33–43.
DOI: 10.1016/j.eng.2021.11.024
6. Dubey A., Arora A. *Advancements in carbon capture technologies: A review*. J. Clean. Prod. 2022. Vol. 373. An 133932. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133932
7. Yue M., Lambert H., Pahon E., Roche R., Jemei S., Hissel D. *Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges*. Renew. Sustain. Energy Rev. 2021. Vol. 146. An 111180.
DOI: 10.1016/j.rser.2021.111180
8. Wilberforce T., Olabi A. G., Sayed E. T., Elsaid K., Abdelkareem M. A. *Progress in carbon capture technologies*. Sci. Total Environ. 2021. Vol. 761. An 143203. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143203
9. Abe J. O., Popoola A. P. I., Ajenifuja E., Popoola O. M. *Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation*. Int. J. Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44, N 29. P. 15072–15086. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.068
10. Raza A., Gholami R., Rezaee R., Rasouli V., Rabiei M. *Significant aspects of carbon capture and storage – A review*. Pet. 2019. Vol. 5, N 4. P. 335-340.
DOI: 10.1016/j.petlm.2018.12.007

Електронні інформаційні ресурси

1. Національна бібліотека ім. В. І. Вернадського. <http://nbuv.gov.ua>
2. Наукова бібліотека ОНУ. <http://library.onu.edu.ua>
3. Спеціальності та освітні програми факультету хімії та фармації. <http://chempharm.onu.edu.ua/pro-fakultet/spetsialnosti-ta-osvitni-prohramy>
4. Інформаційний ресурс Scopus. www.elsevier.com/scopus
5. Інформаційний ресурс Web of Science. <https://mjl.clarivate.com/home>
6. Міністерство енергетики України. Офіційний сайт: <https://mev.gov.ua>
7. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності). <https://saee.gov.ua>
8. International Energy Agency (IEA): Reports and data on renewable and hydrogen energy. <https://www.iea.org>

9. European Commission – Energy: Green Deal and climate neutrality policy.
<https://energy.ec.europa.eu>
10. Hydrogen Europe: Association for European Hydrogen and Fuel Cell industry.
<https://hydrogeneurope.eu> IRENA (International Renewable)

Навчальне видання

ШЛЯХИ УСУНЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ВОДНЕВА ЕНЕРГЕТИКА

ЕЛЕКТРОННІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
спеціальності ЕЗ Хімія, ОНП Хімія

Електронне практичне видання

Укладачі:

**Хома Руслан Євгенійович
Беньковська Тетяна Сергіївна**

В авторській редакції

Затв. авт. 12.04.2026. Шрифт Times New Roman.
Системні вимоги: операційна система сумісна з програмним забезпеченням
для читання файлів формату PDF.
Обсяг 1,1 МБ. Зам. № 3139.

Видавець:

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
вул. Змієнка Всеволода, буд. 2, м. Одеса, 65082, Україна
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 8592 від 23.03.2026 р.
Тел.: (048) 723 28 39, e-mail: druk@onu.edu.ua