

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ,  
ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА ЕКОЛОГІЇ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ Тамара ДУДАР  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИЦІ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 101 «ЕКОЛОГІЯ»  
ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ  
«ЕКОЛОГІЯ ТА ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА»

**Тема: «Екологічні аспекти конверсії парникових газів на  
прикладі фотокаталізу CO<sub>2</sub>»**

Виконавець: здобувачка групи ЕК - 201М Дейнека Каріна Сергіївна  
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: д.т.н., проф. Тихенко Оксана Миколаївна  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультант розділу «Охорона праці»: \_\_\_\_\_ Катерина  
КАЖАН (підпис)  
(П.І.Б.)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ Андріан  
ЯВНЮК

(підпис)

(П.І.Б.)

КИЇВ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет екологічної безпеки, інженерії та технологій  
Кафедра екології  
Спеціальність, освітньо-професійна програма: спеціальність 101  
«Екологія»,  
ОПП «Екологія та охорона навколишнього середовища»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри  
Тамара ДУДАР  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на виконання кваліфікаційної роботи**  
Дейнеки Каріни Сергіївни

1. Тема роботи: «Екологічні аспекти конверсії парникових газів на прикладі фото каталізу CO<sub>2</sub>», затверджена наказом ректора від 10.07.2023 р. № 1096/ст.
2. Термін виконання роботи: 02.10.2023 р. по 25.12.2023 р.
3. Вихідні дані до роботи: методичні матеріали, літературні джерела за напрямом дослідження, нормативно – правові документи.
4. Зміст пояснювальної записки: 73 с., 12 рис., 1 табл., 41 літературних джерел.
5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстраційного) матеріалу: рисунки, гістограми, таблиці.

## 6. Календарний план-графік

з/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1	Отримання завдання, пошук літературних джерел по темі, напрацювання методології роботи	02.10.2023	
2	Огляд літературних джерел та законодавчих нормативно-правових актів щодо декарбонізації довкілля	03.10.2023– 06.10.2023	
3	Визначення завдань та розроблення плану виконання кваліфікаційної роботи	09.10.2023	
4	Складання літературного огляду за темою дослідження	10.10.2023– 16.10.2023	
5	Аналіз результатів експериментальних досліджень Фото каталітичного процесу конверсії CO <sub>2</sub>	17.10.2023– 15.11.2023	
6	Формулювання висновків і рекомендацій	16.11.2023	
7	Підготовка до доповіді та презентації кваліфікаційної роботи	17.11.2023– 22.11.2023	
8	Попередній захист кваліфікаційної роботи	23.11.2023 15.12.2023	
9	Оформлення кваліфікаційної роботи згідно вимог діючих стандартів	02.10.2023– 03.10.2023	
10	Захист кваліфікаційної роботи	25.12.2023	

## 7. Консультація з окремого(мих) розділу(ів);

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Катерина КАЖАН	05.11.2023	22.11.2023

8. Дата видачі завдання: «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи (проекту): \_\_\_\_\_ Оксана ТИХЕНКО  
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання: \_\_\_\_\_ Каріна ДЕЙНЕКА  
(підпис випускника) (П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: «Екологічні аспекти конверсії парникових газів на прикладі фотокаталізу CO<sub>2</sub>» містить 73 с., 12 рис., 1 табл., 41 літературних джерел.

Об'єкт дослідження: є конверсія парникових газів в органічні хімічні сполуки.

Мета роботи: полягає в дослідженні та вивченні методів фотокаталітичного процесу конверсії CO<sub>2</sub> від парникового газу до органічних сполук.

Методи дослідження: аналіз, статистична обробка результатів досліджень, узагальнення.

Практичне значення роботи полягає в тому, що робота спрямована на зменшення негативного впливу людської діяльності на довкілля та зміну клімату.

ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ, ФОТОКАТАЛІЗ, ПАРНИКОВІ ГАЗИ, ЗМІНА КЛІМАТУ, ВУГЛЕЦЕВИЙ СЛІД, КАТАЛІЗАТОРИ, ОРГАНІЧНІ РЕЧОВИНИ, ВУГЛЕЦЕВИЙ ЦИКЛ, ЕКОЛОГІЧНА СТІЙКІСТЬ.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ .....</b>	<b>7</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ГЛОБАЛЬНОЇ КОНЦЕПЦІЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ДОВКІЛЛЯ.....</b>	<b>12</b>
1.1. Поняття декарбонізації доквілля .....	12
1.2. Наслідки викидів CO <sub>2</sub> та їх вплив на клімат.....	15
1.3. Основні тренди декарбонізації .....	19
1.4. Нормативно – правова база реалізації політики декарбонізації .....	24
1.5. Механізм CORSIA, як метод досягнення декарбонізації в авіаційній галузі .....	31
1.6. Висновки до розділу.....	38
<b>РОЗДІЛ 2. КОНВЕРСІЯ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ФОТОКАТАЛІЗУ CO<sub>2</sub> .....</b>	<b>40</b>
2.1. Фотокаталіз, як метод конверсії парникових газів.....	40
2.2. Природний фотокаталіз .....	43
2.3. Штучний фотокаталіз.....	43
2.4. Висновки до розділу.....	45
<b>РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>47</b>
3.1. Обґрунтування вибору каталізаторів .....	47
3.2. Фактори, що впливають на фотокаталітичні властивості TiO <sub>2</sub> .....	50
3.3. Особливості технології штучного фотосинтезу для декарбонізації доквілля .....	52
3.4. Висновки до розділу.....	53
<b>РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ФОТОКАТАЛІТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ CO<sub>2</sub> З УТВОРЕННЯМ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН.....</b>	<b>54</b>
4.1. Результати фотокаталітичного перетворення CO <sub>2</sub> зі зразком анатазу .....	54
4.2. Результати фотокаталітичного перетворення CO <sub>2</sub> зі зразком рутилу .....	57

4.3. Перспективи використання утворених продуктів фотокаталізу .....	58
4.4. Висновки до розділу.....	61
<b>РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....</b>	<b>62</b>
5.1. Аналіз шкідливих та небезпечних чинників для працівника.....	62
5.2. Розробка інструкції з охорони праці в лабораторії екологічної хімії при роботі з хроматографом .....	63
5.3. Пожежна безпека.....	64
5.4. Висновки до розділу.....	67
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>68</b>
<b>СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ...</b>	<b>70</b>

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

ГДК – Гранично допустима концентрація;

НПС – Навколишнє природне середовище;

ВДЕ – Відновлювальні джерела енергії.



## ВСТУП

### *Актуальність теми.*

В сучасному світі, зміна клімату та зростаючий вміст парникових газів у атмосфері стали однією з найважливіших та найгостріших екологічних проблем. Глобальне потепління, підвищення рівня морів, інтенсивність стихійних лих та інші наслідки зміни клімату вже зараз відчутні на всій планеті.

Один з основних парникових газів, що сприяє цим змінам, - це діоксид вуглецю ( $\text{CO}_2$ ), який виробляється внаслідок діяльності людини, такої як викиди від транспорту, промисловість, та вживання енергії з використанням вуглеводнів. Тому пошук способів зниження вмісту  $\text{CO}_2$  у атмосфері та його конверсії в корисні речовини стає надзвичайно важливим завданням для охорони довкілля та збереження нашої планети для майбутніх поколінь.

Одним із інноваційних методів конверсії  $\text{CO}_2$  є фотокаталіз вуглекислого газу, який використовує сонячне або штучне світло для стимулювання хімічних реакцій, що перетворюють  $\text{CO}_2$  в корисні продукти, такі як палива або хімічні сполуки. Цей метод пропонує нові можливості для зменшення викидів  $\text{CO}_2$  та розвитку "зелених" технологій.

Зміна клімату і проблеми навколишнього середовища стали глобальними питаннями, які привертають увагу громадськості, урядів і бізнесу.

Актуальність полягає в тому, що дана тема об'єднує в собі кліматичні та екологічні проблеми, технологічний прогрес і можливість сприяти створенню більш сталого та екологічно чистого світу.

Фотокаталітичне перетворення вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) в органічні речовини є багатообіцяючим підходом до зменшення викидів парникових газів і виробництва корисних хімічних речовин. Процес передбачає використання фотокаталізатора для поглинання енергії світла та активації  $\text{CO}_2$ , що призводить до утворення нового хімічного продукту.

Однією з головних проблем фотокаталітичної конверсії CO<sub>2</sub> є досягнення високої селективності для конкретного продукту при мінімізації утворення побічних продуктів. Цього можна досягти шляхом ретельного вибору фотокаталізатора та умов реакції, таких як температура, тиск і тип відновника.

Загалом, фотокаталітичне перетворення CO<sub>2</sub> на органічні речовини має потенціал стати стійким і ефективним підходом до скорочення викидів парникових газів і виробництва певних хімічних продуктів. Однак необхідні додаткові дослідження для оптимізації процесу та збільшення виробництва для комерційних застосувань.

Робота з фотокаталітичною конверсією CO<sub>2</sub> є важливою та актуальною з кількох причин:

1. CO<sub>2</sub> є головним джерелом зміни клімату, і його перетворення за допомогою фотокаталізу може допомогти зменшити кількість CO<sub>2</sub> в атмосфері та пом'якшити наслідки зміни клімату.

2. Утворення органічних речовин з CO<sub>2</sub> може зменшити залежність від викопного палива та інших невідновлюваних ресурсів, що робить його сталим підходом для хімічного синтезу.

3. Фотокаталітичне перетворення CO<sub>2</sub> є підходом екологічної хімії, оскільки воно використовує світлову енергію та відновлювану сировину без утворення шкідливих побічних продуктів або відходів.

4. Перетворення CO<sub>2</sub> на органічні речовини може створити нові економічні можливості та створити джерела доходу, особливо в новій галузі уловлювання та використання вуглецю.

5. Вивчення фотокаталітичного перетворення CO<sub>2</sub> вимагає розробки нових матеріалів, каталізаторів і реакційних систем, що може призвести до наукового прогресу в галузі матеріалознавства та каталізу.

***Мета і завдання виконання кваліфікаційної роботи.***

***Мета роботи*** полягає в дослідженні та вивченні методів фотокаталітичного процесу конверсії CO<sub>2</sub> від парникового газу до органічних сполук.

Основою задачею є розробка ефективних і стійких методів перетворення

CO<sub>2</sub> в органічн речовини з використанням фотокаталітичних матеріалів. Дана робота потрібна для того, щоб вирішити проблему скорочення викидів парникових газів і виробництва цінних хімічних речовин з використанням відновлюваних ресурсів і принципів екологічної хімії.

Зокрема, мета полягає в тому, щоб визначити нові фотокаталізатори та умови реакції, які можуть покращити селективність, ефективність і стабільність процесу перетворення CO<sub>2</sub>, що призведе до більш високого виходу органічних речовин з мінімальними побічними продуктами або відходами. Це вимагає фундаментального розуміння механізмів реакції та розробки нових каталізаторів, які можуть ефективно використовувати енергію світла для активації CO<sub>2</sub>.

***Завдання роботи:***

1. Визначити особливості глобальної концепції декарбонізації довкілля.
2. Обґрунтувати механізм застосування CORSIA для декарбонізації в авіаційній галузі.
3. Охарактеризувати особливості конверсії парникових газів за допомогою фотокаталізу CO<sub>2</sub>.
4. Визначити ефективність фотокаталізу у конверсії CO<sub>2</sub>.
5. Обґрунтувати екологічні аспекти фотокаталізу CO<sub>2</sub> та визначити можливості використання для зменшення викидів парникових газів.
6. Сформулювати рекомендації щодо подальших досліджень у цій області та можливості впровадження фотокаталізу CO<sub>2</sub> на практиці.

***Об'єкт дослідження*** – є конверсія парникових газів в органічні хімічні сполуки.

***Предмет дослідження*** – є фотокаталітичне перетворення вуглекисло гогазу.

***Методи дослідження*** – аналіз, статистична обробка результатів досліджень, проведення експерименту в лабораторних умовах, узагальнення.

***Особистий внесок випускника:*** було опрацьовано відповідні наукові джерела та визначено особливості проведення та використання фотокаталізу CO<sub>2</sub>; визначені основні хімічні речовини, які утворюються після проведення експеременту;

проаналізовано екологічні наслідки застосування утворених хімічних речовин для довкілля.

**Апробація отриманих результатів:** результати кваліфікаційної роботи доповідались на: XXIII Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки», XVII Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Екологічна безпека держави, Міжнародній науково-практичній конференції за участю молодих науковців «Галузеві проблеми екологічної безпеки – 2023».

**Публікації:**

1. Дейнека К.С., Тихенко О. М. *Дослідження швидкості процесу фотосинтезу рослин при зміні концентрації CO<sub>2</sub>*: XVII всеук. наук.-практ. конф., м. Київ, 20 квіт. 2023 р., Київ, 2023. С. 69-70.

2. Дейнека К.С., Тихенко О. М. *Еколого – фізіологічні аспекти реакцій рослин на зміну концентрації CO<sub>2</sub> в повітрі*: XXIII міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 4-6 квіт. 2023 р., Київ, 2023. С. 76-77.

3. Тихенко О., Дейнека К. *Екологічні аспекти використання технології штучного фотосинтезу для декарбонізації довкілля*. Екологічна безпека та природокористування. Т. 47, № 3. С. 39–48.

4. Oksana Tykhenko, Karina Deineka. *Ecological features of greenhouse gas conversion using the example of CO<sub>2</sub> photocatalysis*. Галузеві проблеми екологічної безпеки міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 26 жовт. 2023 р., Київ, 2023. С. 10-12.

# РОЗДІЛ 1

## ОСОБЛИВОСТІ ГЛОБАЛЬНОЇ КОНЦЕПЦІЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ДОВКІЛЛЯ

### 1.1. Поняття декарбонізації довкілля

Декарбонізація — це стратегічне скорочення викидів вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), спричинених діяльністю людини, для боротьби із серйозними наслідками глобального потепління. Ці зусилля вимагають у всьому світі відмови від викопного палива, включаючи нафту, вугілля та газ.

Основними прикладами методів декарбонізації є:

1. ініціатива обмеження видобутку корисних копалин, основні положення, що базуються на розрахунках міжнародних експертів, які вважають, що для уповільнення глобального потепління необхідно до 2030 року скоротити видобуток вугілля (61%), нафти (36%) і природного газу (32%) [1, 2];

2. відмова від двигунів внутрішнього згорання. Зменшення перевезень транспортних засобів на основі двигунів внутрішнього згорання підтримується членами Альянсу з декарбонізації транспорту та Альянсу з нульовими викидами транспортних засобів, які об'єднують понад 20 країн. Згідно з аналізом відкритих даних, до 2025 року частка продажів нових автомобілів з двигунами внутрішнього згорання знизиться до 23%. Пропорційно до цього знизиться і попит на продукти нафтопереробки [3, 4];

3. технологія прямого захоплення повітря (Direct-Air-Capture, DAC), що заснована на вилученні  $\text{CO}_2$  з атмосфери за допомогою гігантських пирососів. Фільтруючий матеріал містить аміни – спеціальні хімічні речовини, які вловлюють вуглекислий газ [5];

4. штучний фотосинтез – це процес використання штучних систем для виробництва енергії з використанням сонячного світла. Штучний фотосинтез відбувається подібно до природного фотосинтезу в рослинах [6]. Технологія

штучного фотосинтезу для рециклінгу CO<sub>2</sub> у органічні сполуки має потенціал для зменшення викидів парникових газів та скорочення використання викопних палив. Однак, перед впровадженням у промисловий процес необхідно вдосконалення каталізаторів, оптимізація енергетичної ефективності та розв'язання практичних технічних проблем.

У колективних зусиллях, 195 Країни ратифікували Паризьку угоду 2015 року, зобов'язавшись стримати підвищення глобальної температури нижче 2°C відносно доіндустріального рівня до 2100 року. Однак перегляд ООН 2018 року IPCC запропонував більш жорстку ціль, встановивши поріг на рівні 1,5°C. Вони попередили, що навіть підвищення температури на 2°C може становити значні ризики.

Досягнення переглянутого ліміту на 1,5°C потребує глобального скорочення викидів 45% до 2030 року та досягнення чистого нуля до 2050 року. Це означає щорічне глобальне скорочення приблизно на 7,6%.

Однак ми дуже далекі від досягнення цих температурних обмежень. Програма ООН з навколишнього середовища (ЮНЕП) Розрив викидів 2021 року звіт вказує на протверезну реальність. Навіть якщо всі поточні зобов'язання щодо викидів і політики будуть виконані, ми на шляху до підвищення температури на 2,7°C до кінця століття.

Перехід нашої економічної інфраструктури та технологій від викопного палива є серйозним викликом, але цілком досяжним. Однак ефективність цього зрушення значною мірою залежить від нашої колективної рішучості, як суспільної, так і політичної. Це очевидно, коли ми розглядаємо корпоративний ландшафт: тільки 45% компаній FTSE пообіцяли досягти нульових викидів до 2050 року. Більше занепокоєння викликає те, що серед них 84% не мають надійного плану виконання своїх зобов'язань. Щоб забезпечити стабільне майбутнє, вкрай важливо, щоб наміри узгоджувалися з дієвими стратегіями.

Досягнення декарбонізації вимагає об'єднаних зусиль бізнесу, споживачів і політичних лідерів. Основним кроком для будь-якої організації є визначення основних джерел викидів CO<sub>2</sub>.

В 2022 році Глобальні викиди вуглекислого газу можна віднести до таких секторів:

- споживання енергії в промисловості (24,2%);
- транспорт (16,2%);
- споживання енергії в будівлях (17,5%);
- згоряння палива (7,8%);
- неконтрольовані викиди від виробництва енергії (5,8%);
- споживання енергії в сільському господарстві (1,7%);
- прямі промислові процеси (5,2%);
- відходи (3,2%);
- сільське господарство, лісове господарство та використання (18,4%).

Декарбонізація вимагає як технологічних інновацій, так і суспільного переходу від технологій, що залежать від викопного палива. Оскільки ці сектори тісно пов'язані між собою, трансформація в одному незмінно впливатиме на інші, підкреслюючи необхідність цілісного підходу.

Траєкторія глобального потепління, що насувається, створює не тільки жахливу екологічну загрозу, але й серйозний економічний виклик. Це ставить під загрозу мільйони життів і мільярди будинків, а також ставить під загрозу трильйони доларів світової економіки. Продовжувати нашу залежність від викопного палива без потужного руху до декарбонізації не тільки етично сумнівно, але й економічно нежиттєздатно.

Більш детальний аналіз цифр показує тривожну статистику. За даними консалтингової компанії Moody's, приблизно 54 трильйонів доларів США витрат пов'язано з поточними прогнозами потепління на основі існуючих зобов'язань країни. Якщо ці обіцянки не будуть виконані, ці витрати можуть різко зрости до 69 трильйонів доларів.

У звіті МГЕЗК про адаптацію 2022 року підкреслюється, що майже 40% населення світу вразливе до ризиків зміни клімату. Це означає, що мільярди людей можуть зіткнутися з п'ятикратним збільшенням частоти повеней, штормів, посух і хвиль спеки без швидкої декарбонізації.

Очікується, що в найближчі десятиліття кількість загиблих від цих ударів стане ще більшою. Всесвітня організація охорони здоров'я оцінює додаткові 250 000 смертей щорічно між 2030 і 2050 роками, якщо ми не зможемо декарбонізувати нашу економіку через тепловий стрес, недоїдання та інші проблеми зі здоров'ям.

Ще одне занепокоєння викликає підвищення рівня моря з потенційним переміщенням до 10 мільйонів людей на кожні 10-сантиметрове підвищення рівня прибережної води. Різниця між підвищенням глобальної температури на 1,5°C і 2°C може призвести до підвищення рівня моря на 48 до 56 сантиметрів.

Крім того, зараз йдуть сильні опади 30% більш імовірно, що відбуватиметься кожне десятиліття порівняно з доіндустріальними часами. Ця ймовірність зростає до 50% при потеплінні на 1,5°C і стрибає до 70% при 2°C.

Ці цифри підкреслюють значні наслідки кожного підвищення температури на півградуса, включаючи дефіцит води, бідність, швидке зникнення видів, збої в ланцюзі поставок і системні економічні ризики.

## **1.2. Наслідки викидів CO<sub>2</sub> та їх вплив на клімат**

Зміна клімату — це одна з найбільш нагальних проблем, які стикається наша планета в сучасному світі. Ця зміна включає в себе збільшення концентрації парникових газів в атмосфері, що призводить до глобального потепління. Глобальне потепління, в свою чергу, спричиняє екстремальні погодні умови, які мають серйозні наслідки для нашої планети та суспільства

Під впливом промислового розвитку та збільшення викидів парникових газів в атмосферу, планета Земля зішла на шлях, який відзначається глобальним потеплінням і кліматичними змінами. Недекарбонізація довкілля, тобто відсутність серйозних заходів для скорочення викидів CO<sub>2</sub> і інших шкідливих газів, має серйозні наслідки для нашої планети, нашого клімату та навколишнього середовища.

Однією з найважливіших наслідків недекарбонізації є зміна клімату. Збільшення концентрації парникових газів в атмосфері призводить до глобального



потепління. Це, в свою чергу, спричиняє екстремальні погодні умови, такі як засухи, повені, гарячі хвилі та інші кліматичні катастрофи. Засухи можуть призводити до втрат врожаю та загрожувати доступу до питної води. Повені можуть призводити до руйнувань і втрат життя. Гарячі хвилі можуть бути небезпечними для здоров'я людей і тварин.

В атмосфері сьогодні концентрація вуглекислого газу на 50% вища, ніж у попередні доіндустріальні роки, що продемонстровано на рисунку 1.2. Викиди парникових газів продовжують зростати, але цей ріст менш інтенсивний, ніж на початку 2000-х років. Згідно з звітом Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК), за останнє десятиліття зростання викидів склало 1,1% щорічно, що є помітно менше, ніж у попередньому десятиріччі з 2000 по 2009 роки, коли цей показник становив 2,6% [7].

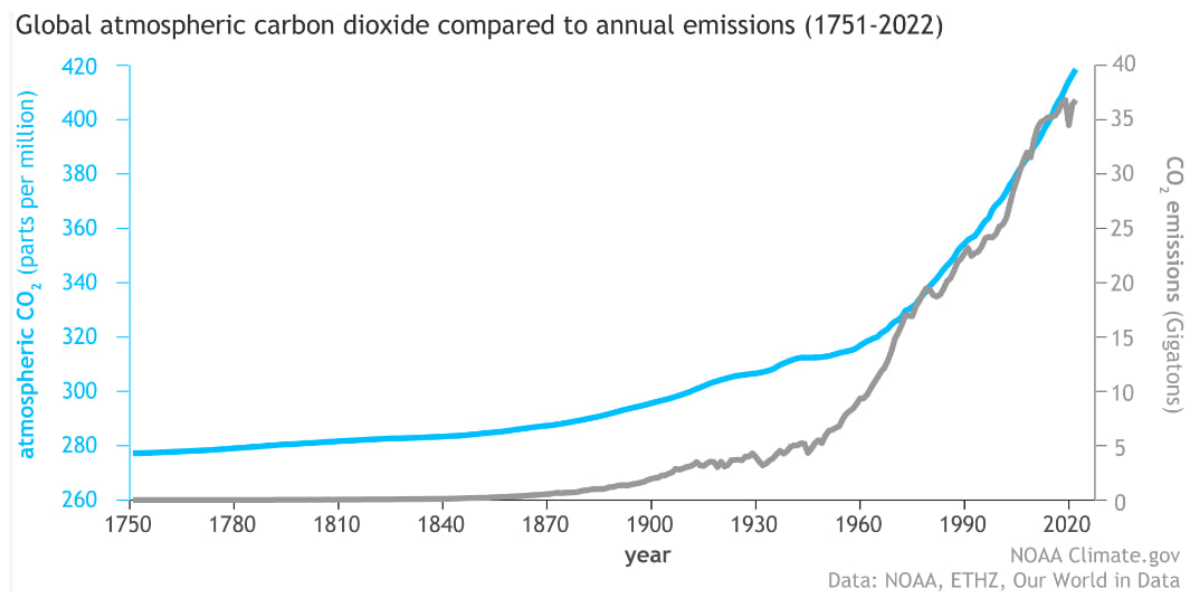


Рис. 1.2. Концентрація вуглекислого газу в атмосфері з 1751-2022 р.

Пандемія COVID-19 спричинила рекордне щорічне скорочення глобальних викидів вуглецю в 2020 році, зменшившись на 5,4% (1,9 ГтСО<sub>2</sub>) порівняно з 2019 роком. Однак це падіння було недовгим, про що свідчать глобальні викиди СО<sub>2</sub>, які у 2021 році відновилися майже до допандемічного рівня, збільшившись на 6,3%. Враховуючи короткий термін для досягнення міжнародних кліматичних цілей і,

отже, обмеження антропогенного потепління до 1,5 або 2 °С, детальне відстеження глобальних викидів у реальному часі має вирішальне значення.

У 2022 році глобальні викиди CO<sub>2</sub> від спалювання викопного палива та виробництва цементу досягли  $36,1 \pm 0,3$  Гт CO<sub>2</sub>. Для порівняння, викиди становили 35,3, 33,4 і 35,5 Гт CO<sub>2</sub> у 2019, 2020 і 2021 роках відповідно, що відображає зростання в 2022 році на 2,0%, 7,9% і 1,5% порівняно з тими роками [8].

У 2022 році викиди парникових газів склали 57,8 гігатон. Загальні викиди парникових газів з 1850 року становлять 3111,8 гігатон. Основною частиною є вуглекислий газ, який у 2022 році викинуто в атмосферу на 36,1 гігатони. Це на 1,5% більше, ніж у 2021 році, на 7,9% більше, ніж у 2020 році і на 2% більше, ніж у 2019 році.

На платформі WORLD EMISSIONS CLOCK [9], можна переглянути дані про обсяги парникових газів у вигляді інтерактивної графіки, сортуючи за роками, країнами і секторами економіки.

Для зменшення викидів та уникнення небезпечних наслідків зміни клімату необхідно внести зміни в різних сферах світової економіки, включаючи виробництво енергії, транспорт, промисловість, будівництво, сільське господарство та землекористування. Викиди вуглекислого газу та інших парникових газів утворюються в цих галузях і вимагають декарбонізації.

Також одним з найвідчутніших наслідків глобального потепління є засухи. Збільшення температури та переносу опадів призводить до того, що регіони, які раніше були вологою і плідними, стають сухими і безплідними. Сільське господарство стає вкрай вразливим перед засухами, які можуть призвести до втрат врожаю та голоду

Висихання водних джерел: Засуха призводить до висихання річок, озер і водосховищ, що впливає на водні екосистеми. Це може шкодити водним рослинам та тваринам, впливаючи на біорізноманіття. Водні екосистеми особливо вразливі до засухи.

Також засуха зменшує доступність прісної води для тварин і рослин. Це може призвести до зменшення чисельності популяцій. Багато видів стають більш вразливими через втрату доступу до води.

Ще один негативний вплив збільшення температури це збільшення конкуренції між рослинами і тваринами за обмежені ресурси, такі як вода та їжа. Це може призвести до зміни в структурі екосистеми та взаємних відносинах між видами. В лісах засуха збільшує ризик лісових пожеж, що може шкодити лісовим екосистемам. Вогонь може призвести до загибелі дерев та зміни структури екосистеми, впливаючи на біорізноманіття.

Не можна також забути про ґрунтові екосистеми. Засуха зменшує вологість ґрунту та умови для життя бактерій та інших мікроорганізмів у ґрунті. Це може вплинути на процеси розкладання органічної речовини та цикли поживних речовин.

Танення льодовиків і розплавлення льодового покриву на Антарктиці і Гренландії призводять до підвищення рівня моря та загрожує прибережним районам та островам. Багато мегаполісів і тисячі громадських будівель розташовані в прибережних зонах, і підвищення рівня моря може призвести до затоплення значної частини цих територій.

Зміни в Арктиці стали помітні уже в 80-х роках, але тоді було невідомо, чи є це результатом природної мінливості чи сигналом зміни клімату, спричиненої людською діяльністю. Проте до середини 90-х стало очевидним, що швидке потепління на північному полюсі є сигналом зміни клімату, спричиненою людською діяльністю. З 1990 року Арктика нагрівалася в 2-4 рази швидше, ніж решта світу, залежно від регіону та пори року.

Надзвичайне потепління в Арктиці має подальші наслідки для природи та клімату. Відзначається збільшення частоти та інтенсивності лісових пожеж у високих широтах Північної півкулі з 1980-х років. Вічна мерзлота, яка охоплює значну частину регіону, розмерзає, що призводить до викиду в атмосферу вуглекислого газу та метану. Це танення вічної мерзлоти може вивільнити в атмосферу від 300 до 600 мільйонів тонн вуглецю щороку, що сприяє зміні клімату.

Помітний також різкий спад площі морського льоду на північному полюсі, особливо влітку. Лише в липні 2022 року розмір морського льоду зменшився на 2,86 мільйони квадратних кілометрів, що прирівнюється до площі Аргентини. Це впливає на клімат, рівень моря та біорізноманіття [10].

Підняття рівня моря вже стало реальністю, призводячи до затоплення прибережних територій і загрози містам та природним екосистемам. Україна теж відчуває ці зміни, включаючи затоплення міських і сільських районів, втрати ресурсів та збільшення кліматичних біженців.

Глобальне потепління має значний вплив на здоров'я людей, призводячи до різних негативних наслідків. Один із прикладів - збільшення частоти та інтенсивності теплових хвороб. Екстремальні температури можуть сприяти тепловим ударам, що призводить до симптомів, таких як нудота, головний біль та навіть сонячний удар.

Потепління також збільшує ризик серцевих захворювань через вплив на кровообіг та артерії. Респіраторні захворювання, такі як астма, можуть загострюватися через забруднення повітря, що стає більш поширеним при глобальному потеплінні.

Зміни в кліматі можуть також сприяти поширенню векторних хвороб, таких як малярія та віруси, які передаються комарами, створюючи загрозу для населення.

Крім фізичних наслідків, глобальне потепління може викликати психічний стрес та проблеми з психічним здоров'ям внаслідок екстремальних погодних умов.

Загальна тенденція до погіршення здоров'я через глобальне потепління свідчить про важливість адаптації до цих змін та прийняття стратегій для зменшення емісії парникових газів у світовому масштабі.

### **1.3. Основні тренди декарбонізації**

Альтернативна енергетика стає все важливішим аспектом урбанізаційних процесів і визначає декарбонізацію економіки. На початок 2021 року понад 40 міст вже забезпечують свої потреби в електроенергії з відновлюваних джерел. Також

багато населених пунктів у Великобританії об'єдналися в консорціум "UK100" зі схожою метою [11]. За останні п'ять років в Європейському Союзі склад енергобалансу суттєво змінився: частка вугільної та атомної генерації зменшилась на 20 % і 10 % відповідно, в той час як виробництво електроенергії з природного газу зменшилося незначно - лише на 4%. Процент виробництва електроенергії з відновлюваних джерел зріс, призводячи до зменшення викидів CO<sub>2</sub> на 317 грамів на кіловат-годину до 226 грамів на кіловат-годину. У результаті електроенергія в Європейському Союзі стала на 30% чистішою порівняно з 2015 роком. Всі ці дані свідчать про напрямок політики енергетичного переходу Європейського Союзу. Одночасно, Китай інтенсивно збільшує потужності ВДЕ, що дозволило знизити частку вугілля у енергобалансі з 68% до 56% протягом 10 років [12].

Коронавірусна криза не завадила іншим країнам світу активно розвивати сектор альтернативної енергетики. Наприклад, влада Індії визнала пандемію COVID-19 форс-мажором і продовжила будівництво нових електростанцій з державною підтримкою. Аналогічні заходи були прийняті в Німеччині та США. Деякі країни, такі як Греція та В'єтнам, змінили свої підходи до ліцензування виробників ВДЕ і зелених тарифів. Іспанія та Франція підтримують виробників біогазу, а Хорватія стимулює розвиток когенераційних технологій. Розвиток альтернативної енергетики впливає на діяльність провідних нафтогазових компаній, таких як Equinor та Repsol, які планують досягти нульових викидів попутного нафтового газу на свердловинах протягом найближчих 10 років і збільшити потужності "зеленої" генерації до 12 ГВт [13].

На появу міжнародних "зелених" сертифікатів (I-REC) вплинули низьковуглецеві ініціативи. Ці сертифікати використовуються для відстеження переміщень електроенергії, виробленої з альтернативних джерел, але залишаються обмежені сектором ВДЕ і не надають фінансових стимулів для АЕС та ГЕС.

Ініціатива обмеження видобутку корисних копалин, зокрема передбачена у «Lofoten Declaration» і ґрунтується на розрахунках міжнародних експертів, які вважають, що для уповільнення глобального потепління

"Декларація Лофотен" передбачає обмеження видобутку корисних копалин з метою боротьби з глобальним потеплінням. Міжнародні експерти розрахували, що до 2030 року потрібно зменшити видобуток вугілля на 61%, нафти на 36% і природного газу на 32%. Десять країн, включаючи Данію, Іспанію і Францію, вже оголосили про свої плани обмежити видобуток корисних копалин. "Oil and Gas Climate Initiative," в який об'єдналося 12 нафтовидобувних компаній, планує зменшити вуглецеві викиди на 9% до 2025 року [14].

Компанії, що не входять до цього консорціуму, самостійно встановлюють стратегічні цілі для досягнення вуглецевої нейтральності. Наприклад, італійська компанія Ені планує досягти повної декарбонізації виробничих процесів шляхом розширення встановлених потужностей ВДЕ та впровадження технологій зберігання діоксиду вуглецю.

Посилення кліматичної політики в сфері видобувної промисловості очікувано вплине на ресурсні ринки, зокрема на індикативи вартості низьковуглецевих вуглеводнів. Деякі компанії, як Pioneer Natural Resources і Chevron, вже приступили до модернізації технологічних процесів з метою зменшення викидів парникових газів і розвитку термоядерного синтезу.

Також спостерігається переорієнтація гірничодобувних підприємств, як приклад, компанія BHP Group замість видобутку вугілля переходить до видобутку міді та нікелю.

Для досягнення кліматичних цілей, пряма утилізація діоксиду вуглецю є ефективним способом. Експерти ООН також підтримують цей підхід, який може сприяти швидшій декарбонізації виробництва електроенергії та інших енергоємних галузей. На жаль, за даними Міжнародного енергетичного агентства, на початок 2021 року було реалізовано всього 50 комерційних проектів з вловлювання, використання та зберігання діоксиду вуглецю з загальним бюджетом близько \$5 млрд. Вартість операцій з вловлювання залежить від джерела емісії і становить від \$20 до \$150 за тону CO<sub>2</sub> [15].

За останні три роки кількість подібних проектів зросла вдвічі, згідно зі Global CCS Institute, на кінець 2018 року у світі було лише 20 таких проектів. Один із

успішних проектів вугільної генерації - модернізація ТЕС Boundary Dam в Канаді, де третій енергоблок потужністю приблизно 130 МВт був оснащений установкою CCS, яка утримує близько 90% викидів, і вуглекислий газ використовується на нафтовому родовищі для підвищення видобутку. Вартість цього проекту склала близько \$1,4 млрд.

У майбутньому рентабельність технології може бути виправдана завдяки оптимізації виробничих операцій, логістики та адаптації споживачів до використання діоксиду вуглецю як сировини. Наприклад, індійська компанія Tata Steel оголосила про свої плани досягнути вуглецевої нейтральності до 2050 року завдяки впровадженню технології вловлювання CO<sub>2</sub>.

Ініціатива відмови від вугільної генерації набуває обертів завдяки «Powering Past Coal Alliance», що налічує понад 50 корпорацій з 34 країн світу. Ці компанії репрезентують велику частку встановлених потужностей, незважаючи на те, що ця частина становить всього 4% від усього світового обсягу. Важливо відзначити, що з кожним роком все більше держав долучається до цього альянсу, і наразі більше ніж 20 країн висловили свою готовність відмовитися від вугільної енергетики.

Світова тенденція відмови від вугільної енергетики активно впливає на енергетичний розвиток різних країн. Наприклад, Франція приймає законодавчі заходи щодо зменшення використання кам'яного вугілля на 40% в порівнянні з 2012 роком та планує закрити останні чотири вугільні електростанції до 2022 року. Крім того, їхні плани передбачають зниження частки атомної енергетики на 10% до 2035 року, спрямовану до зменшення споживання енергії та реконструкції енергоефективних будівель.

Також альтернативою викопного палива є водень, і його розвиток може має потенціал суттєво покращити екологію нашої планети. Водень є потужним та чистим джерелом енергії, яке не супроводжується викидами шкідливих газів, таких як вуглекислий газ та оксиди азоту.

Зараз розгортається глобальний процес розвитку водневої енергетики, що має великий потенціал поліпшити екологічну ситуацію у світі та допомогти відмовитися від викопного палива. Цей тренд почав розвиватися завдяки зростанню

використання водню у секторі транспорту, що викликало з'яву фінансових ініціатив для підтримки цього напрямку.

Перший важливий крок у розвитку водневої енергетики був зроблений Японією у 2017 році, коли була розроблена концепція розвитку цієї галузі. Після цього у 2020 році було виділено значні фінансові ресурси для її розвитку. Південна Корея також приєдналася до цього тренду, затвердивши в 2019 році дорожню карту водневої економіки до 2040 року, яка передбачає лідерство у виробництві паливних елементів для електростанцій і електромобілів. Австралія активно розробляє гнучкі ланцюжки виробництва, постачання та експорту водню, враховуючи майбутню імпорторієнтованість водневих економік Японії та Південної Кореї [16].

Європейська Комісія також активно працює над інтеграцією водню у свою енергетичну стратегію, спільно з Green Deal і системою прикордонних податків, з метою відновлення економіки та захисту від економічної експансії РФ та КНР. Ця стратегія передбачає трьохетапний перехід до водневої економіки і загальний портфель інвестицій близько \$430 млрд.

Китай також активно розвиває інфраструктуру водню та створив національний план під назвою "Блакитна книга по водневій інфраструктурі". Головний акцент стратегії Китаю спрямований на перехід до водневого транспорту і заміну акумуляторів на водневі паливні елементи. Це відкриває широкі перспективи для використання водню як більш екологічної альтернативи для автомобілів і транспортних систем загалом [17].

Португалія, а також Європейська Комісія, прийняли стратегічні документи, в яких визначили важливість водню для майбутньої енергетики. Португалія планує виділити значні інвестиції у водневі технології, аналогічні обсяги фінансування встановлені в стратегії розвитку "чистого" водню Франції. Це свідчить про широкий інтерес європейських країн до водню як екологічної енергійної альтернативи.

Норвегія також активно працює над розвитком водневої енергетики та виділяє значні інвестиції для досягнення цієї мети. Такі ініціативи створюють перспективи для розширення використання "зеленого" водню в транспорті та енергетиці, що сприятиме зменшенню викидів парникових газів та поліпшенню якості повітря.



У ряді європейських країн, таких як Нідерланди, розвиток водню визнається важливою складовою енергетичної стратегії. Ці країни спрямовують зусилля на створення ефективної регуляторної політики, зниження собівартості та збільшення обсягів виробництва та використання "зеленого" водню. Очікується, що першим міждержавним проектом стане постачання водню на німецький ринок, оскільки Німеччина планує імпортувати водень, щоб забезпечити свої генеруючі потужності.

Цей глобальний тренд свідчить про наростаючий інтерес до водневої енергетики як інструменту для захисту довкілля та зменшення залежності від викопного палива у багатьох країнах світу.

Загалом, ростучий інтерес світових лідерів до водневої енергетики створює обширні можливості для розвитку водневого сектора, зменшення залежності від викопного палива і зниження викидів парникових газів. Міжнародні ініціативи та інвестиції в розробку водневих технологій роблять водень важливим чинником у планах з розвитку стійких та екологічно чистих систем енергозабезпечення.

#### **1.4. Нормативно – правова база реалізації політики декарбонізації**

Зміна клімату є однією з найважливіших глобальних проблем, яку людство стикається сьогодні. З плином часу зростають наслідки глобального потепління, яке викликається збільшенням викидів парникових газів у атмосферу. Внаслідок цього виникають екологічні кризи, які мають серйозний вплив на навколишнє середовище, господарство та суспільство в цілому. Для того щоб боротися з цими проблемами, багато країн приймають закони та нормативні акти, спрямовані на зменшення викидів парникових газів та зменшення впливу на зміну клімату. У цій статті розглянемо приклади кліматичних законів та їх роль у досягненні конкретних цілей щодо боротьби з глобальним потеплінням.

Закони інколи називають серцем кліматичної політики. Кліматичні закони є одними з основних інструментів в боротьбі зі зміною клімату. Вони визначають юридичні зобов'язання для країн та регіонів щодо зменшення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності, розвитку відновлювальних джерел енергії та

інших заходів, спрямованих на зниження впливу на клімат. Закони визначають конкретні цілі та терміни для досягнення їх, а також встановлюють механізми моніторингу та звітування про виконання.

Один з яскравих прикладів кліматичного законодавства - Закон Сполучених Штатів Америки про зменшення викидів парникових газів. Цей закон, прийнятий в 2020 році, визначає амбіційні цілі щодо зменшення викидів CO<sub>2</sub> та інших парникових газів. США зобов'язуються досягти "нульових викидів" до 2050 року, що означає, що країна повинна забезпечити баланс між викидами та поглинанням парникових газів. Для досягнення цієї цілі, Закон передбачає впровадження строгих обмежень на викиди у всіх галузях господарства, а також розвиток "зелених" технологій та інфраструктури [18].

Європейський Союз також приймає активні заходи для зменшення викидів парникових газів. Однією з ключових ініціатив є Директива про торгівлю квотами на викиди CO<sub>2</sub> (ETS), яка створює систему обміну квотами на викиди серед підприємств. Ця система надає економічні стимули для зменшення викидів, оскільки підприємства повинні придбати квоти на викиди, якщо вони перевищують встановлені норми. Це дозволяє знизити викиди у промислових галузях та забезпечити плавний перехід до "зеленої" економіки [19].

Вуглецеве ціноутворення в сучасному світі стало ключовим інструментом для боротьби з викидами парникових газів і досягнення глобальних кліматичних цілей. Цей механізм визнано як засіб компенсації непрямих збитків, завданих навколишньому середовищу та суспільству, тими, хто опосередковано спричинив ці емісії. Вуглецеве ціноутворення дозволяє владам різних країн стимулювати підприємства до зменшення викидів парникових газів, дотримуючись зобов'язань Паризької угоди [20, 21].

У світовій практиці існує три основні форми вуглецевого ціноутворення: податок на викиди CO<sub>2</sub>, система торгівлі квотами на викиди парникових газів і комбінація цих підходів. Система торгівлі квотами на викиди, відома як "cap and trade," була вперше сформульована канадським економістом Джоном Дейлсом у 1968 році. Цей підхід передбачає встановлення урядом обмежень на загальний обсяг

емісій в різних секторах економіки, при цьому підприємства можуть купувати квоти для викидів. На початок 2021 року вже було запроваджено більше 60 ініціатив вуглецевого ціноутворення у 46 країнах. Ці ініціативи включають 31 систему торгівлі квотами, відому як Emissions Trading System (ETS). Ця кількість свідчить про широкий розповсюдження вуглецевого ціноутворення та його важливу роль у боротьбі з зміною клімату [22].

Прикладами країн та регіонів, які успішно впровадили вуглецеве ціноутворення, є Європейський Союз, Великобританія, Японія, Казахстан, Мексика, Південна Корея, США, Канада та Китай. Наприклад, Європейський Союз запустив систему торгівлі квотами на викиди в 2005 році, і наразі вона охоплює 45% всіх викидів парникових газів у євроні. Південна Корея також прийняла цю систему у 2015 році і вже покриває 70% національних викидів парникових газів.

Швейцарія відзначається важливим досвідом, коли в 2008 році вона замінила вуглецевий податок системою торгівлі квотами. Це рішення було пов'язано з переконанням у тому, що ринкове ціноутворення є більш ефективним механізмом стимулювання підприємств до зменшення викидів парникових газів. Ринкове ціноутворення на діоксид вуглецю має численні переваги, включаючи стимулювання інновацій та нарощування темпів впровадження систем торгівлі квотами на різних рівнях та їхню максимальну інтеграцію. Варто відзначити, що впровадження вуглецевого ціноутворення в кожній країні враховує її конкретні умови та вимоги, але цей інструмент стає все більш популярним і грає ключову роль у глобальних зусиллях з обмеження викидів парникових газів.

Нормативні зобов'язання і конкретні цілі. Кліматичні закони встановлюють конкретні цілі щодо зменшення викидів парникових газів. Наприклад, Закон США визначає, що до 2030 року викиди повинні бути зменшені на 50% порівняно з рівнем 2005 року. Європейський Союз має амбіційну ціль - досягти "кліматичної нейтральності" до 2050 року, що означає, що викиди повинні бути збалансовані поглинанням парникових газів.

Ці нормативні зобов'язання вимагають від країн приймати конкретні заходи для досягнення цих цілей. Це може включати в себе впровадження більш строгих

стандартів екологічної безпеки, розвиток енергоефективних технологій, підтримку відновлювальних джерел енергії та інші заходи, спрямовані на зменшення впливу на клімат.

Механізми моніторингу та звітування. Закони про зменшення викидів парникових газів також встановлюють механізми моніторингу та звітування про виконання. Країни повинні регулярно повідомляти про свій прогрес у досягненні цілей зменшення викидів. Це дозволяє контролювати виконання кліматичних законів і вживати корективи в разі необхідності.

У Європейському Союзі існує система моніторингу та звітування про викиди CO<sub>2</sub>, яка дозволяє відстежувати викиди в різних галузях економіки. Звіти публікуються регулярно та розглядаються в рамках міжнародних переговорів зі зміни клімату. Кліматичні закони грають важливу роль в досягненні цілей щодо зменшення викидів парникових газів та боротьбі зі зміною клімату. Вони встановлюють юридичні зобов'язання для країн і стимулюють розвиток "зелених" технологій та інфраструктури. Це допомагає зберегти природне середовище, знизити екологічні ризики та забезпечити стале економічне зростання. Прийняття і виконання кліматичних законів є важливим кроком у напрямку сталої та екологічно відповідальної майбутності для нашої планети [23].

Норми енергетичної ефективності це Закони та Стандарти, спрямовані на зменшення споживання енергії та викидів вуглецю. Зміна клімату і зростаюча нестабільність середовища вимагають ефективних заходів у сфері енергетики та споживання ресурсів. Один із найважливіших інструментів для досягнення цих цілей - норми енергетичної ефективності. Багато країн у світі приймають закони та стандарти, спрямовані на зменшення споживання енергії та викидів вуглецю в різних галузях, від промисловості і будівництва до автомобільної та побутової техніки. Ці норми грають ключову роль у стратегіях боротьби зі зміною клімату та ефективному використанні енергії, сприяючи одночасно збереженню ресурсів та зниженню витрат.

Впровадження норм енергетичної ефективності на законодавчому рівні стало стандартною практикою в багатьох країнах світу. Закони та регуляції створюють

основу для забезпечення відповідності підприємств, будівель та продуктів ефективним енергетичним стандартам.

Один з прикладів - "Закон Сполучених Штатів про ефективну енергетику" (Energy Policy Act) [24], прийнятий у 1992 році та періодично модернізований. Цей закон встановлює стандарти енергоефективності для різних видів обладнання і засобів та сприяє розвитку та впровадженню нових технологій, які допомагають економити енергію. Підприємства та споживачі мають дотримуватися цих стандартів, що стимулює їх до інвестування в більш ефективне споживання енергії.

Європейський Союз також регулює енергоефективність через низку директив та регуляцій. Одна з найважливіших - "Директива про енергоефективність в промисловості" (Energy Efficiency Directive), яка містить вимоги щодо зменшення енергоспоживання у промисловості та інших галузях. Країни-члени ЄС повинні впроваджувати ці вимоги в національному законодавстві та забезпечувати відповідність підприємств.

Промисловість є одним із основних споживачів енергії у світі, тож вдосконалення енергоефективності у цьому секторі є надзвичайно важливим завданням. Багато країн встановлюють стандарти для промислових підприємств, спонукаючи їх до впровадження нових технологій та практик з метою зменшення споживання енергії. У Японії діє "Закон про раціональне використання енергії" (Energy Conservation Law), який встановлює вимоги щодо обов'язкового зменшення енергоспоживання у промисловості. Ця ініціатива стимулює підприємства до енергоефективних рішень та інвестицій у сучасні технології.

Будівельна галузь та сфера житлового будівництва також є важливими секторами, де енергоефективність грає велику роль. Велика кількість країн приймає норми та стандарти, що стосуються енергоефективності будівель і систем опалення.

Сполучені Штати, наприклад, мають "Закон про енергоефективність будівель" (Energy Efficiency in Buildings Act), який встановлює стандарти для будівель і обладнання. Цей закон сприяє зменшенню споживання енергії та викидів парникових газів у будівельній галузі [25].

Транспорт - інший важливий сектор для енергоефективності. Багато країн встановлюють стандарти емісії та пального споживання для автомобілів та транспортних засобів. Наприклад, Європейський Союз має "Директиву про обмеження викидів CO<sub>2</sub> від легкових автомобілів", яка встановлює цільові стандарти для викидів вуглецю від автомобілів [26].

Побутова техніка, така як холодильники, пральні машини, телевізори та інші електроприлади, також підпадає під вимоги щодо енергоефективності. Багато країн мають стандарти та оцінки енергоефективності для цих продуктів. Наприклад, програма "Energy Star" у Сполучених Штатах визначає продукти, які відповідають високим стандартам енергоефективності [27].

Вплив на зменшення викидів та збереження ресурсів. Норми енергетичної ефективності мають значний вплив на зменшення викидів вуглецю та збереження енергетичних ресурсів. Шляхом впровадження нових технологій та ефективних практик у промисловості, будівництві, транспорті та побутовій техніці, країни можуть досягти своїх цілей щодо зменшення емісій та споживання енергії.

Закони про використання відновлювальних джерел енергії: Прагнення до сталого майбутнього

Використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) стає однією з ключових складових глобальної енергетичної трансформації. У цій статті ми дослідимо різні аспекти законодавства, спрямованого на підтримку та розвиток ВДЕ у різних країнах світу. Закони і стимули, пов'язані з використанням сонячної, вітрової, гідро- та геотермальної енергії, відіграють важливу роль у переході до сталого майбутнього і зменшенні викидів парникових газів.

Вимоги щодо скорочення викидів парникових газів та залежність від обмежених природних ресурсів примушують світове співтовариство розглядати відновлювальні джерела енергії як ефективний та сталий спосіб забезпечити енергетичні потреби сучасного світу. Широкомасштабне впровадження сонячної, вітрової, гідро- та геотермальної енергії стало однією з найважливіших складових енергетичного та екологічного розвитку. У цьому контексті законодавство і правові

норми грають ключову роль у формуванні структури та стимулюванні росту галузі ВДЕ.

Закони про ВДЕ у Сполучених Штатах. Сполучені Штати відіграють важливу роль у розвитку та стимулюванні використання відновлювальних джерел енергії. Наприклад, Закон про податки з інвестицій у відновлювальну енергію, прийнятий у 2008 році, надає податкові кредити та стимули інвесторам у ВДЕ проекти. Цей закон став однією з ключових правових основ розвитку вітрової та сонячної енергетики в країні. Велика кількість штатів також прийняла власні закони, що стимулюють розвиток ВДЕ, зокрема закони, що визначають обов'язкову кількість відновлювальної енергії в енергетичному міксі штату [28].

Європейський Союз зобов'язався досягти амбітних цілей з питань використання ВДЕ. Однією з ключових ініціатив є Директива про торгівлю квотами на викиди CO<sub>2</sub> (ETS), яка впроваджує систему торгівлі квотами на викиди вуглецю для промислових установок та створює стимули для зменшення викидів та використання ВДЕ. Крім того, багато європейських країн встановили амбітні національні цілі щодо використання сонячної та вітрової енергії. Наприклад, Німеччина прийняла закони, які гарантують пріоритетне підключення ВДЕ об'єктів до електромережі та надають їм фінансову підтримку [29].

Азія також активно розвиває свій сектор ВДЕ. Китай став лідером у виробництві сонячних панелей і вітрових турбін. У країні прийнято кілька програм та стимулів для підтримки ВДЕ, включаючи систему тарифів на зелену електроенергію. Індія також прийняла ряд законодавчих актів, що сприяють розвитку сонячної та вітрової енергії. Проте, незважаючи на значний розвиток, країни Азії також стикаються з викликами щодо регулювання, підключення до електромережі та фінансування ВДЕ проектів.

Усі ці закони та ініціативи, спрямовані на розвиток ВДЕ, стикаються з рядом викликів. Одним із них є питання збереження сталості енергопостачання, оскільки ВДЕ є залежними від погодних умов та можуть бути нестабільними джерелами енергії. Важливо розвивати системи зберігання енергії та підтримувати розвиток

мережі, що дозволить ефективно розподіляти ВДЕ. Крім того, фінансування та інвестиції є ключовими для розвитку галузі ВДЕ.

Закони та стимули, спрямовані на використання відновлювальних джерел енергії, є важливими інструментами для досягнення глобальних цілей щодо зменшення викидів парникових газів та розвитку сталого енергетичного сектору. Різні країни вже прийняли інноваційні рішення та закони, які сприяють розвитку ВДЕ. Проте, дорогоцінний досвід та підтримка є важливими для подолання викликів та подальшого росту галузі ВДЕ.

Законодавство та норми енергетичної ефективності відіграють ключову роль у боротьбі зі зміною клімату та оптимізації використання енергії. Шляхом створення вимог для підприємств, будівель, транспорту та продуктів, країни можуть зменшити викиди вуглецю та споживання енергії, що сприяє збереженню ресурсів та створенню більш стійкої енергетичної системи. Норми енергетичної ефективності є важливим інструментом у досягненні глобальних цілей зі зменшення впливу людей на довкілля та збереження природних ресурсів для майбутніх поколінь.

### **1.5. Механізм CORSIA, як метод досягнення декарбонізації в авіаційній галузі**

CORSIA — це перша в світі система ціноутворення на викиди вуглецю для відповідності сектору. Схема компенсації та скорочення викидів вуглецю для міжнародної авіації (CORSIA) — це глобальна схема, яка має на меті забезпечити низький рівень зростання сектору міжнародної авіації з 2020 року. Ухвалений у жовтні 2016 року Міжнародною організацією цивільної авіації (ІКАО) у Монреалі, він зобов'язує більшість авіакомпаній здійснювати моніторинг і звітувати про свої викиди з 2019 року, а також купувати одиниці скорочення викидів, створених вуглецевими проектами в інших секторах, щоб компенсувати будь-яке зростання CO<sub>2</sub> в цьому секторі. викиди вище рівня 2020 року з 2021 року.

Щоб відповідати CORSIA, сектор міжнародної авіації має кілька варіантів (кошиків заходів):



- Відмова від прийнятних вуглецевих кредитів.
- Споживання стійкого авіаційного палива (SAF).
- Покращення наземних операцій, управління повітряним рухом та інфраструктури, а також розгортання більш економних літаків.

Це історичне рішення знаменує собою перший випадок, коли окремий сектор промисловості погодився на глобальний ринок заходи у сфері зміни клімату. У 2009 році галузь вперше запропонувала цей підхід і підтримала його процес ІКАО з тих пір.

Тим часом міжнародні стандарти для впровадження CORSIA були прийняті як Додаток до Чиказької конвенції, яку всі 193 країни-члени ІКАО повинні застосовувати з 1 січня 2019 року.

Спочатку базова лінія CORSIA – від якої залежать вимоги авіакомпанії щодо компенсації за угодою розраховано – узгоджено середнє значення викидів за 2019 та 2020 роки. Однак у 2020 році криза COVID-19 призвело до стрімкого падіння попиту на авіаперевезення менш ніж вдвічі порівняно з 2019 роком повітряний трафік у 2020 році РТК становить 293 438 мільйонів, що свідчить про падіння на 59,6% порівняно з рівнем 2019 року. В результаті, базовий рівень CORSIA був би значно зменшений, що призвело б до неочікуваних і серйозних економічних проблем тягарем для і без того надзвичайно ослабленої авіаційної галузі та суперечить духу рамок CORSIA погоджено в 2016 році. Тому в червні 2020 року Рада ІКАО погодилася використовувати викиди 2019 року лише як CORSIA базовий рівень на період 2021-2023 рр. Нещодавно на своїй 41-й Асамблеї ІКАО встановила 85% викидів у 2019 році як Базовий рівень CORSIA з 2024 року до завершення схеми в 2035 році: значно амбітніша мета, ніж спочатку запланований, який промисловість підтримала [30].

Авіаційний сектор прагне розвивати технології, експлуатацію та інфраструктуру зменшити викиди вуглецю. Компенсація не призначена для заміни цих зусиль. CORSIA також не буде робити паливо ефективність не є повсякденним пріоритетом. Скоріше CORSIA може допомогти сектору досягти кліматичних цілей

у коротко - та середньостроковій перспективі, доповнюючи ініціативи зі скорочення викидів у секторі.

CORSIA — це компенсаційна схема, яка має на меті обмежити викиди вуглекислого газу від міжнародних рейсів до 2020 року. Ця схема вимагає від авіакомпаній купувати вуглецеві кредити, щоб компенсувати викиди понад обмеження. Компенсаційні кредити можуть бути створені за допомогою проектів, таких як відновлювані джерела енергії та проекти лісонасадження, які зменшують викиди парникових газів. Спочатку схема буде застосовуватися до рейсів між державами-учасницями, включаючи всі країни-члени Європейського Союзу, Китай, Японію та Сполучені Штати. Станом на січень 2023 року 115 країн беруть участь у цій ініціативі, карта представлена на рисунку 1.5. Іншими словами, 60% держав-членів ООН приєдналися до CORSIA. Дві країни, які не є членами ООН, не приєдналися до CORSIA.



Рис. 1.5. Карта світу на якій представлені всі країни, які приєдналися до CORSIA

У 2021 році авіакомпанії взяли на себе зобов'язання досягти чистого нульового рівня викидів до 2050 року. Досягнення цієї амбітної мети вимагатиме як внутрішньогалузеві заходи, включаючи продовження інвестицій у нові технології та

потужні механізми підтримки для розгортання сталого авіаційного палива, а також позасекторальних заходів, таких як компенсація та видалення вуглецю.

Компенсація – це дії компанії або фізичної особи, спрямовані на компенсацію своїх викидів шляхом фінансування скорочення викиди в інших місцях. Компенсаційні та вуглецеві ринки є основними складовими глобального, регіонального та національна політика скорочення викидів. Вони працювали десятиліттями з метою відповідності та добровільно скорочення викидів і залишатися ефективним механізмом для підтримки дій проти зміни клімату, особливо для секторів, які важко зменшити.

Існує кілька способів досягнення скорочення CO<sub>2</sub>, які можна використовувати як компенсацію, багато з яких приносять інші соціальні, екологічні чи економічні переваги, що стосуються сталого розвитку. Такі компенсації можуть бути отримані від різних видів діяльності, включаючи, наприклад, розгортання відновлюваної енергії, чисте приготування їжі технології, уловлювання метану, лісове господарство та інші проекти зі скорочення або уникнення викидів.

Щоб забезпечити екологічну цілісність CORSIA, Рада ICAO затвердила список прийнятних викидів одиниць, які можна використовувати для відповідності. Рішення Ради підтверджено рекомендацією від технічно консультативного органу і керується екологічними критеріями, щоб гарантувати, що одиниці викидів забезпечують необхідні скорочення CO<sub>2</sub>.

CORSIA приділяє значну увагу використанню стійкого авіаційного палива (SAF) порівняно з іншими заходами з декарбонізації авіаційної промисловості. ICAO визначає SAF як «будь-яке авіаційне паливо, вироблене зі стійких джерел, включаючи відновлювані джерела енергії та/або передові технології перетворення». Елементи впровадження CORSIA широко спрямовані на SAF.

Концепція прийнятності та вимоги до SAF викладені в документі ICAO 03.5. Цей документ містить вказівки для виробників і користувачів палива щодо прийнятності, перевірки та критеріїв визнання для SAF. Згідно з цим документом, SAF повинні відповідати кільком критеріям, щоб отримати право на CORSIA.

По-перше, вони повинні скоротити викиди парникових газів принаймні на 10% порівняно з викопним паливом.

По-друге, вони повинні відповідати критеріям стійкості, включаючи соціальні, екологічні та економічні фактори.

По-третє, вони повинні вироблятися з відновлюваних джерел або з використанням передових технологій перетворення.

Щоб підтвердити відповідність палива SAF, виробники та користувачі палива повинні пройти процес сертифікації за затвердженою схемою стійкої сертифікації (SCS).

У документі ICAO 04 перераховані схвалені SCS. Ці схеми сертифікації включають:

- круглий стіл зі стійких біоматеріалів;
- міжнародну сертифікацію стійкості та викидів вуглецю;
- сертифікацію стійкого авіаційного палива.

У документі ICAO 057 описано критерії стійкості, яким має відповідати прийнятне паливо у пропозиції CORSIA. Ці критерії охоплюють декілька екологічних, соціальні та економічні фактори, включаючи зміни у землекористуванні, біорізноманітті, водокористуванні, права людини, трудові права та економічний розвиток. У документі говориться, що прийнятне паливо не повинно мати суттєвого негативного впливу на продовольчу безпеку, доступність води або біорізноманіття. Як зазначалося вище, документ встановлює поріг принаймні 10% скорочення викидів парникових газів порівняно з викопним паливом. Однак зменшення викидів, досягнуте паливом, може відрізнитися залежно від сировини та виробничого процесу. Крім того, третя поправка документа включає критерії стійкості для партій CORSIA LCAF, вироблених сертифікованими виробниками палива 1 січня 2024 року або після цієї дати.

Документ ICAO 069 називається «Значення викидів CORSIA за умовчанням протягом життєвого циклу палива, прийнятного CORSIA» (ICAO 2022). Стандартне значення оцінки життєвого циклу ІКАО - базується на відповідній сировині, процесі перетворення (тобто шляху), спричиненій зміні землекористування та специфікаціях

шляху. Стандартні викиди протягом життєвого циклу в документі надають оцінки викидів парникових газів, пов'язаних з різними типами сировини та виробничими процесами. Так, у документі наголошується, що викиди можуть відрізнятися залежно від сировини та процесу виробництва.

Документ ICAO 0710 містить вказівки та методологію для розрахунку викидів SAF протягом життєвого циклу. Методологія враховує специфічні характеристики вихідної сировини та процесу виробництва. Він вимагає від виробників палива збирати та повідомляти дані про викиди, пов'язані з кожним етапом виробничого процесу, від виробництва сировини до кінцевого розподілу.

Як було сказано раніше, пропозиція CORSIA має значні наслідки для авіаційного сектору. Це важливий крок уперед у зусиллях авіаційної промисловості щодо сталого зменшення впливу на навколишнє середовище. За стабілізуючи викиди вуглекислого газу на рівні 2020 року, CORSIA допоможе пом'якшити внесок авіаційного сектору в зміну клімату. Пропозиція також заохочує розробку та використання SAF, що допоможе зменшити залежність сектора від викопного палива [31].

Однак із запровадженням CORSIA пов'язані деякі труднощі, наприклад доступність SAF. Виробництво SAF все ще знаходиться на зародковому етапі, і поточні виробничі потужності недостатні для задоволення попиту авіаційного сектора.

Другою проблемою є вартість SAF. SAF є значно дорожчим, ніж звичайне реактивне паливо, що може збільшити експлуатаційні витрати авіакомпаній. SAF, як правило, дорожчі з кількох причин, вони мають нижчі обсяги виробництва, ніж звичайні види палива, вони використовують передову сировину та технології переробки, а в ланцюжку поставок не вистачає ефекту масштабу. Крім того, SAF отримують з різноманітної сировини, включаючи відпрацьовані масла, рослинні олії та сільськогосподарські відходи. Ця сировина потребує додаткової обробки, такої як гідроочищення, для видалення домішок і виробництва палива, яке відповідає стандартам авіаційного палива.

Ці додаткові кроки можуть збільшити вартість SAF порівняно зі звичайним реактивним паливом. Вищі витрати на SAF можуть призвести до більших операційних витрат для авіакомпаній, що створює проблеми для авіакомпаній, які працюють із низькою нормою прибутку. Щоб подолати ці проблеми, деякі авіакомпанії співпрацюють із виробниками біопалива для розробки нових ланцюжків постачання SAF і підвищення доступності SAF.

Третя проблема, пов'язана з CORSIA, полягає в тому, що вона стосується лише міжнародних рейсів між державами, які добровільно приєдналися. Проте все більше країн приєднуються до схеми, тим самим збільшуючи її охоплення та здатність зменшувати викиди вуглецю від авіації. Станом на вересень 2021 року 115 країн, що представляють понад 80% міжнародної авіаційної діяльності, зголосилися взяти участь у CORSIA. Таким чином, схема значно розширилася з моменту її створення в 2016 році. Оскільки авіація є глобальною галуззю, збільшення участі в CORSIA має вирішальне значення для досягнення мети ІКАО щодо вуглецево-нейтрального зростання з 2020 року [32].

Працюючи разом, країни можуть створити рівні умови для авіакомпаній. Вони можуть забезпечити справедливий розподіл тягаря скорочення викидів вуглецю між галуззю. Розширення сфери діяльності CORSIA для включення внутрішніх рейсів також може збільшити охоплення та вплив схеми. Такого розширення можна досягти за рахунок добровільної участі країн, а також за допомогою міжнародної співпраці та координації.

Вищезазначені проблеми стосуються впровадження CORSIA в авіаційній галузі. Однак елементи впровадження CORSIA, зокрема паливо, що відповідає вимогам, також висвітлюють труднощі, які можуть перешкодити плавному переходу до стійкого авіаційного сектору. По-перше, елементи реалізації підкреслюють SAF, обговорюючи їх більш детально, ніж інші заходи. Ці інші заходи можуть бути корисними для досягнення цілей декарбонізації в цьому важкодоступному секторі. По-друге, багато документів, що описують елементи реалізації, змінені або мають нові редакції, встановлені в різний час. Інші документи необхідно оновити відповідно, щоб уникнути конфліктів у їх застосуванні.

Підсумовуючи, елементи впровадження CORSIA мають вирішальне значення для декарбонізації авіаційного сектора. Проте їх документація ще розробляється. Необхідні постійні вдосконалення, щоб подолати технологічні проблеми або включити нові альтернативні джерела палива, які відповідають критеріям стійкості CORSIA. Декарбонізація авіаційного сектора є серйозною проблемою для досягнення нульових викидів вуглецю до 2050 року. Проте потенційний вплив елементів впровадження CORSIA є багатообіцяючим, оскільки вони поступово включають багато можливостей [33].

## **1.6. Висновки до розділу**

Сучасний світ стикається з безпрецедентними викликами, пов'язаними із змінами клімату та збереженням навколишнього середовища. Один із ключових інструментів для боротьби з цими проблемами є концепція декарбонізації довкілля. Декарбонізація відноситься до процесу зменшення викидів парникових газів та переходу до більш сталої та низьковуглецевої економіки.

Спостерігається збільшення температур на планеті, швидке танення льодовиків та інші зміни клімату, які ставлять під загрозу екосистеми та життя на Землі. Однак глобальна концепція декарбонізації ставить перед собою завдання зменшення викидів парникових газів, особливо діоксиду вуглецю (CO<sub>2</sub>), які є однією із головних причин глобального потепління. Цей процес передбачає зниження споживання вугільного палива та перехід до відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія.

Однією із ключових особливостей декарбонізації є активний розвиток відновлюваних джерел енергії. Сонячні панелі, вітрові турбіни, гідроелектростанції та інші відновлювані джерела стають все більш доступними та ефективними. Вони не лише допомагають зменшити викиди CO<sub>2</sub>, але й створюють нові можливості для економічного росту та зменшення залежності від невідновлюваних джерел енергії.

Декарбонізація є глобальною концепцією, яка вимагає міжнародної співпраці та координації. Міжнародні угоди, такі як Паризька угода, зобов'язують країни до

взаємодії для зменшення викидів парникових газів та досягнення конкретних цілей декарбонізації. Глобальні обміни технологіями та навчання також грають важливу роль у цьому процесі.

Декарбонізація також передбачає більшу увагу до захисту природи та біорізноманітості. Зменшення викидів CO<sub>2</sub> сприяє зменшенню ефекту парникового газу та зменшенню тиску на природні екосистеми. До цього також включається сталий використання природних ресурсів, щоб забезпечити їхню довгострокову життєздатність.

Декарбонізація докiлля є кроком в напрямку сталого та екологічно чистого майбутнього. Вона передбачає збереження природи, зменшення впливу на клімат та створення умов для сталого росту. Розвиток нових технологій та відновлюваних джерел енергії відкриває нові можливості для вдосконалення нашого світу.



## РОЗДІЛ 2

### КОНВЕРСІЯ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ФОТОКАТАЛІЗУ CO<sub>2</sub>

#### 2.1. Фотокаталіз як метод конверсії парникових газів

Фотокаталіз — це процес, у якому світлова енергія використовується для активації каталізатора, який потім сприяє хімічній реакції. Цей процес передбачає поглинання фотонів фотокаталізатором, який створює збуджений стан, який може взаємодіяти з молекулою реагенту, щоб ініціювати хімічну реакцію.

Принцип фотокаталізу ґрунтується на властивостях певних матеріалів, відомих як фотокаталізатори, які мають здатність поглинати світлову енергію та використовувати її для стимулювання хімічних реакцій. Коли фотокаталізатор піддається дії світла, електрони в матеріалі збуджуються та переходять у вищий енергетичний стан. Ці збуджені електрони можуть потім взаємодіяти з іншими молекулами в навколишньому середовищі, ініціюючи хімічні реакції, які зазвичай не відбуваються за нормальних умов.

Одним із найпоширеніших застосувань фотокаталізу є розкладання органічних сполук, таких як забруднювачі та домішки у воді та повітрі. У цьому процесі фотокаталізатор зазвичай є напівпровідниковим матеріалом, таким як діоксид титану, який поглинає світлову енергію для створення активних форм кисню, які можуть руйнувати органічні молекули [34,40].

Фотокаталіз, незважаючи на різноманітні деталі щодо реакцій і механізмів, може бути описаний чотирма важливими етапами, що наведені на рисунку 2.1: (I) поглинання світла для генерації електронно-діркових пар; (II) розділення збуджених зарядів; (III) перенесення електронів і дірок на поверхню фотокаталізаторів; і (IV) використання зарядів на поверхні для окисно-відновних реакцій. На третьому етапі велика частина електронно-діркових пар рекомбінує або на шляху до поверхні, або

на поверхневих ділянках [35,38,39]. Рекомбінація розсіює зібрану енергію у вигляді тепла (безвипромінювальна рекомбінація) або випромінювання світла. (радіаційна рекомбінація). Довгоживучі фотогенеровані заряди на поверхні можуть стимулювати різні окисно-відновні реакції, деталі яких залежать від донорних або акцепторних властивостей поглинених поверхнею частинок.

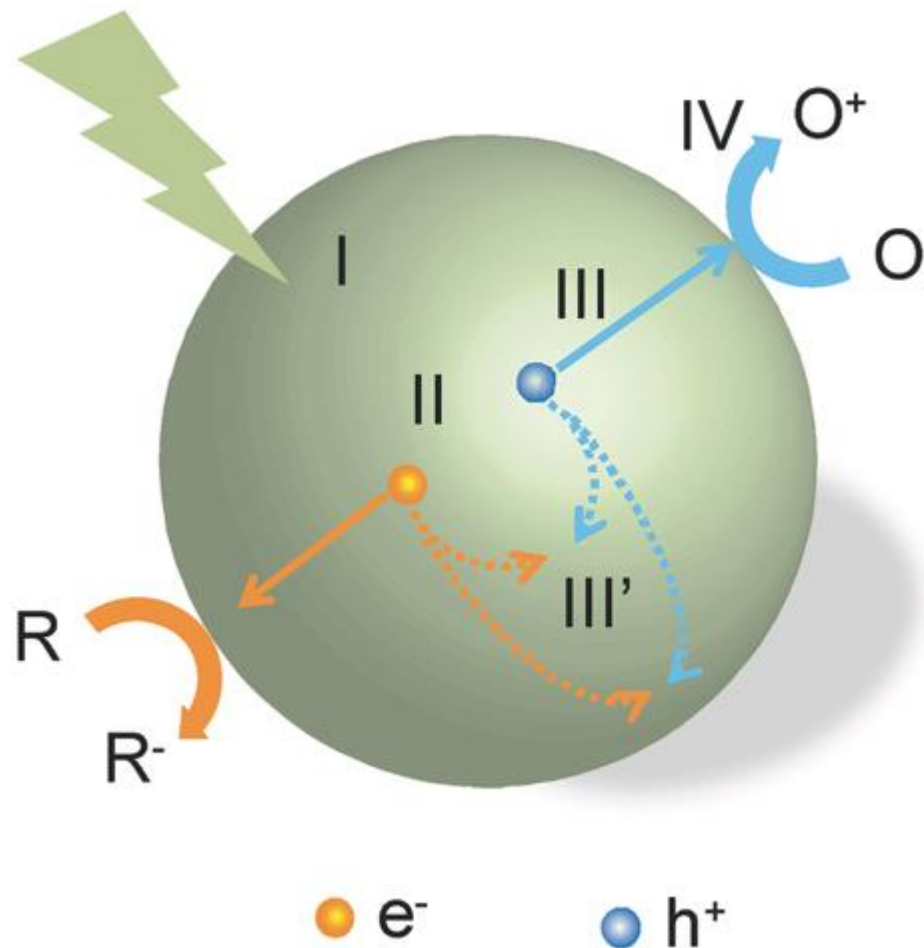


Рис. 2.1. Етапи процесу фотокаталітичної реакції

Загалом, принцип фотокаталізу передбачає використання енергії світла для активації каталізатора, який потім сприяє хімічним реакціям, які зазвичай не відбуваються за нормальних умов. Цей процес має багато потенційних застосувань у таких сферах, як відновлення навколишнього середовища, виробництво енергії та хімічний синтез.

Фотокаталітичне відновлення  $\text{CO}_2$  — це процес, який використовує енергію світла для перетворення вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) на більш корисні хімічні сполуки,

такі як вуглеводні або спирти. Цей процес вважається важливою стратегією пом'якшення наслідків зміни клімату шляхом зменшення кількості CO<sub>2</sub>, що викидається в атмосферу.

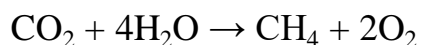
Процес фотокаталітичного відновлення CO<sub>2</sub> передбачає використання каталізатора, як правило, напівпровідника, такого як діоксид титану (TiO<sub>2</sub>), для поглинання енергії світла та генерування електронів і дірок. Потім ці електрони та дірки реагують з молекулами CO<sub>2</sub> з утворенням відновлених вуглецевих сполук, таких як метан (CH<sub>4</sub>), метанол (CH<sub>3</sub>OH) або формальдегід (HCHO).

Однією з ключових проблем у фотокаталітичному відновленні CO<sub>2</sub> є розробка каталітичних матеріалів, які ефективно перетворюють CO<sub>2</sub> на корисні хімічні сполуки, а також є стабільними та довговічними в умовах, необхідних для проведення реакції.

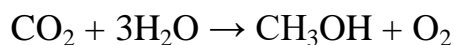
Дослідники активно працюють над розробкою нових каталізаторів і оптимізацією умов реакції для підвищення ефективності цього процесу.

Фотокаталітичне відновлення вуглекислого газу водяною парою може призвести до різноманітних хімічних реакцій залежно від типу фотокаталізатора, що використовується, та умов реакції. Ось кілька прикладів деяких можливих реакцій:

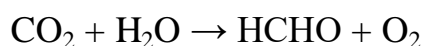
1) Виробництво метану:



2) Виробництво метанолу:



3) Виробництво формальдегіду:



4) Виробництво мурашиної кислоти:  $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCOOH} + \text{O}_2$

У всіх цих реакціях молекула води розщеплюється на іони водню (H<sup>+</sup>) і електрони (e<sup>-</sup>) за допомогою процесу фотокаталізу, і ці реакційноздатні речовини потім реагують з CO<sub>2</sub> для отримання бажаних продуктів.

Точний шлях реакції та селективність продукту залежатимуть від низки

факторів, таких як тип використовуваного фотокаталізатора, довжина хвилі світла, що використовується для збудження, температура реакції та тиск, а також наявність сукаталізаторів або добавок

## **2.2. Природний фотокаталіз**

Природний фотокаталіз — це процес, у якому фотосинтезуючі організми, такі як рослини та водорості, використовують світлову енергію для перетворення вуглекислого газу та води в органічні молекули та кисень. Цей процес, відомий як фотосинтез, є однією з найважливіших біохімічних реакцій на Землі та відповідає за виробництво кисню, яким ми дихаємо, і органічних сполук, що становлять основу життя.

Під час фотосинтезу пігменти, звані хлорофілами, які присутні у фотосинтетичних мембранах рослин і водоростей, поглинають світлову енергію та використовують її для запуску серії хімічних реакцій, які в кінцевому підсумку виробляють глюкозу та інші органічні молекули. Потім ці молекули використовуються організмом як джерело енергії та будівельні блоки для росту та розмноження.

Природний фотокаталіз є високоефективним процесом з ефективністю перетворення до 6% для більшості рослин і водоростей. Така ефективність пояснюється здатністю цих організмів поглинати світло в широкому спектрі довжин хвиль і використовувати численні фотосинтетичні пігменти для захоплення цієї світлової енергії.

Загалом, природний фотокаталіз є фундаментальним процесом у біосфері та має важливі наслідки для клімату Землі та стійкості життя на нашій планеті.

## **2.3. Штучний фотокаталіз**

Штучний фотокаталіз — це процес, за допомогою якого певні матеріали, які називаються фотокаталізаторами, використовують енергію світла для здійснення

хімічних реакцій. У цих реакціях енергія світла поглинається фотокаталізатором, який потім передає енергію сусідній молекулі, що призводить до утворення нової хімічної сполуки.

Принцип роботи штучного фотокаталізу складається з трьох основних етапів:

1. поглинання світла фотокаталізатором ;
2. поділ заряду ;
3. каталіз хімічної реакції.

На першому етапі фотокаталізатор поглинає світлову енергію, як правило, в ультрафіолетовому або видимому діапазоні. Ця світлова енергія просуває електрон у фотокаталізаторі на вищий енергетичний рівень, утворюючи пару електрон-дірка.

На другому етапі електрон і дірка розділяються, при цьому електрон зазвичай мігрує на поверхню фотокаталізатора, тоді як дірка залишається в об'ємі матеріалу. Це поділ заряду створює окисне середовище на поверхні фотокаталізатора та відновне середовище в об'ємі.

На третьому етапі окислювальне середовище на поверхні фотокаталізатора можна використовувати для каталізації хімічної реакції, яка зазвичай включає окислення забруднювача або відновлення молекули для отримання корисного продукту. Приклади фотокаталізаторів включають діоксид титану ( $\text{TiO}_2$ ), оксид цинку ( $\text{ZnO}$ ) і сульфід кадмію ( $\text{CdS}$ ) [41].

Продукти фотокаталізу залежать від конкретної реакції, що каталізується. Наприклад, фотокаталіз можна використовувати для розщеплення органічних забруднювачів на вуглекислий газ і воду або для виробництва газоподібного водню з води, використовуючи сонячне світло як джерело енергії.

Тип світла, який використовується в фотокаталізі, залежить від властивостей поглинання фотокаталізатора. Діоксид титану, наприклад, найбільш ефективно поглинає ультрафіолетове світло, тоді як деякі інші матеріали, такі як сульфід кадмію, можуть поглинати видиме світло. Дослідники також досліджують використання штучного фотосинтезу, який використовує сонячне світло для стимулювання виробництва корисних хімікатів або палива.

Незважаючи на потенційні переваги штучного фотокаталізу, ця технологія також має деякі обмеження. Серед основних обмежень:

1. Низька ефективність. Ефективність фотокаталізу обмежена наявністю світлової енергії, реакційною здатністю фотокаталізатора та ефективністю поділу зарядів. Крім того, площа поверхні фотокаталізатора є важливим фактором у визначенні його ефективності, і оптимізація цієї площі поверхні може бути складною.

2. Обмежена селективність: фотокаталізатори можуть каталізувати широкий спектр реакцій, що може ускладнити досягнення високої селективності для конкретного продукту чи реакції.

3. Отруєння каталізатора: у деяких випадках фотокаталізатор може бути отруєний реагентами або побічними продуктами, що знижує його активність і ефективність.

4. Проблеми зі стабільністю: деякі фотокаталізатори можуть погіршуватися з часом, що призводить до втрати активності або селективності.

5. Проблеми навколишнього середовища: деякі фотокаталізатори, наприклад сульфід кадмію, є токсичними та становлять небезпеку для навколишнього середовища.

6. Вартість: Вартість фотокаталізаторів, особливо тих, що виготовлені з рідкісних або дорогих матеріалів, може бути обмежуючим фактором для широкого впровадження цієї технології.

7. Усунення цих обмежень вимагатиме прогресу в розробці нових фотокаталізаторів, підвищення ефективності розділення зарядів і використання світлової енергії, а також розробки більш селективних і стабільних фотокаталітичних систем [36,37].

## **2.4. Висновки до розділу**

Фотокаталіз - це перспективний метод для конверсії CO<sub>2</sub> та інших парникових газів у корисні хімічні сполуки за допомогою світлової енергії та фотокаталітичних

матеріалів. Фотокаталіз дозволяє знижувати викиди CO<sub>2</sub> та інших парникових газів в атмосферу ефективно та екологічно чисто, оскільки він не супроводжується додатковими забрудненнями.

Конвертовані продукти, отримані за допомогою фотокаталізу, можуть бути використані в різних галузях, включаючи енергетику, сільське господарство, та промисловість.

Фотокаталіз для конверсії CO<sub>2</sub> допомагає сприяти створенню сталого та низьковуглецевого майбутнього, де зміни клімату та глобальне потепління можуть бути зменшені.

Також, застосування фотокаталізу для конверсії парникових газів є важливим кроком у напрямку боротьби зі змінами клімату та збереженням навколишнього середовища для майбутніх поколінь. Дослідження та розвиток цього методу мають потенціал революціонізувати наше розуміння та способи боротьби з екологічними викликами.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1. Обґрунтування вибору фотокаталізаторів

У фотокаталізі нетоксичні напівпровідники використовуються для знищення забруднюючих речовин, присутніх у стічних водах. Цей процес включає перенесення, адсорбцію на поверхні напівпровідника, фотокаталітичні реакції, розкладання та видалення забруднюючих речовин на межі розділу.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{CdS}$  і  $\text{ZnS}$  здебільшого використовують каталізатори для методу фотокаталізу. Каталізатори  $\text{TiO}_2$  можуть досягти максимального квантового виходу з найпростішою продуктивністю.

Фотокаталіз на основі напівпровідників є передовим підходом до очищення навколишнього середовища. Завдяки своїм унікальним властивостям  $\text{TiO}_2$  можна назвати найкращим напівпровідниковим фотокаталізатором. Щоб отримати гібридний  $\text{TiO}_2$ , можна комбінувати з рядом матеріалів, включаючи метали, неметали, благородні метали та інші фотокаталізатори. Обробка гібридного  $\text{TiO}_2$  покращує властивості матеріалу, підвищуючи фотокаталітичні властивості.

Оскільки  $\text{TiO}_2$  можна комбінувати з низкою матеріалів, можна створити велику кількість гібридних фотокаталізаторів. Для виготовлення гібридних матеріалів  $\text{TiO}_2$  зараз доступний широкий спектр процесів і технологій. Вивчення техніки обробки та поєднання матеріалів, що обробляються, а також їх застосування допоможе майбутнім дослідникам у виборі матеріалу для обробки. Після відкриття фотокаталітичних властивостей  $\text{TiO}_2$  було проведено багато досліджень цього матеріалу. Сонячний фотокаталіз, з іншого боку, має обмеження щодо застосування в режимі реального часу. Навіть сьогодні ми спостерігаємо, як у всьому світі замість передових методів, таких як сонячний фотокаталіз, використовується традиційний метод.



Потрібно зробити набагато більше, щоб сонячний фотокаталіз з використанням гібридних матеріалів  $\text{TiO}_2$  можна було використовувати замість традиційного підходу, оскільки сонячний фотокаталіз є економічно ефективним, тобто ми можемо використовувати сонячне випромінювання як джерело енергії в режимі реального часу, знижуючи вартість лікування. Багаторазове використання фотокаталізатора також є перевагою. Крім того, оскільки  $\text{TiO}_2$  нетоксичний, підхід сонячного фотокаталізу є екологічно чистим.

У лабораторних умовах провели експеримент по рециклінгу. Для проведення досліджень використовувалися два зразки фотокаталізатора  $\text{TiO}_2$  у вигляді рутилу та анатазу.

Морфологія та кристалічна структура  $\text{TiO}_2$  головним чином визначають його фотокаталітичну активність. Таким чином, важливими факторами для фотокаталітичної активності  $\text{TiO}_2$  є розмір кристалітів і питома площа поверхні.

$\text{TiO}_2$  існує у двох тетрагональних формах (рутил і анатаз) і одній ромбічній формі (брукіт), що можна побачити на рисунку 3.1. Брукіт важко отримати в лабораторних умовах, тоді як рутил і анатаз отримують легко.

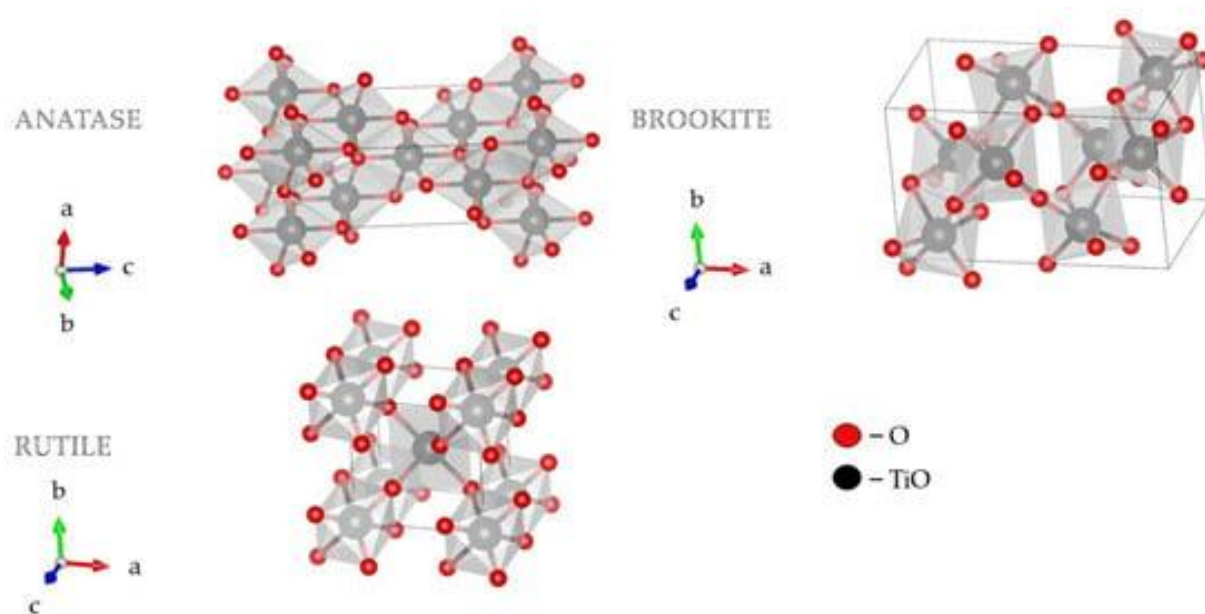


Рис. 3.1. Тривимірна візуалізація кристалічних структур  $\text{TiO}_2$  за допомогою візуалізації для електронного та структурного аналізу

Діоксид титану відноситься до класу перехідних металів і існує в декількох кристалічних модифікаціях. В основному діоксид титану має октаедри, утворені  $\text{TiO}_6$ . Кожен іон  $\text{Ti}^{4+}$  оточений шістьма іонами  $\text{O}^{2-}$ . Кожен іон  $\text{O}^{2-}$  оточений трьома іонами  $\text{Ti}^{4+}$ . Різниця між різними модифікаціями діоксиду титану полягає в елементарних комірках. Елементарна комірка рутилу складається з двох молекул  $\text{TiO}_2$ , а анатазу – з чотирьох. Крім того, рутил є найбільш стабільною модифікацією діоксиду титану.

Таблиця 3.1

Фізико-хімічні властивості зразків  $\text{TiO}_2$

Зразок	Питома поверхня, $\text{м}^2/\text{г}$	Фазовий склад				
		Анатаз, %	Середній розмір кристаліту, нм	Рутил, %	Середній розмір кристаліту, нм	Ширина забороненої зони, еВ
$\text{TiO}_2$ -C500	57	87,8	18	12,2	25	3,291
$\text{TiO}_2$ -C700	16	-	-	100,0	85	3,071

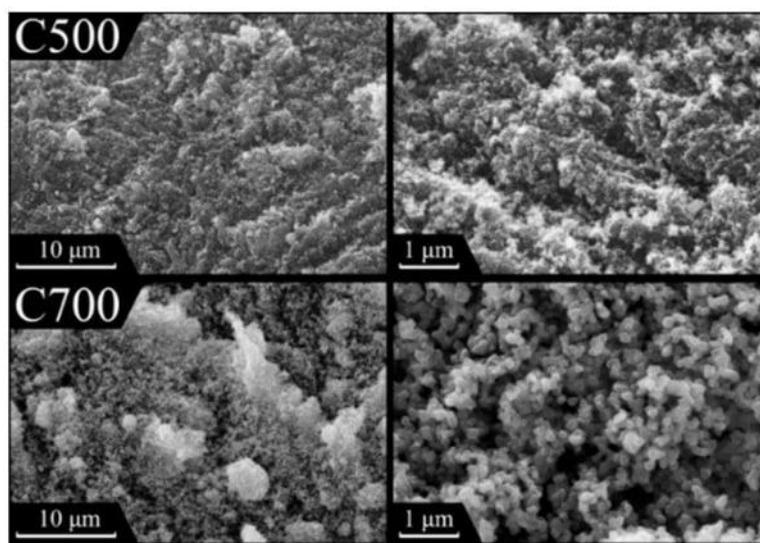


Рис. 3. 2. Вигляд зразків  $\text{TiO}_2$  після термічної обробки

На рисунку 3.2. представлені фото під мікроскопом двох зразків, різниця між цими зразками  $\text{TiO}_2$  полягає в тому, що перший зразок був оброблений при 500 градусах, інший при 700 градусах. Після такої термічної обробки змінюється питома поверхня. У першому випадку мій зразок складається з 87,8% анатазу і 12,8% рутилу. У другому випадку зразок на 100% складається з рутилу.

Питома поверхня досліджуваних зразків - оцінювалася за вимірюваннями адсорбції/десорбції азоту при 196 °C за допомогою приладу Sorptomatic 1900 (CarloErba, Мілан, Італія). Перед вимірюваннями зразки порошку дегазувалися у вакуумі при 300 °C.

Спектри дифузного відбиття зразків порошку вимірювалися за допомогою спектрофотометра Cary 5000 UV–VIS–NIR з інтегруючою сферою (Agilent, Санта-Клара, Каліфорнія, США) в діапазоні довжин хвиль 200–800 нм. Спектри відбиття фіксувалися зі спектральною роздільністю 1 нм.

Морфологія поверхні досліджуваних зразків досліджувалася за допомогою скануючого електронного мікроскопа HITACHI (HitachiHigh-Tech, Токіо, Японія), оснащеного енергодисперсійним спектрометром EDS (Thermo Noran, Worona Road Madison, WI, USA) .

### **3.2. Фактори, що впливають на фотокаталітичні властивості $\text{TiO}_2$**

Площа поверхні відіграє важливу роль у фотокаталітичній роботі нанорозмірного пористого  $\text{TiO}_2$ . А саме, чим більша площа поверхні, тим кращою буде фотокаталітична продуктивність  $\text{TiO}_2$ . Для синтезу  $\text{TiO}_2$  можна застосовувати різні методи, впливаючи на структуру пор і розподіл кристалітів за розмірами.

Вирішальні етапи процедури синтезу можуть бути скориговані для отримання більшої площі поверхні, яка може запропонувати більш активні центри адсорбції та центри фотокаталітичної реакції.

Оскільки фаза анатазу має набагато вищу фотокаталітичну активність, ніж аморфний і рутиловий  $\text{TiO}_2$ , все ще складно синтезувати мезопористий  $\text{TiO}_2$ , який

містить фазу анатазу з високою кристалічністю та великою площею поверхні. Фаза анатазу утворюється в процесі прожарювання при температурі 350 °C і вище, тоді як фаза рутилу утворюється, коли температура прожарювання досягає >600 °C. Проте висока температура прожарювання призводить до росту нанокристалічних частинок і швидкого зменшення питомої поверхні.

Фотокаталітична активність відбувається на поверхні фотокаталізаторів. Таким чином, менші наночастинки  $\text{TiO}_2$ , які мають набагато вище співвідношення поверхні до об'єму, мають більшу питому площу поверхні, доступну для каталізу. Каталізатори  $\text{TiO}_2$  були отримані в різних наноформах, таких як порошки наночастинок, нанотрубки, нанострижні, нанодропи та іммобілізовані стани (як тонкі плівки).

Інтенсивність світла є ще одним важливим фактором, який впливає на процес фотокаталітичної деградації. Серед багатьох факторів, інтенсивність світла визначає ступінь поглинання світла напівпровідниковими каталізаторами на певній довжині хвилі. Що стосується експериментальної установки, загальне перетворення забруднюючих речовин і ефективність деградації незмінно визначаються розподілом інтенсивності світла всередині реактора.

Вплив значення рН на фотокаталітичні властивості  $\text{TiO}_2$  досить складний через декілька факторів: електростатична взаємодія між поверхнею напівпровідника, молекулами розчинника, реагентами та радикалами, що утворюються під час реакції, тощо.

Значення рН розчину має важливе значення для гетерогенних фотокаталітичних реакцій, оскільки воно впливає на заряд поверхні фотокаталізатора та розмір агрегатів частинок.

Характеристики матеріалу  $\text{TiO}_2$  потенційно можуть бути змінені температурою. Це викликає зміни розміру наночастинок, складу кристалічної фази, агрегатного стану та оптичних властивостей. Усі ці аспекти мають основне значення, оскільки вони впливають на фотокаталітичні властивості поверхні  $\text{TiO}_2$ . Потенціал  $\text{TiO}_2$  сильно залежить від його кристалічної структури, середнього

розміру частинок і морфології. Питома поверхня, яка залежить від розміру частинок, є важливим параметром для покращеної каталітичної активності  $\text{TiO}_2$ .

### 3.3. Особливості технології штучного фотосинтезу для декарбонізації довкілля

Фотокаталітичні вимірювання проводяться в безперервному проточному реакторі, що складається з двох частин: нижнього циліндра, який обладнаний нагрівальним елементом і системою охолодження, а також верхнім циліндром, всередині якого поміщається фотокаталізатор і куди вводять реакційну суміш, даний реактор представлений на рисунку 3.3.

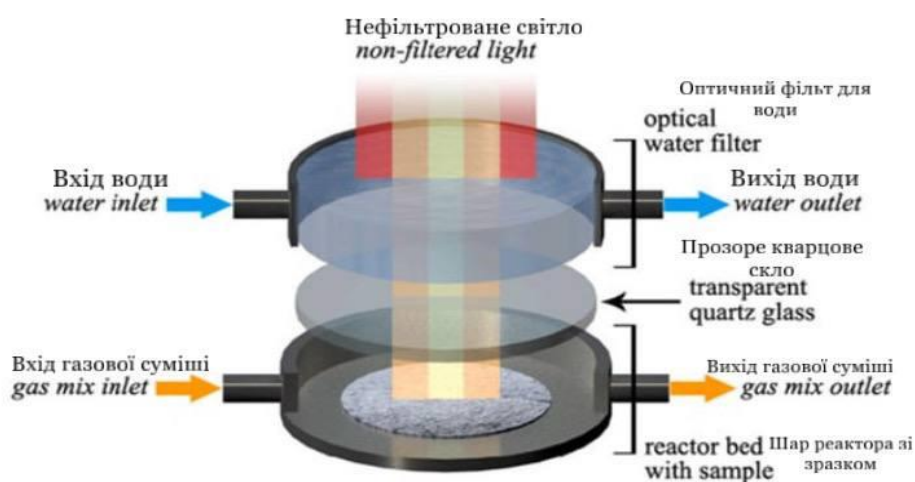


Рис. 3.3. Схематичне зображення фотокаталітичного реактора

Верхня частина закривається кварцовим склом і ущільнюється хімічно інертними прокладками. Як джерело електромагнітного випромінювання (365 нм і 465 нм) використовується діодна матриця. Площа поверхні фотокаталізатора, піддається електромагнітному випромінюванню, і становить  $10,18 \text{ cm}^2$ . Умови процесу повинні бути наступними: температура реактора  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , реакційна суміш – 5% об.  $\text{H}_2\text{O}$  – 95% об.  $\text{CO}_2$ ; і загальна витрата газу – 0,8 мл/хв, маса фотокаталізатора – 10 мг.

Вологий  $\text{CO}_2$ , отримуємо через пропускання сухого  $\text{CO}_2$  через термостатований барботер, наповнений фільтрованою водою. Температура барботера встановлюється таким чином, щоб досягти 5% води в газі. Додатково відбувається підігрів газопроводу, щоб уникнути конденсації води. Перші вимірювання проводяться щонайменше через 2 години на потоці. Аналіз продуктів реакції проводиться за допомогою on-line газового хроматографа, оснащеного полум'яно-іонізаційним детектором і капілярною колонкою HP PLOT/Q. Потрібні такі умови аналізу: газ-носій – гелій, температура детектора 220 °C, температура інжектора 120 °C.

### **3.4. Висновки до розділу**

Вивчення фотокаталізу, як методу для зменшення концентрації  $\text{CO}_2$  в атмосфері, включає розробку каталізаторів та реакційних умов, які сприяють перетворенню  $\text{CO}_2$  в цінні органічні сполуки.

Дослідження фотокаталітичних процесів включає вивчення впливу сонячного випромінювання як джерела енергії для реакцій, що перетворюють  $\text{CO}_2$ . Використання сонячної енергії підвищує ступінь екологічної чистоти процесу.

Розробка ефективних каталізаторів для фотокаталітичного перетворення  $\text{CO}_2$  є ключовою частиною досліджень. Ефективні каталізатори прискорюють реакції та підвищують виходи органічних продуктів.

Визначення оптимальних реакційних умов, таких як температура, тиск, концентрація каталізаторів та час реакції, важливо для досягнення високої ефективності фотокаталітичного процесу.

В цілому, методика дослідження фотокаталітичного перетворення  $\text{CO}_2$  є важливим етапом у розвитку зеленої хімії та сталої енергетики, спрямованим на зменшення негативного впливу людської діяльності на навколишнє середовище і подальше розвиток сталої та екологічно безпечної промисловості.

## РОЗДІЛ 4

### РЕЗУЛЬТАТИ ФОТОКАТАЛІТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ CO<sub>2</sub> З УТВОРЕННЯМ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

#### 4.1. Результати фотокаталітичного перетворення CO<sub>2</sub> зі зразком анатазу

Було проведено дослідження з рециклінгу CO<sub>2</sub> за допомогою штучного фотосинтезу.

Штучний фотосинтез використовує фотокаталізатори - речовини, які можуть поглинати світлову енергію і використовувати її для спонукання хімічних реакцій. Каталізатором в даній реакції виступає TiO<sub>2</sub>.

У процесі фотокаталітичної реакції, під дією світла, фотокаталізатори стають активними і здатними ініціювати хімічні перетворення. Вони можуть взаємодіяти з реакційними речовинами (наприклад, органічними сполуками) і сприяти формуванню нових зв'язків або розриву існуючих. Цей процес може привести до синтезу складних органічних сполук.

Мета першого експерименту – перевірити, чи відбудеться синтез речовин без використання ультрафіолетового випромінювання.

Результати проведеного дослідження свідчать, що синтез відбувався, найбільше утворювалося ацетат альдегіду, метанол і ацетон утворювалися в дуже малій кількості і лише за один проміжок часу порівняно з ацетат альдегідом, результати представлені на рисунку 4.1.

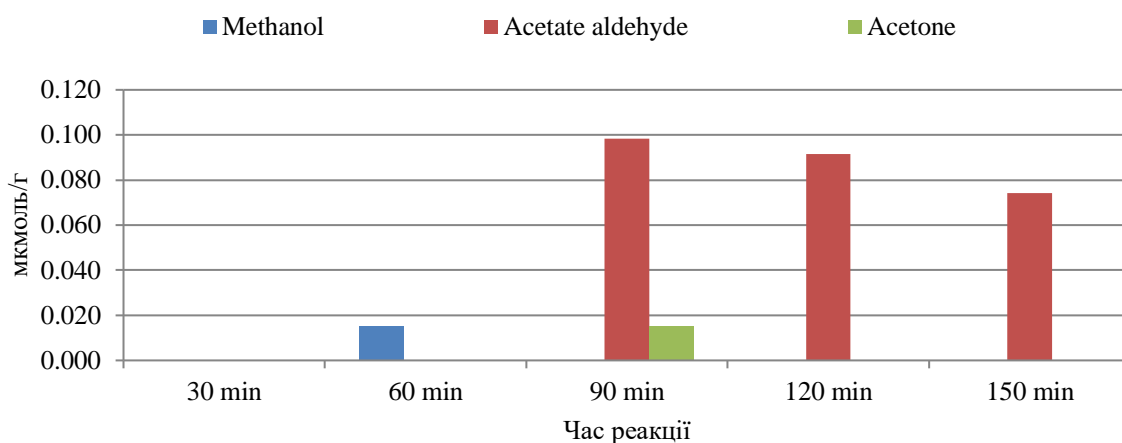


Рис. 4.1 Кількість мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину без електромагнітного випромінювання

Експеримент з анатазом під дією ультрафіолету, потужність якого становила 50% без електричного поля, показав, що кількість ацетат альдегіду з часом збільшується. Метанол почав утворюватися лише через 90 хвилин. Ацетон утворився з самого початку, в невеликій кількості, що можна побачити на рисунку 4.2.

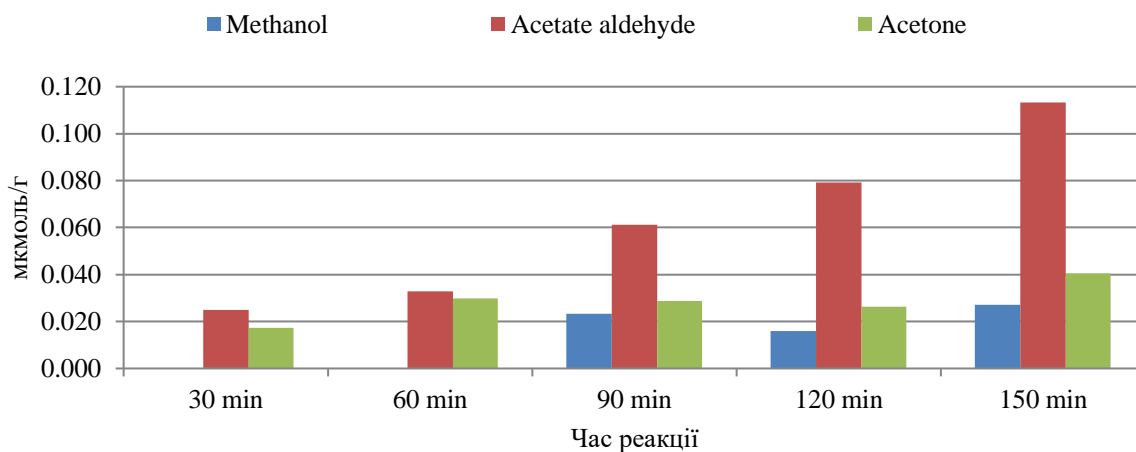


Рис. 4.2. Кількість мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину за допомогою УФ (інтенсивність 50%) випромінювання без електричного поля



При збільшенні інтенсивності УФ до 100% кількість усіх продуктів зросла в півтора рази, метанол почав утворюватися знову з 90 хв. Отже, інтенсивність УФ впливає на вихід продукції, про що свідчить рисунок 4.3.

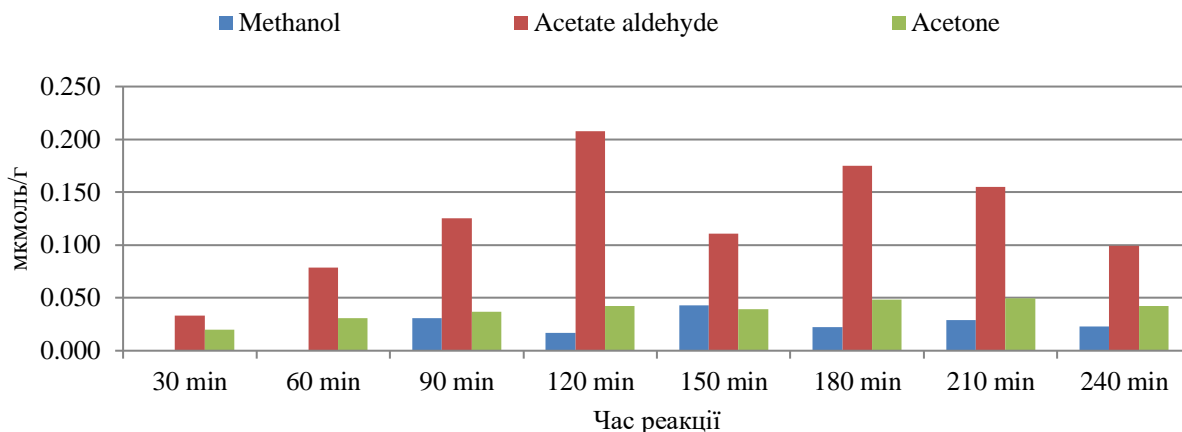


Рис. 4.3. Кількість мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину з використанням УФ (інтенсивність 100 %) випромінювання без електричного поля

При використанні 100% інтенсивності УФ випромінювання і додаванні електричного поля, що представлено на рисунку 4.4., відразу видно, що реакція пройшла краще, ніж в попередньому варіанті. Всі продукти почали утворюватися з початку експерименту. З часом всі три продукти почали знижуватися через дезактивацію каталізатора.

Порівнюючи синтез речовини за допомогою ультрафіолетового світла та електричного поля, можна чітко побачити, що кількість речовини значно збільшилася порівняно з тим, коли електричне поле було відсутнє.

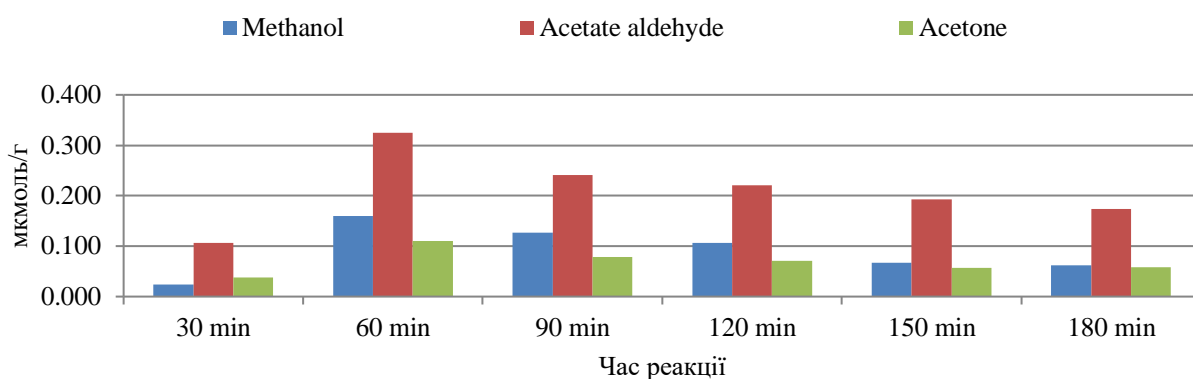


Рис. 4.4 Кількість мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину з використанням УФ (100% інтенсивності) випромінювання з електричним полем

#### 4.2. Результати фотокаталітичного перетворення CO<sub>2</sub> зі зразком рутилу

Експеримент з рутилом при використанні 100% ультрафіолетового випромінювання, без електричного поля представлений на рисунку 4.5., показав що найбільше утворюється ацетат альдегіду, ацетон починає утворюватися з 60 хвилини, а метанол – з 120 хвилин у найменшій кількості.

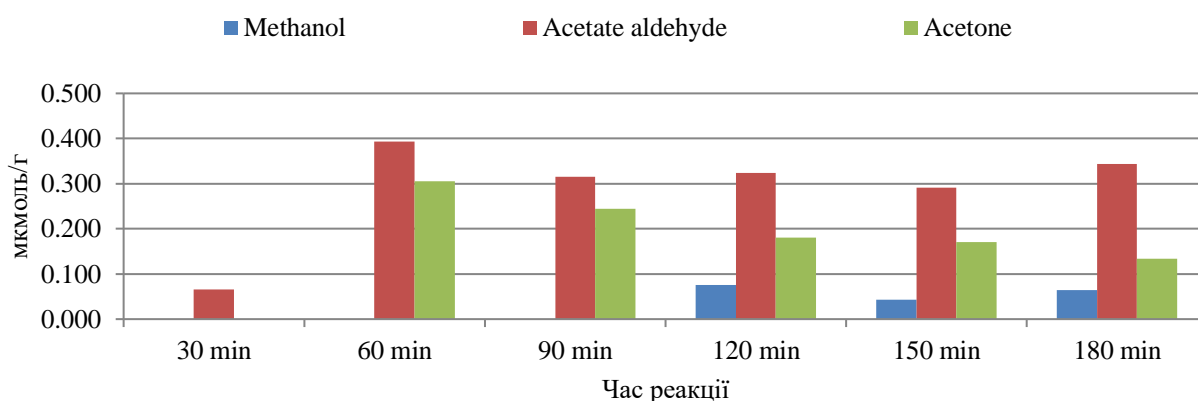


Рис. 4.5. Кількість мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину з використанням УФ (інтенсивність 100 %) випромінювання, без електричного поля

При додаванні електричного поля, що показано на рисунку 4.6., ацетон і ацетат альдегід почали утворюватися з самого початку експерименту, метанол – з 90 хвилини.

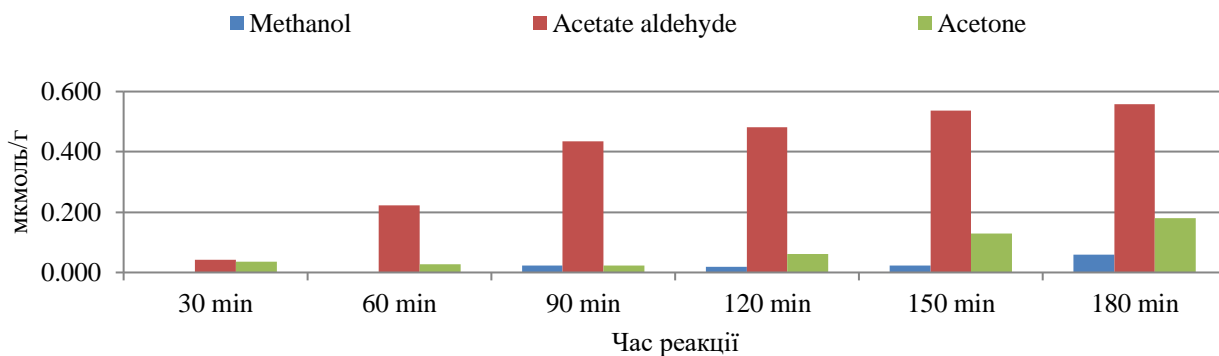


Рис. 4. 6. Кількість мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину з використанням УФ (100% інтенсивності) випромінювання з електричним полем

Дослідження з додаванням рутилу показали, що більша кількість ацетатного альдегіду утворюється за допомогою ультрафіолетового випромінювання та електричного поля. Більша кількість метанолу і ацетону утворюється без використання електричного поля.

Порівнюючи однакові умови експерименту, використання рутилу виявилось більш ефективним по відношенню до анатазу.

### 4.3. Перспективи використання утворених продуктів фотокаталізу

Утворені речовини – метанол, ацетат альдегід та ацетон є перспективними речовинами для використання та виробництва біопалива.

Метанол може використовуватись як пряме паливо для спеціалізованих двигунів або як сировина для виробництва інших паливних продуктів, таких як диметил ефір (DME) або водень. Метанол на даний момент вважається одним із найкорисніших хімічних продуктів і є перспективним будівельним матеріалом для

отримання більш складних хімічних сполук, таких як оцтова кислота, метилтретбутиловий ефір, диметиловий ефір, метиламін тощо. Метанол є найпростішим спиртом, який виглядає як безбарвна рідина з характерним запахом, яка може бути отримана шляхом перетворення  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2$ , з додатковою перевагою значного зменшення викидів  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

Як підтверджує Міжнародне енергетичне агентство, сьогодні світова економіка все ще залежить від використання викопного палива, такого як нафта, вугілля, природний газ тощо. Отже, збільшення забруднення навколишнього середовища через викиди  $\text{CO}_2$  та інших небезпечних газів, що утворюються в результаті спалювання викопного палива, спонукає як промисловість, так і наукові кола до дослідження нових і екологічних технологій, а також до використання відновлюваної сировини. В даний час водень розглядається як чисте джерело енергії, яке відіграє важливу роль у нафтопереробній, хімічній та електронній промисловості. Однак водень має деякі недоліки з точки зору труднощів у його зберіганні та транспортуванні, що негативно впливає на його широке використання.

Отже, виробництво водню з рідкого джерела, яке легко транспортувати, може представляти дійсний варіант. Метанол вважається відмінним кандидатом в якості носія водню, демонструючи низьку токсичність і легкість у використанні.

Ацетат альдегід може бути перетворений в бутанол, який може служити як замітник бензину. Бутанол має високий вміст енергії і може бути використаний у стандартних двигунах без значних модифікацій.

Ацетальдегід широко використовується у виробництві духів, ліків, оцтової кислоти, ароматизаторів, барвників тощо. Коли ацетальдегід застосовується зовнішньо протягом тривалого часу, він є токсичним, також його використовують:

- як попередник оцтової кислоти;
- як попередник похідних піридину, кротонового альдегіду та пентаеритриту;
- у виробництві смоли;
- для виробництва полівінілацетату;
- у виробництві дезінфікуючих засобів, парфумерії та ліків;

- у виробництві хімічних речовин, таких як оцтова кислота.

Ацетон є перспективною речовиною для виробництва пропанолу, який може бути використаний як альтернатива бензину або додаткове паливо для змішування з бензином.

Ацетон широко використовується як розчинник прямого застосування, на який припадає 40 відсотків світового попиту. Ацетон також використовується у виробництві бісфенолу, який виготовляється з ацетону та фенолу, а також у виробництві метилметакрилату (ММА). На ці три види використання припадає близько 85% загального попиту на ацетон.

Ацетон переважно використовується як розчинник у виробництвах покриттів, фармацевтичних препаратів, барвників і клеїв.

Розріджувач є основним використанням ацетону в промисловості покриттів. Вміст ацетону зазвичай коливається від менш ніж 10 відсотків до 50 відсотків. Розріджувач з низьким вмістом ацетону призначений для загальних фарб, які не вимагають швидкого висихання. Розріджувач часто додають у лаки, що використовуються для обробки автомобілів і меблів.

У фармацевтичній промисловості ацетон використовується як денатурант у денатурованому спирті та як носій для активних інгредієнтів у фармацевтичному виробництві ліків.

Ацетон також використовується як розчинник у виробництві волокон ацетату целюлози та підготовці вибухових речовин. У промисловості клеїв ацетон широко використовується, наприклад, у системах розчинників неопренових промислових клеїв, термозварювальних нітроцелюлозних покриттів і чутливих до тиску клеїв на основі хлоркаучуку.

Ацетон в основному конкурує з етилацетатом і метилацетатом у більш тонких застосуваннях. Незважаючи на те, що ацетон не може повністю замінити інші розчинники, такі як МІВК, МЕК і толуол, збільшення вмісту ацетону в сумішах було виявлено в кількох недорогих застосуваннях, таких як розчинники та засоби для чищення.

#### 4.4. Висновки до розділу

Після проведення експерименту основними продуктами виходу були метанол, ацетат альдегід та ацетон. Використання ультрафіолетового випромінювання та електричного поля значно вплинуло на синтез органічних речовин та їх кількість.

Метанол утворювався в найбільшій кількості зі зразком анатазу, із середнім виходом 0,040 мкмоль/год. У найбільшій кількості ацетат альдегід утворювався зі зразком рутилу, середній вихід становив 0,334 мкмоль/год. Ацетон також утворювався в найбільшій кількості зі зразком рутилу, із середнім виходом 0,124 мкмоль/год.

Фотокаталітичне перетворення  $\text{CO}_2$  з утворенням органічних речовин є важливим, оскільки  $\text{CO}_2$  є основним парниковим газом, надлишок якого в атмосфері призводить до зміни клімату. Перетворюючи  $\text{CO}_2$  на інші хімічні речовини, можна пом'якшити його вплив, зменшивши його концентрацію в атмосфері.

За рахунок фотокаталітичного перетворення  $\text{CO}_2$  можливе виробництво відновлюваного палива та хімікатів. Встановлено, що  $\text{TiO}_2$  у формі анатазу та рутилу є найпоширенішим фотокаталізатором  $\text{CO}_2$ . В обох випадках фотокаталітичне перетворення  $\text{CO}_2$  передбачає поглинання світлової енергії для створення електронно-діркових пар, які потім можуть реагувати з  $\text{CO}_2$  з утворенням різних продуктів.

Рециклінг  $\text{CO}_2$  за допомогою штучного фотосинтезу має кілька екологічних аспектів, які є перспективними для декарбонізації довкілля:

- зменшення викидів парникових газів;
- використання відновлювальної енергії;
- зменшення залежності від викопних ресурсів;
- зниження забруднення довкілля;
- закриття глобального вуглецевого циклу.

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА ПРАЦІ

#### 5.1. Аналіз шкідливих та небезпечних чинників працівника

В лабораторії екологічної хімії працівники стикаються з різними шкідливими та небезпечними чинниками, які можуть впливати на їхнє здоров'я. Ось деякі з них:

Використання різних хімічних реактивів, розчинників та реагентів може створювати небезпечні пари, гази та речовини, які можуть бути токсичними або канцерогенними.

Робота з порошками, важкорозчинними речовинами або іншими матеріалами може призвести до утворення пилу та дрібних часток, які можуть потрапити в дихальні шляхи. Також деякі хімічні речовини можуть виділяти неприємні запахи або випари, що можуть стати джерелом дискомфорту для працівників та мати потенційно негативний вплив на їхнє здоров'я.

Використання легкозаймистих речовин або несправності в обладнанні можуть створювати ризик пожежі та вибуху а посадка за довготривалим періодом, некоректна організація робочого місця та неправильне підйомно-транспортне обладнання можуть призвести до м'язових та скелетних захворювань.

В даному досліді відбувається утворення токсичних випарів під час роботи з  $\text{CO}_2$  та іншими хімічними сполуками, що може призвести до подразнення дихальних шляхів, головних болів, погіршення самопочуття. При використанні ультрафіолетового світла для активації каталізаторів може виникнути ризик для очей та шкіри (опіки, запалення).

Також деяке обладнання в лабораторії може виділяти шум або створювати вібрацію, що може впливати на слух та загальний комфорт працівників. Недостатнє використання захисного обладнання, такого як рукавички, халати, окуляри, може підвищувати ризик отруєння, опіків або інших травм.

Важливо проводити оцінку ризиків та вживати заходи безпеки для мінімізації впливу цих чинників на працівників. Це може включати належне навчання персоналу, встановлення правильних процедур безпеки, використання ефективного захисного обладнання та регулярні медичні огляди для виявлення можливих наслідків експозиції на шкідливі чинники.

## **5.2. Розробка інструкції з охорони праці в лабораторії екологічної хімії при роботі з хроматографом**

Розробка інструкції з охорони праці в лабораторії екологічної хімії при роботі з хроматографом — важлива задача для забезпечення безпеки під час проведення досліджень. Дана інструкція включає в себе:

1. Ознайомлення з приладом - провести детальне ознайомлення з хроматографом, включаючи його робочі принципи, основні компоненти та інші технічні аспекти.

2. Особистий захист - вимагати від працівників носити відповідний захисний одяг: халат, рукавички, окуляри тощо.

3. Забезпечити наявність системи вентиляції або витяжної установки для уникнення вдихання шкідливих речовин.

4. Правильність використання - навчання персоналу правильному використанню хроматографа, включаючи запуск, налагодження, зберігання та вимкнення приладу.

5. Безпека робочого середовища - підтримка чистоти та організація робочого місця для уникнення потенційних аварій чи забруднень. Проведення регулярної перевірки наявності пожежних засобів та перевірка їх робочої готовності.

6. Відходи та утилізація - інструкції щодо правильної утилізації хімічних речовин, відходів та використання контейнерів для відходів.

7. Навчання персоналу - регулярні тренінги та перевірки знань з охорони праці та правил безпеки при роботі з хроматографом. Інструкції щодо дій у випадку



аварій, витоків хімічних речовин, пожежі чи інших надзвичайних ситуацій.

Для проведення експерименту фотокаталізу слід дотримуватися елементарних правил безпеки. :Ознайомитися з хімічними речовинами,забезпечення себе захисним обладнанням таким як: респіратори, окуляри, рукавички та халат.

Обов'язково необхідний належний стан вентиляції приміщення для уникнення накопичення газів та випарів, що можуть бути шкідливими для здоров'я людини.

Також потрібно систематично проводити оцінки ризику для здоров'я персоналу та оцінку впливу хімічних речовин та відповідність стандартам безпеки. Регулярний моніторинг рівня газів та випарів для вчасного виявлення можливих небезпек та вжиття відповідних заходів. Проведення тренінгів з правил безпеки та процедур дій у випадку аварійних ситуацій.

Важливу роль відіграє розробка планів евакуації та надання інструкцій щодо першої допомоги. Виконання всіх вимог та стандартів безпеки, пов'язаних із використанням хімічних речовин та обладнанням для фотокаталізу. Проведення регулярних перевірок та обслуговування обладнання для забезпечення безперебійної та безпечної роботи.

Ці етапи охорони праці необхідно систематично впроваджувати та виконувати для забезпечення максимального рівня безпеки під час проведення досліджень з фотокаталізом CO<sub>2</sub>.

Забезпечення безпеки під час експериментів з фотокаталізом у хімічній лабораторії - це комплексний процес, що вимагає системної роботи з багатьох аспектів. Дотримання всіх правил безпеки та вжиття заходів з мінімізації ризиків є важливими для забезпечення безпеки персоналу та навколишнього середовища.

### **5.3. Пожежна безпека**

У лабораторіях зазвичай існує висока ймовірність пожежі, особливо якщо там використовуються та зберігаються розчинники. Раптові пожежі, вибухи, швидке розповсюдження вогню та висока токсичність легкозаймистих речовин є

можливими наслідками надзвичайної ситуації в лабораторії, і запобігання пожежі є ключовим для мінімізації цих ризиків.

Правильне зберігання хімікатів є основним фактором запобігання пожежам у багатьох лабораторних умовах, оскільки така проста річ, як поміщення невідповідної речовини в неправильний контейнер, може призвести до серйозного хімічного інциденту.

Необхідне належне зберігання хімікатів:

- правильне маркування хімікатів, щоб уникнути плутанини під час експериментів;
- датування хімічних речовин після їх отримання та відкриття;
- ведення поштучного обліку;
- зберігання розчинників у належних місцях, наприклад у пожежобезпечних шафах;
- уникайти зберігання скляних хімічних пляшок на підлозі чи в коридорах;
- зберігання легкозаймистих рідин у нормативному обсязі 50 літрів і менше;
- уникайти розміщення або зберігання газових балонів біля дверей виходу з лабораторії;
- зведення до мінімуму кількості легкозаймистих хімікатів у робочих зонах;
- забезпечення безпечного кріплення газових балонів. Також у лабораторії одночасно має бути лише один циліндр і один запасний.

Навчання персоналу також відіграє важливу роль у запобіганні пожежам, допомагаючи мінімізувати ризик пожежі та зупинити її поширення, якщо вона всетаки виникне. Навчання персоналу розпізнаванню того, як виникають і поширюються пожежі, є ефективним способом переконатися, що методи роботи в лабораторії найкраще розроблені для запобігання виникненню пожеж.

У разі невеликої пожежі швидкі й ефективні дії часто можуть змінити невеликий інцидент і катастрофічну надзвичайну ситуацію. Навчання персоналу має

ключове значення для того, щоб кожен співробітник лабораторії міг якомога швидше вжити ефективних заходів у разі пожежі.

Навчання персоналу необхідне включати в себе:

- наявність письмового плану, в якому докладно описано, що робити в разі надзвичайної ситуації, і тримати його під рукою в будь-який час;
- проведення формальних тренінгів, щоб персонал міг вживати відповідних дій під час надзвичайних процедур, ноу-хау про початок і поширення пожеж, як використовувати аварійне обладнання та що робити у разі пожежі;
- переконатися, що персонал постійно дотримується належної практики роботи;
- переконатися, що персонал поінформований про найближчі вогнегасники, виходи, пожежну сигналізацію, аптечки першої допомоги, аварійні душі/станції для промивання очей і телефони;
- навчання персоналу використанню шкідливих та легкозаймистих матеріалів;

Якщо лабораторне обладнання не використовується належним чином і не обслуговується, воно може стати серйозною пожежною небезпекою.

Для того щоб переконатися, що обладнання обслуговується належним чином, необхідно виконати такі дії:

- дотримання всіх обмежень щодо обладнання;
- використання обладнання тільки за призначенням;
- заземлення всіх металевих бочок і перевантажувальних ємностей.

Якщо персонал не носить належне захисне спорядження під час роботи з небезпечними хімічними речовинами, то ймовірність пожежі та травмування обов'язково зростає.

Не залишайти речі напризволяще, дотримуючись цих передових методів захисного обладнання:

- забезпечення постійного носіння відповідного захисного одягу та обладнання;
- тримати всі щитки та двері капота на місці;

- тримати двері лабораторії та протипожежні двері постійно закритими;
- перевіряти, що на хімічних витяжних шафах є наклейки поточної перевірки, а стулка залишається закритою, наскільки це можливо.

#### 5.4. Висновки до розділу

Після детального аналізу шкідливих та небезпечних чинників при проведенні досліджень з фотокаталізом CO<sub>2</sub>, можна зробити кілька важливих висновків:

Застосування захисного обладнання, такого як респіратори, окуляри, халати і рукавички, виявилось критично важливим для захисту працівників від шкідливих речовин і випарів.

Забезпечення належної вентиляції робочого середовища та постійний моніторинг рівня газів і випарів є ключовими для запобігання накопиченню шкідливих речовин у приміщенні.

Навчання персоналу правилам безпеки, процедурам дій у випадку аварійних ситуацій і коректному використанню захисного обладнання є необхідними для забезпечення їхньої безпеки, а також важливе регулярне технічне обслуговування обладнання, що використовується в експериментах, щоб уникнути аварійних ситуацій та травм.

Розробка планів евакуації та навчання персоналу діяти в екстрених ситуаціях є ключовим для запобігання травм та максимізації безпеки.

Ці дії можуть забезпечити максимальний рівень безпеки працівників, які займаються дослідженнями з фотокаталізом CO<sub>2</sub> та працюють з газовим хроматографом.

## ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що декарбонізація довкілля – це систематичний перехід від використання вуглеводнів до чистих, відновлюваних джерел енергії, включаючи сонячну та вітрову енергію, який базується на технологічному розвитку, міжнародному співробітництві, політичному регулюванні, зміні енергетичного споживання та соціальному впливі для зменшення викидів CO<sub>2</sub> та сприяння стійкому розвитку.

2. Обґрунтовано, що механізм CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), розроблений Міжнародною організацією цивільної авіації (ІКАО) з метою зменшення викидів парникових газів в авіаційній галузі. CORSIA охоплює міжнародні польоти і включає країни зі значними обсягами авіаційного трафіку, забезпечуючи універсальність та рівність участі різних країн у зменшенні викидів. Також даний механізм передбачає використання вуглецевих кредитів для компенсації викидів, що дозволяє авіакомпаніям придбати кредити за проекти зменшення викидів CO<sub>2</sub> в інших секторах, забезпечуючи зниження впливу авіаційної галузі на зміни клімату. Схема вимагає від авіакомпаній регулярно звітувати про свої викиди, що сприяє збільшенню транспарентності та відповідальності перед зменшенням викидів. CORSIA запроваджено в два етапи: з 2021 року вступили в дію пілотні фази для певних країн, а повне впровадження для всіх країн заплановано з 2027 року.

3. Встановлено, що фотокаталіз є перспективним методом конверсії парникових газів, зокрема CO<sub>2</sub>, в органічні речовини, використовуючи світло та каталізатори. Основна особливість полягає в застосуванні спеціальних матеріалів, які активуються світлом (ультрафіолетове світло та/або електричний струм) для спровокування хімічних реакцій. Цей процес базується на фотохімічних реакціях, які відбуваються на поверхні каталізатора під впливом світла. При фотокаталізі CO<sub>2</sub> розщеплюється або перетворюється в інші сполуки за участю фотокаталізатора – TiO<sub>2</sub>. Сам процес включає відбування різних фаз: поглинання світла каталізатором,

утворення електрон-діркових пар, які активують хімічні реакції з молекулами CO<sub>2</sub>. Одна з основних переваг фотокаталізу полягає у його потенціалі перетворювати CO<sub>2</sub> в речовини, які можуть мати практичне застосування, такі як паливо або проміжні хімічні продукти.

4. Визначено, що ефективність фотокаталізу у конверсії CO<sub>2</sub> може варіюватися в залежності від багатьох факторів, таких як тип каталізатора, умови реакції та сама структура каталізатора. Деякі дослідження показують високий потенціал ефективності фотокаталізу в конверсії CO<sub>2</sub> до органічних речовин, однак існує необхідність удосконалення процесів для досягнення більшої продуктивності та вищої конверсії CO<sub>2</sub>.

5. Визначені екологічні аспекти фотокаталізу CO<sub>2</sub>. Застосування цього методу є перспективним для зменшення викидів парникових газів. Конверсія CO<sub>2</sub> в органічні хімічні сполуки або палива може зменшити його концентрацію в атмосфері, сприяючи при цьому зниженню ефекту парникового газу. Використання фотокаталізу може стати ключовим екологічно чистим методом для перетворення CO<sub>2</sub> в органічні речовини.

6. Встановлено, що для підвищення ефективності та практичності фотокаталізу у зменшенні викидів парникових газів, рекомендується проведення подальших досліджень у напрямках покращення каталізаторів, оптимізації процесів та підвищення продуктивності реакції. Також важливим є вивчення можливостей впровадження цього методу на практиці, включаючи розробку ефективних реакторів та технологій для широкомасштабного використання фотокаталізу у зменшенні викидів CO<sub>2</sub>.

## СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ

### ДЖЕРЕЛ

1. The Lofoten Declaration: A Global Call for Climate Leadership. The Lofoten Declaration. <http://www.lofotendeclaration.org/> (дата звернення: 15.10.2023).
2. The Production Gap Report: 2020 Special Report / SEI, IISSD, ODI, E3G, UNEP, December 2020. <https://productiongap.org/> (дата звернення: 15.10.2023).
3. Transport Decarbonisation Alliance. <http://tda-mobility.org/> (дата звернення: 16. 10. 2023).
4. Growing momentum: Global overview of government targets for phasing out sales of new internal combustion engine vehicles - International Council on Clean Transportation. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/blog/staff/global-ice-phaseout-nov2020> (дата звернення: 21. 10. 2023).
5. Journal Economy and the State - a scientific publication of Ukraine on economic issues. [http://www.economy.in.ua/pdf/1\\_2021/28.pdf](http://www.economy.in.ua/pdf/1_2021/28.pdf) (дата звернення: 21. 10. 2023).
6. Definition of photosynthesis, stages, equations, process and diagram. Microbiology Notes - Online Biology Notes. <https://microbiologynote.com/uk/photosynthesis/> (дата звернення: 25.10.2023).
7. Що таке декарбонізація і якими темпами потрібно її втілювати, аби стримати зміну клімату?. Екодія. URL: <https://ecoaction.org.ua/shcho-take-dekarbonizatsiia.html> (дата звернення: 28.10.2023).
8. Monitoring global carbon emissions in 2022 - Nature Reviews Earth & Environment. Nature. URL: <https://www.nature.com/articles/s43017-023-00406-z> (дата звернення: 01.11.2023).
9. World Emissions Clock. World Emissions Clock. URL: <https://worldemissions.io/> (дата звернення: 06.11.2023).
10. Arctic Sea Ice News and Analysis | Sea ice data updated daily with one-day lag. Homepage | National Snow and Ice Data Center. URL:

<https://nsidc.org/arcticseaicenews/> (дата звернення: 06.11.2023).

11. URL: <https://www.agora-energiawende.de/en/press/news-archive/renewables-overtake-gas-and-coal-in-eu-electricity-generation-1/> ( дата звернення 11. 11. 2023).

12. URL: [https://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_05\\_57\\_1140.html](https://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_05_57_1140.html) (дата звернення: 14.11.2023).

13. The Lofoten Declaration: A Global Call for Climate Leadership. The Lofoten Declaration. URL: <http://www.lofotendeclaration.org/> (дата звернення: 14.11.2023).

14. CCUS in Clean Energy Transitions – Analysis - IEA. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions> (Дата звернення: 18.11.2023).

15. URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions> (Дата звернення: 19.11.2023).

16. Governo de Portugal. XXIII Governo - República Portuguesa. URL: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc22/comunicacao/comunicado?i=plano-nacionalenergia-e-clima-2030-aprovado-em-conselho-de-ministros> (Дата звернення: 22.11.2023).

17. URL: <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/house-bill/9/text> (Дата звернення: 23.11.2023).

18. EU Emissions Trading System (EU ETS). Climate Action. URL: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en) (date of access: 26.11.2023).

19. Carbon Pricing Dashboard | Up-to-date overview of carbon pricing initiatives. Carbon Pricing Dashboard | Up-to-date overview of carbon pricing initiatives. URL: [https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map\\_data](https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data) (Дата звернення: 02.12.2023).

20. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (дата звернення: 02.12.2023).

21. International Institute for Sustainable Development. International Institute for Sustainable Development. URL: <https://www.iisd.org/> (Дата звернення: 03.12.2023).

22. Climate Watch. World Resources Institute. URL: <https://www.wri.org/initiatives/climate-watch> (Дата звернення: 04.12.2023).



23. «Energy Policy Act Summary» - Environmental Protection Agency (EPA). URL: [https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-energy-policy-act#:~:text=The%20Energy%20Policy%20Act%20\(EPA,%3B%20\(10\)%20energy%20tax%20incentives](https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-energy-policy-act#:~:text=The%20Energy%20Policy%20Act%20(EPA,%3B%20(10)%20energy%20tax%20incentives) (Дата звернення: 04.12.2023).
24. «House Bill 1315 (116th Congress)» - Конгрес США. URL: <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/house-bill/1315/text> (Дата звернення: 04.12.2023).
25. CO<sub>2</sub> emission performance standards for cars and vans. Climate Action. URL: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en) (Дата звернення: 04.12.2023).
26. ENERGY STAR. ENERGY STAR | The simple choice for energy efficiency. URL: <https://www.energystar.gov/> (Дата звернення: 05.12.2023).
27. Renewable energy explained - U.S. Energy Information Administration (EIA). Homepage - U.S. Energy Information Administration (EIA). URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/> (Дата звернення: 06.12.2023).
28. «Renewable Energy - European Commission» - Європейська комісія з енергетики, зміни клімату та довкілля. URL: [https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/topics/energy-strategy-and-energy-union/renewable-energy\\_en](https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/topics/energy-strategy-and-energy-union/renewable-energy_en) (Дата звернення: 06.12.2023).
29. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). Home. URL: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx> (Дата звернення: 06.12.2023).
30. «Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA).» <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx> (Дата звернення: 08.12.2023).
31. International Air Transport Association (IATA). 2020. «Offsetting CO<sub>2</sub> Emissions with CORSIA.» URL: <https://www.iata.org/en/programs/environment/corsia/> (Дата звернення: 08.12.2023).
32. «CORSIA Implementation Elements.» URL:

<https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/implementation-elements>  
(Дата звернення: 10.12.2023).

33. Coronado J. M. Design of Advanced Photocatalytic Materials for Energy and Environmental Applications. / J. M. Coronado, F. Frenso. - Green Energy and Technology, 2013. – 348 с.

34. «Transition-Metal-Catalyzed Carbonylation Reactions of Olefins and Alkynes: A Personal Account» - Wiley Online Library. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201411096> (Дата звернення: 10.12.2023).

35. Linsebigler Amy L. Photocatalysis on TiO<sub>2</sub> Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results / Amy L. Linsebigler, Lu Guangquan, John T. Yates // Chemical Reviews. – 1995. – V.95, № 3. – P.735–758.

36. Korzhak A. V., Ermokhina N. I., Stroyuk A. L. et al. // J. Photochem. and Photobiol. A. — 2008. — Vol. 198. — P. 126—134.

37. Mori K., Yamashi H., Anpo M. // RSC Advances. — 2012. — Vol. 2. — P. 3165—3172.

38. Павлишин В. І., Довгий С. О. Мінералогія : у 2 ч. Київ : КНТ, 2014. Ч. 2. 528 с.

39. Кострикин А. В. ИК-спектр гидратированного диоксида титана / А. В. Кострикин, Р. В. Кузнецова, О. В. Косенкова, А. Н. Меркулова, И. В. Линько // Вопросы современной науки и практики. – 2007. – Т. 8, № 2. – С. 181–186. – Бібліогр.: с. 185–186.

40. Marzec A. Preparation of nanocrystalline composite TiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> powders using sol-gel method combined with hydrothermal treatment [Text] / A. Marzec, P. Zbigniew // Process. Appl. Ceram. – 2016. – Vol. 10, № 4. – P. 249–256.

41. Мізілевська М. Г. Гідротермальний синтез нанодисперсного діоксиду титану (огляд) / М. Г. Мізілевська, В. О. Коцюбинський, О. Х. Тадеуш, В. М. Сачко, О. Ю. Оренчук // Фізика і хімія твердого тіла. – 2016. – Т. 17, № 1. – С. 98–107. – Бібліогр.: с. 105–106.