

**МІНІСТЕРСТВО ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ
УКРАЇНИ**

**НАУКОВО-ДОСЛІДНА УСТАНОВА
«УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ»**

XX МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА:
ПРОБЛЕМИ І ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ СТАТЕЙ

19-20 вересня 2024 р.
м. Харків, Україна

Харків 2024

УДК 502.58:504.064.4

Електронний примірник.

Розміщено на офіційному сайті згідно рішення Вченої ради УКРНДІЕП

Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей
XX Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків,
19-20 вересня 2024 р.) / УКРНДІЕП., 2024. — 446 с.

У збірнику наукових статей висвітлено проблеми, що пов'язані з регіональною екологією, охороною атмосферного повітря та водних об'єктів, переробкою промислових та побутових відходів, моніторингом навколишнього природного середовища, радіоекологічною безпекою та екологічно чистими енергозберігаючими технологіями.

Збірник розраховано на вчених та спеціалістів академічних та галузевих науково-дослідних і проектних інститутів, керівників підприємств різних форм власності, організацій МОЗ України, представників департаментів екоресурсів обласних та міських державних адміністрацій та екологічних інспекцій, управлінь з питань надзвичайних ситуацій, органів державної виконавчої влади та місцевого самоврядування і громадських організацій.

Статті надруковано за авторською редакцією.

© Укладач Науково-дослідна установа
«Український науково-дослідний
інститут екологічних проблем»
(УКРНДІЕП), 2024

ЗМІСТ

Гриценко А. В., Васенко О. Г., Карлюк А. А., Черба О. В.	10
Формування національної доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні у період дії воєнного стану	
Гриценко А. В., Маркіна Н. К., Михайленко В. Г.	16
Обґрунтування водоохоронних заходів для забезпечення екологічно прийнятних умов експлуатації накопичувача шахтних вод в балці Свистунова	
Авдієнко І.А., Юрченко В.О.	24
Розрахунок утворення закису азоту в процесі біологічної очистки стічних вод	
Адамова Г. В., Пісня Л. А.	27
Кібербезпека в системі «автомобіль-дорога-середовище»: виклики, ризики та заходи захисту	
Андронов В. А., Данченко Ю. М.	33
Екологічна безпека полігонів токсичних відходів в зоні бойових дій Харківського регіону	
Аніщенко Л. Я., Свердлов Б. С., Сорокін М. В., Железняк М. Й.	38
Оцінка впливу планованої реконструкції глибоководного суднового ходу Дунай – Чорне море на гідрологічний режим основних рукавів Кілійської дельти	
Антощенков Р. В., Галич І. В., Черепньов І. А., Адамова Г. В.	53
Аналіз досліджень впливу сільськогосподарської механізації на довкілля, здоров'я операторів та агропродукцію	
Бабіч О. В., Білоус В. Б., Какуня С. О.	60
Руйнування конструкційних трубопроводів в системі водопостачання (аналітичний огляд)	
Бєлоконь К. В., Мальований М. С., Проскурнін О. А., Цапко Н. С., Комариста Б. М.	66
Оптимальне розміщення пунктів контролю за станом атмосферного повітря у мегаполісах	
Борисенко О. М., Логвінков С. М., Шабанова Г. М., Іщенко А. М., Ареф`єв В. О.	69
Екологічні аспекти експлуатації обертових цементних печей	

Миргород О. В., Пирогов О. В., Рудаков С. В.	293
Основні матеріали, що застосовуються у будівництві для вогнезахисту сталевих конструкцій	
Михайлова Є. О.	296
Особливості утилізації карбон (IV) оксиду шляхом його геологічної мінералізації	
Монін В. Л.	303
Використання надмірної рослиної біомаси Азовського моря як способу розвантаження його екосистеми	
Ольховик Ю. О.	308
Щодо стану функціонування київського спецкомбінату «РАДОН»	
Оськіна М. В, Гончаренко І. О.	313
Небезпечний вплив поліциклічних ароматичних вуглеводнів при спалюванні біомаси: огляд сучасних досліджень	
Проскурнін О. А., Жук В. М., Суліма Є. О., Цапко Н. С.	323
Врахування динаміки водонепроникності ґрунту при нормуванні скидання забруднювальних речовин з дощовими стічними водами	
Радомська М. М., Ярошенко Д. Р.	329
Дослідження екологічної ситуації у функціональних зонах міста Боярка методом біоіндикації	
Романова К. О., Мітченко І. О.	335
Особливості стабілізації факелу та шляхи зниження викидів оксидів азоту при спалюванні водневого палива	
Серпухов М. Ю., Димерцов Д. О.	340
Методика викладання STEAM уроку з радіаційної безпеки для закладів середньої освіти	
Сидоренко В. Л., Бондаренко О. О., Положешний В. В.	344
Деякі аспекти оцінки ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря	
Сікідіна Т. М., Забара І. І.	352
Сезонні коливання індикаторних мікроорганізмів на міських очисних спорудах	

Михайлова Є. О., канд. техн. наук, доц.

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна

ОСОБЛИВОСТІ УТИЛІЗАЦІЇ КАРБОН (IV) ОКСИДУ ШЛЯХОМ ЙОГО ГЕОЛОГІЧНОЇ МІНЕРАЛІЗАЦІЇ

Карбон (IV) оксид або вуглекислий газ (CO_2) відноситься до парникових газів прямої дії, які формують природний парниковий ефект на нашій планеті. Ці речовини погано пропускають інфрачервоне випромінювання, що вивільнюється поверхнею Землі, тому тепло утримується над планетою, не виходячи за межі атмосфери. Рівень CO_2 в атмосферному повітрі почав стабільно зростати ще в XIX столітті, на початку промислової революції. За словами вчених, тоді він не перевищував 280 ppm (ppm (Parts Per Million) у перекладі «частинок на мільйон»).

На сьогоднішній день концентрація карбон (IV) оксиду в атмосфері є найвищою і зростає швидше, ніж будь-коли в історії людства, внаслідок активних антропогенних викидів. Останні кілька років рекорд рівня CO_2 оновлюється регулярно. За даними Погодної обсерваторії на Мауна-Лоа (Гаваї), яка веде спостереження за різними показниками земної атмосфери з кінця 1950-х років, вміст CO_2 в атмосфері у квітні 2024 року на 4,7 ppm був вищий, ніж рік тому. Це найвищий стрибок за весь час відстеження подібних показників. За останніми показаннями концентрація вуглекислого газу в атмосфері наблизилася до 427 ppm, що на понад 50 % перевищує доіндустріальний рівень (рис. 1) [1].

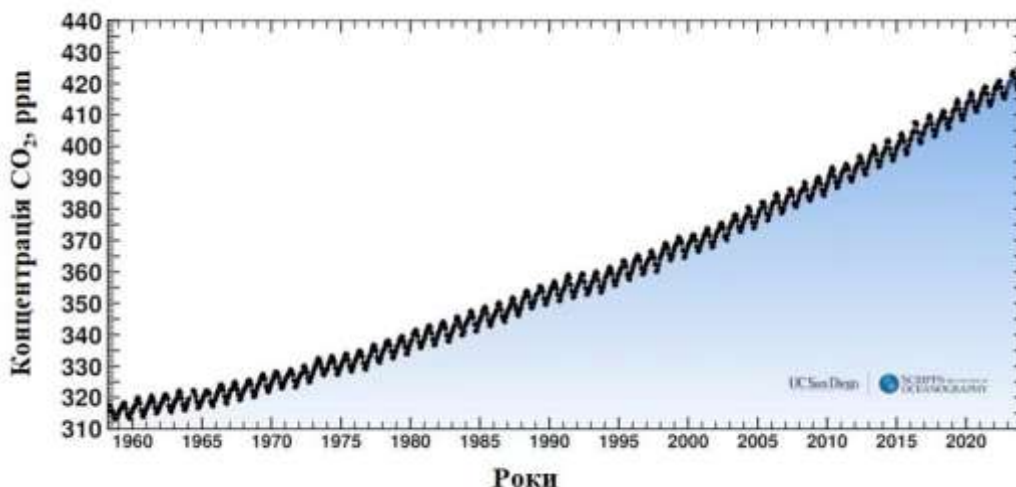


Рисунок 1 – Концентрація карбон (IV) оксиду за роки спостережень обсерваторії Мауна-Лоа [1]

Вчені вважають, що зростання рівня вуглекислого газу в атмосфері відбувається, головним чином, через використання викопного палива, такого як вугілля, нафта та природний газ. Викопне паливо забезпечує понад 98 % світової потреби в енергії. Значну частку у підвищенні концентрації CO₂ у повітрі мають виробництва сталі, алюмінію, цементу, продуктів неорганічного синтезу тощо. Таким чином, бурхливий розвиток енергетики і промисловості у подальшому спричинить ще більш стрімке зростання антропогенних викидів карбон (IV) оксиду. Очікується, що у 2050 році концентрація CO₂ в атмосфері досягне 550 ppm. Висока концентрація вуглекислого газу посилює природний парниковий ефект, що призводить до підвищення глобальної температури Землі. А це, у свою чергу, сприяє таненню льодовиків, підвищенню рівня і кислотності вод Світового океану, появі аномальних природних явищ, які мають руйнівний характер, ставить під загрозу забезпеченість людей житлом, їжею і водою [2].

Отже, необхідні ефективні рішення для подолання цієї зростаючої небезпеки, за умови задоволення енергетичних і промислових потреб людства. Для обмеження підвищення температури Землі потрібно істотне і стійке скорочення чистого потоку CO₂ в атмосферу. Міжнародною ініціативою протидії глобальному потеплінню виступає Паризька кліматична угода, яка була прийнята ООН у 2015 році. Цей документ спрямований на утримання зростання глобальної температури «значно нижче 2 °C» від доіндустріального рівня та продовження зусиль щодо обмеження підвищення температури до 1,5 °C, «визнаючи, що це значно зменшить ризики та наслідки зміни клімату». За даними Міжнародного енергетичного агентства (2017 рік) цілі Паризької угоди можуть бути досягнуто шляхом розширення вже доступних стратегій до їхніх максимальних практичних меж. Це означає, що не потрібно покладатися на непередбачені прориви в технології – для просування необхідно застосування вже існуючих технологій у всьому світі [3].

На теперішній час існує декілька варіантів вирішення проблеми глобальної зміни клімату, які розглядаються науковцями і провідними світовими компаніями, а саме:

- зменшення викидів CO₂ у процесі виробничої діяльності [4];
- утилізація CO₂ шляхом виготовлення цінних промислових товарів (палива, карбаміду, метанолу, карбонатного волокна (карбопластику) тощо) [5];
- збільшенні кількості поглиначів, наприклад, проекти з посадки лісів або іншої рослинності [6];
- зберігання CO₂ у геологічних шарах [7].

Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату зроблено висновок, що саме уловлювання та геологічне зберігання вуглецю (Carbon capture and storage (CCS)) можна розглядати як важливу проміжну технологію для скорочення викидів вуглекислого газу від великих енергетичних і промислових об'єктів. Технологія CCS включає вловлювання CO₂ з точкових джерел (промислових димових газів) з подальшим його відділенням, транспортуванням, закачуванням та зберіганням у відповідному природному резервуарі з постійним моніторингом.

Резервуарами для зберігання можуть бути різні геологічні утворення, такі як виснажені нафтові або газові свердловини, недоступні вугільні пласти та солоні водоносні горизонти. На практиці такі місця зберігання матимуть обмеження як щодо потужності зберігання карбон (IV) оксиду, так і щодо швидкості його закачування, залежно від геологічних характеристик пласта.

Найбільш складною з усіх технологічних операцій CCS є безпечне зберігання вуглекислого газу. Це пояснюється великим об'ємом CO₂, який потрібно зберігати, а також тенденцією чистого CO₂ (будь то газ або надкритична форма) знов мігрувати до поверхні землі, якщо не зберігати його належним чином [3].

Наразі розглядаються два можливі варіанти геологічного зберігання вуглекислого газу. Перший варіант полягає у закачуванні вловленого CO₂ до породи-колектора, де він буде фізично утримуватися завдяки наявності перекриваючого непроникного шару гірської породи – так званої «породи-покришки», яка перешкоджатиме міграції карбон (IV) оксиду до поверхні (рис. 2, а). Необхідно врахувати, що наявність навіть невеликої кількості інших речовин, таких як H₂O, H₂S, SO_x, NO_x, N₂, O₂ у газі, що закачується, впливатиме на фізичні і хімічні властивості CO₂ та його поведінку в умовах колектору. А це вимагає попереднього очищення промислових газових викидів від небажаних домішок. Отже, ключ до такого зберігання полягає в тому, щоб гарантувати, що в системі достатньо резерву міцності для забезпечення тривалого зберігання вуглекислого газу без витоку [7].

Другий варіант зберігання вуглецю передбачає закачування розчиненого у воді CO₂ у реакційноздатні породи, такі як базальти або ультраосновні породи, що призводить до його перетворення в стабільні карбонатні мінерали (кальцит, доломіт або магнезит) (рис. 2, б). Геологічна мінералізація дозволяє надійно зафіксувати вуглекислий газ у надрах і знизити ризик його повернення в атмосферу [8].

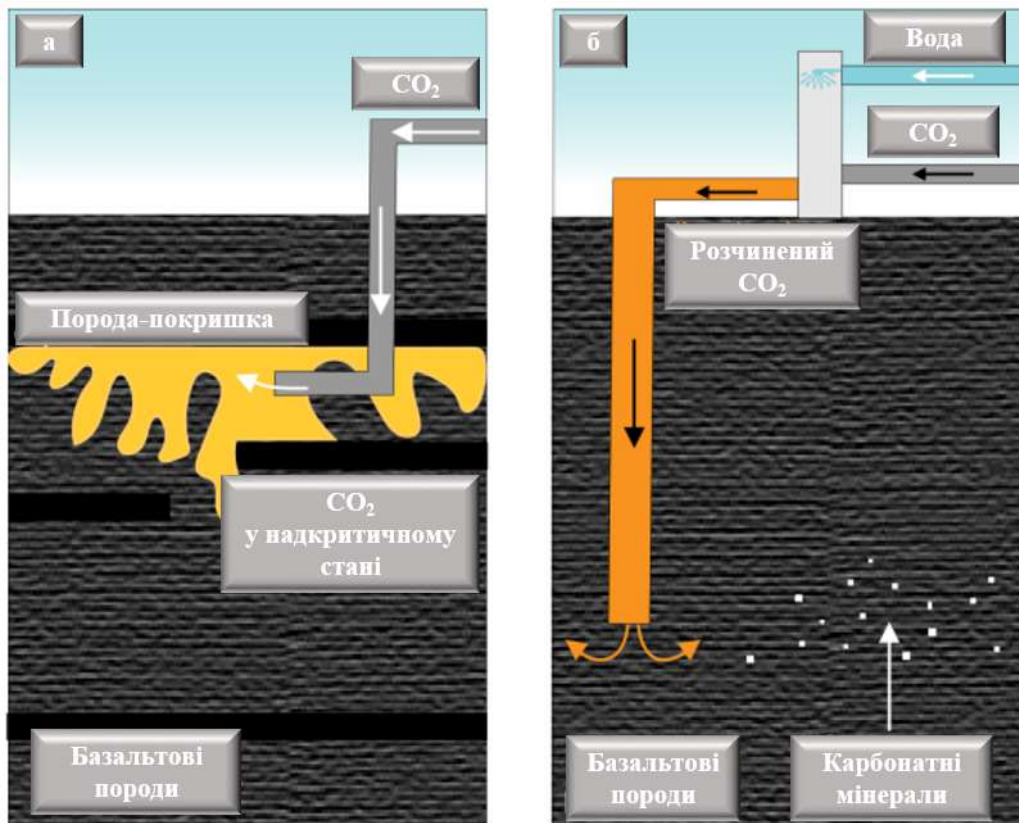


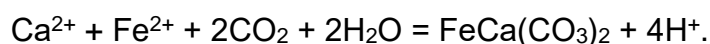
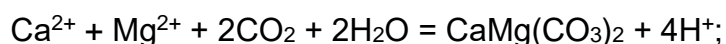
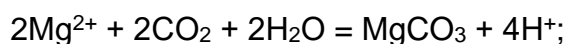
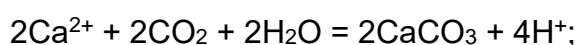
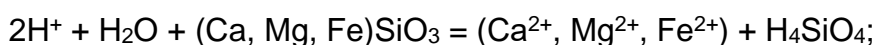
Рисунок 2 – Способи геологічне зберігання карбон (IV) оксиду [3]:
а) без мінеральної карбонізації; б) з мінеральною карбонізацією

Мінеральна карбонізація вуглецю найбільш ефективна в базальтових і ультраосновних породах через їх високу реакційну здатність і значну кількість катіонів двовалентних металів (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+}), що містяться в силікатах. Базальти є найпоширенішою магматичною породою на Землі. Вони займають близько 70 % земної поверхні: більшу частину дна Світового океану і трохи більше 5 % материків. Хоча поширеність базальтових порід обмежена, через процеси їх вивітрювання відбувається приблизно 30 % природного вилучення CO_2 з атмосфери. Це демонструє високий потенціал застосування базальтів для геологічної мінералізації карбон (IV) оксиду. Проведені дослідження свідчать, що базальтова основа може зберігати понад $100 \text{ кг CO}_2/\text{м}^3$. Згідно цієї оцінки загальний потенціал зберігання вуглекислого газу на порядки більший, ніж кількість CO_2 , отриманого від спалювання всього викопного палива на Землі [3].

З точки зору довгострокового геологічного зберігання спосіб закачування карбон (IV) оксиду в пласт із силікатними породами має ряд особливостей. Необхідною умовою є те, що породи повинні бути збагачені сполуками кальцію, магнію чи заліза. Базальтові породи за Р. Делі мають наступний середній хімічний склад щодо зазначених вище сполук (% мас.): CaO – 8,95; MgO – 6,17; FeO – 6,37. Основна маса

базальтів складена мікролітами плагіоклазів, клинопіроксену, піроксену, магнетиту або титаномагнетиту, а також вулканічним склом.

Процес мінеральної карбонізації відбувається шляхом взаємодії розчиненого у воді вуглекислого газу з породами геологічного шару. Вода, насичена CO₂, має кисле середовище (рН = 3–5), що сприяє розчиненню силікатних мінералів і вивільненню катіонів кальцію, магнію і заліза. Значення рН залежить від парціального тиску CO₂, складу розчину та температури системи. Далі відбувається утворення відповідних карбонатних мінералів. Схематично процес можна представити наступним чином:



Ступінь утворення стабільних карбонатних мінералів буде залежити від хімічної природи катіона, рН розчину та температури середовища. Розчинений кальцій випадає в осад (CaCO₃) у вигляді кальциту і/або арагоніту при температурі близько 28 °С. Однак, розчинений магній утворює осад магнезиту (MgCO₃) і доломіту (CaMg(CO₃)₂) при температурах 80 °С і вище. При більш низьких температурах випадання цих мінералів кінетично пригнічується. У таких умовах утворюються лише менш стійкі карбонати магнію у вигляді таких мінералів, як гідромагнезит, дипініт і нескугоніт. Механізм утворення карбонатів заліза поки що залишається незрозумілим. Дуже рідко осаджується в геологічних шарах мінерал сидерит (FeCO₃); частіше відбувається утворення анкериту (FeCa(CO₃)₂) за умови невисокої температури (близько 25 °С) [3].

Формування карбонатних мінералів може тривати від декілька місяців до декілька років. Швидкість процесу визначатиметься температурою процесу осадження. Із зростанням температури час утворення осадів зменшується. Так, у проведеному пілотному експерименті осадження карбонатів при температурі 20–50 °С відбувалося протягом двох років, а при 60–260 °С – протягом кількох місяців [9].

Слід зазначити, що варіант геологічного зберігання карбон (IV) оксиду за допомогою мінеральної карбонізації має значну перевагу порівняно з варіантом без посиленої мінералізації. У цьому випадку вуглець у геологічних шарах перебуває у вигляді твердих карбонатних мінералів, відносно стабільних протягом тривалого часу, ніж CO₂ у надкритичному стані, який може мігрувати до земної поверхні. Крім того, можливо закачування розчину вуглекислого газу будь-якої чистоти, оскільки наявність домішок не впливає на ефективність процесу мінералізації.

Таким чином, CCS має перспективу стати ключовою технологією для:

- зменшення викидів від електростанцій, що працюють на викопному паливі;
- обмеження викидів від багатьох промислових процесів, таких як сталь, алюміній і виробництво цементу;
- забезпечення «негативних викидів» шляхом поглинання CO₂ безпосередньо з повітря.

Запровадження подібних схем повинно збільшитися в наступні роки за-для досягнення цільових показників скорочення викидів карбон (IV) оксиду, передбачених Паризькою угодою, як однією з передумов сталого розвитку суспільства та ефективного переходу до економіки замкнутого циклу. Хоча багаточисельні літературні данні не доводять визначальну роль економіки замкнутого циклу у створенні сталого навколишнього середовища, але вона може сприяти зменшенню концентрації CO₂ в атмосфері.

Література

1. Dance Scott. Hawaii's Mauna Loa Observatory just captured ominous signals about the planet's health. The Washington Post. URL: <https://www.washingtonpost.com/weather/2024/05/10/carbon-dioxide-record-mauna-loa/> (date of access: 10.05.2024).
2. Михайлова Є. Аналіз проблеми викидів парникових газів та методів їх знешкодження. The scientific paradigm in the context of technological development and social change : scientific monograph. Riga, Latvia, 2023. Part 2. P. 25–59.
3. Snaebjörnsdóttir S. O., Sigfússon B., Marieni C., Goldberg D., Gíslason S. R. & Oelkers E. H. Carbon dioxide storage through mineral carbonation. Nature Reviews Earth & Environment. 2020, Vol 1, no 2. P. 90–102. URL: <https://hal.science/hal-03384454>.
4. Михайлова Є. О., Панасенко О. В., Маркова Н. Б. Проблема викидів карбон (IV) оксиду та можливі шляхи її вирішення. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2020. № 1 (3). С. 80–88.

5. Bhavsar A., Hingar D., Ostwal S., Thakkar I., Jadeja S. & Shah M. The current scope and stand of carbon capture storage and utilization – A comprehensive review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 2023. Vol 8, 100368. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100368>.
6. Михайлова Є. О. Можливості біоенергетичної технології уловлювання та зберігання вуглецю. Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6–7 грудня 2023 р. / Національний університет «Одеська політехніка». Одеса, 2023. С. 235–237.
7. Михайлова Є. О. Проблеми та перспективи геологічного зберігання вуглекислого газу. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XIX Міжнародної науково-практичної конференції, 14–15 вересня 2023 р. / УКРНДІЕП. Харків, 2023. С. 269–274.
8. Михайлова Є. О., Дейнека Д. М. Мінералізація вуглекислого газу під час його геологічного зберігання. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали XXXII міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2024, 22–25 травня 2024 р. / НТУ «ХПІ». Харків, 2024. С. 612.
9. Pogge von Strandmann P.A.E., Burton K. W., Snæbjörnsdóttir S. O. Et al. Rapid CO₂ mineralisation into calcite at the CarbFix storage site quantified using calcium isotopes. *Nature Communications*. 2019. Vol. 10, 1983. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10003-8>.