



Нові рішення у сучасній техніці та технологіях

Прийнято 29.04.2026. Прорецензовано 18.05.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 662.7: 622.279

DOI: 10.31471/1993-9868-2026-1(45)-159-183

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ІНФРАСТРУКТУРИ УЛОВЛЮВАННЯ, ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ CO₂ В УКРАЇНІ: ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ДОСВІД ТА НАЦІОНАЛЬНІ ПЕРЕДУМОВИ

Дорошенко Я. В.*

Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5853-3286>
e-mail: yaroslav.doroshenko@nung.edu.ua

Кондрат О. Р.

Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0009-0002-0928-2748>
e-mail: oleksandr.kondrat@nung.edu.ua

Стецюк С. М.

Доктор технічних наук
Український науково-дослідний інститут природних газів
Гімназійна набережна, 20, м. Харків, 61125, Україна
<https://orcid.org/0009-0004-9918-7692>
e-mail: stetsyuk.sergey@ugv.com.ua

Дякунчак Д. Р.

Аналітик стратегічних проєктів
Група Нафтогаз
вул. Михайлівська, 12, м. Київ, 01001, Україна
<https://orcid.org/0009-0003-4929-9285>
e-mail: dan.dyakunchak@gmail.com

Запропоноване посилання: Дорошенко, Я. В., Кондрат, О. Р., Стецюк, С. М. & Дякунчак, Д. Р. (2026). Перспективи розвитку інфраструктури уловлювання, транспортування та зберігання CO₂ в Україні: європейський досвід та національні передумови. Нафтогазова енергетика, 1(45), 159-183. doi: 10.31471/1993-9868-2026-1(45)-159-183.

* Відповідальний автор



Анотація. Досліджено тенденції розвитку інфраструктури уловлювання, транспортування та геологічного зберігання діоксиду вуглецю (CCS) у країнах Європейського Союзу та виконано аналіз перспектив їх реалізації в Україні. Аналіз європейських проєктів підтверджує, що створення повноцінного ланцюжка CCS забезпечується узгодженим поєднанням процесів уловлювання, транспортування та геологічного зберігання CO₂, при цьому ключову роль відіграє створення потужностей геологічного зберігання, як основи для започаткування всієї інфраструктури. Показано, що в умовах післявоєнного відновлення та переходу до низьковуглецевої економіки особливого значення набудуть цементна та біогазова галузі, де викиди CO₂ мають переважно процесне походження і не можуть бути усунені виключно шляхом переходу на відновлювані джерела енергії. Це визначає їх як пріоритетні об'єкти для впровадження технологій уловлювання та подальшого транспортування і зберігання діоксиду вуглецю. Обґрунтовано доцільність орієнтації на технології зрідження CO₂, що забезпечує зменшення його об'єму та дозволяє ефективно застосовувати залізничний і автомобільний транспорт. Акцентовано увагу на необхідності реалізації концепції формування регіональних CO₂-хабів для акумулювання потоків діоксиду вуглецю та їх подальшого спрямування до об'єктів геологічного зберігання. Проаналізовано геологічний потенціал України щодо зберігання CO₂, зокрема можливостям використання виснажених газових і нафтових родовищ, як об'єктів довгострокового зберігання CO₂. Запропоновано концептуальний підхід до розвитку інфраструктури CCS, який передбачає реалізацію пілотних проєктів у регіонах, де рівень ризиків, пов'язаних із війною, є нижчим, проведення комплексних геологічних досліджень, створення регіональних CO₂-хабів, розвиток залізничної та автомобільної логістики транспортування зрідженого CO₂. Підкреслено важливість державної координації, розвитку нормативно-правової бази, міжнародної співпраці та інтеграції України у європейські ланцюжки транспортування і зберігання CO₂. Отримані результати можуть бути використані для прийняття рішень щодо розвитку системи уловлювання, транспортування і зберігання CO₂ в Україні та її інтеграції у європейський простір декарбонізації.

Ключові слова: декарбонізація; цементна промисловість; біогазові заводи; зрідження CO₂; CO₂-хаби; виснажені газові родовища.

Вступ

Зміни клімату та тенденції до зростання викидів парникових газів зумовлюють необхідність пошуку ефективних рішень для їх скорочення. У зв'язку з цим розвинені країни відповідно до Паризької угоди визначили стратегічні цілі зі скорочення викидів у середньотривалій перспективі, спрямовані на досягнення кліматичної нейтральності [1]. У цьому контексті особливого значення набувають технології уловлювання, транспортування та геологічного зберігання діоксиду вуглецю, які розглядаються як один із елементів системи декарбонізації та інструментів досягнення кліматичної нейтральності. На сьогодні ці технології активно розвиваються та поступово переходять до стадії широкомасштабного впровадження, що супроводжується формуванням комплексної інфраструктури, яка об'єднує різні джерела викидів і забезпечує їх поєднання з об'єктами геологічного зберігання. Ключовою особливістю такого підходу є необхідність узгодженого розвитку всіх складових ланцюжка CCS. Водночас, практичний досвід реалізації європейських проєктів свідчить, що саме створення потужностей геологічного зберігання часто виступає відправною точкою для подальшого розвитку всієї інфраструктури. Це обумовлено тим, що наявність доступних і підготовлених сховищ може стати стримуючим фактором для впровадження технологій уловлювання CO₂ на промислових підприємствах.

Для України питання розвитку CCS набуває особливої актуальності в умовах післявоєнної відбудови економіки та необхідності відновлення, модернізації промисловості відповідно до вимог низьковуглецевого розвитку. Для цього є значні передумови, насамперед для розвитку системи геологічного зберігання CO₂, зокрема завдяки наявності виснажених газових і нафтових родовищ, які можуть бути використані як об'єкти довгострокового зберігання. Також є розгалужена система магістральних газопроводів, частина яких використовується не на повну потужність, розгалужена мережа залізниць і автодоріг. Реалізація цього потенціалу потребує комплексного підходу, що включає наукові дослідження, розвиток законодавчої та нормативної бази, формування інфраструктурних рішень тощо.

Суттєвим чинником, який буде стимулювати розвиток технологій CCS є посилення економічних механізмів регулювання викидів парникових газів, серед яких ключове місце займає механізм прикордонного вуглецевого коригування (СВАМ), який впроваджується Європейським Союзом. Цей інструмент передбачає встановлення плати за вуглецевий вміст імпортованої продукції та спрямований на запобігання так званому «вуглецевому витоку», коли виробництво переноситься до країн із менш жорсткими екологічними вимогами. На початковому етапі його дія поширюється на найбільш вуглецевоємні галузі, зокрема металургію, цементну промисловість, виробництво

добрих та електроенергії. У таких умовах підприємства змушені враховувати додаткові витрати, пов'язані з викидами CO₂, що формує економічні стимули до впровадження технологій їх скорочення. Для українських виробників це створює як суттєві виклики у вигляді потенційного зростання витрат і втрати конкурентоспроможності, так і передумови для технологічної модернізації. Зокрема, впровадження рішень у сфері уловлювання, транспортування та геологічного зберігання CO₂ розглядається як один із інструментів адаптації до нових вимог європейського ринку. Таким чином, економічні механізми кліматичної політики ЄС виступають важливим драйвером розвитку інфраструктури CCS [2-4].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Питання, пов'язані з технологіями уловлювання, транспортування та геологічного зберігання діоксиду вуглецю, розглядаються у багатьох наукових дослідженнях і оглядових публікаціях. Значна увага приділяється аналізу принципів роботи відповідних технологій, особливостей технологічних схем і параметрів протікання процесів, оцінці технологічної готовності різних рішень, їх економічної доцільності, енергоефективності та можливостей інтеграції у промислові процеси. При цьому більшість досліджень зосереджена на окремих етапах ланцюжка CCS, що дозволяє глибше проаналізувати їхні технологічні особливості, переваги, обмеження та умови застосування.

Важливий внесок у систематизацію знань щодо технологій уловлювання діоксиду вуглецю зроблено у праці Boot-Handford M. E. [5]. У цій публікації представлено комплексний аналіз сучасного стану та напрямів розвитку технологій уловлювання CO₂, зокрема посткомбустійного, прекомбустійного та киснево-паливного підходів, із детальним розглядом їх технологічних схем, принципів функціонування та умов застосування. Автори здійснюють порівняльну оцінку цих технологій за показниками ефективності, енергоємності та рівня технологічної готовності, що дозволяє визначити їх потенціал для масштабного впровадження. Особливу увагу в роботі приділено проблемі високих енергетичних витрат, пов'язаних із процесами уловлювання CO₂, які суттєво впливають на загальну ефективність.

Leung D. Y. [6] систематизував основні технологічні підходи до уловлювання CO₂, зокрема, абсорбцію, адсорбцію, мембранні методи та криогенне розділення. Здійснив порівня-

льний аналіз цих технологій за такими критеріями, як ефективність уловлювання, енергоспоживання, вартість та технологічна готовність. У роботі підкреслюється, що абсорбційні технології є найбільш комерційно зрілими, тоді як адсорбційні та мембранні методи мають значний потенціал для зниження енерговитрат, але потребують подальших досліджень. Rochelle G. T. [7] детально розглянув механізми хімічної абсорбції CO₂ водними розчинами амінів, яка є найбільш зрілою та готовою до промислового застосування технологією посткомбустійного уловлювання. Однак, її ефективність обмежується високими витратами енергії на регенерацію сорбенту (переважно у вигляді тепла) та проблемами деградації розчинів. Тому у роботі окреслено перспективні напрямки вдосконалення, включаючи використання нових типів амінів та оптимізацію процесів теплообміну. Матківський С. В. [8] підтверджує широке застосування даного підходу, зокрема із використанням амінових розчинників, серед яких найбільшого поширення набули водні розчини етаноламіну, діетаноламіну та триетаноламіну.

Інший напрям наукових досліджень зосереджений на питаннях транспортування CO₂ трубопровідними системами, де основна увага приділяється проектуванню інфраструктури, визначенню оптимальних режимів транспортування та забезпеченню безпеки експлуатації. Зокрема, McCoy S. T. та Rubin E. S. [9] розробили інженерно-економічну модель транспортування CO₂ трубопроводами, яка дає змогу оцінювати витрати залежно від відстані, діаметра трубопроводу та режиму транспортування. Також здійснено аналіз впливу термодинамічних параметрів на фазовий стан CO₂ і доведено переваги транспортування у надкритичному стані з точки зору щільності та енергоефективності. Підкреслено значення масштабного ефекту, коли зі збільшенням обсягів транспортування питомі витрати знижуються.

Li H. та Jakobsen J. P. [10] дослідили термодинамічну поведінку CO₂ та його сумішей, що є критично важливим для моделювання нестационарних режимів транспортування. Здійснено аналіз впливу домішок на фазову рівновагу, щільність та інші параметри, які визначають зміну стану потоку при коливаннях тиску і температури. Отримані результати можна використати для підвищення точності моделей перехідних процесів у трубопроводах. Це дозволяє більш адекватно прогнозувати поведінку CO₂ у реальних умовах експлуатації та

враховувати ризики, пов'язані з нестабільними режимами транспортування.

Fan X., Liu G. та інші [11] розробили підхід до динамічної оцінки ризиків корозії трубопроводів, який враховує взаємодію кількох факторів, зокрема наявність домішок, вологи, температури та тиску. Автори застосовують імовірнісне моделювання відмов для прогнозування розвитку корозійних пошкоджень і визначення найбільш уразливих ділянок трубопроводної системи. Отримані результати демонструють, що комплексне врахування факторів дозволяє підвищити точність оцінки ризиків та обґрунтувати заходи для підвищення надійності і безпеки транспортування CO₂.

Serediuk M. D. та Tsiurak V. Y. [12] розглянули можливість використання існуючої газотранспортної інфраструктури для транспортування CO₂. Обґрунтовано доцільність використання незавантажених магістральних газопроводів для транспортування CO₂ у газоподібному стані. Здійснено аналіз технічних аспектів такого підходу, з урахуванням гідравлічних режимів, впливу фізичних властивостей CO₂ на параметри транспортування. Також враховано можливі обмеження, пов'язані з матеріалами трубопроводів і умовами їх експлуатації.

Важливим напрямом наукових досліджень є питання геологічного зберігання CO₂, де основна увага зосереджена на виборі придатних формацій, моделюванні поведінки діоксиду вуглецю у надрах та забезпеченні довгострокової безпеки зберігання.

Wachu S. [13] систематизував підходи до вибору геологічних формацій, включаючи виснажені нафтові і газові родовища та глибокі солоні водоносні горизонти. Здійснив аналіз критеріїв придатності колекторів і покришок, а також визначає основні перешкоди впровадженню технологій зберігання.

У [14] детально розглянуто фізичні та геохімічні процеси, що визначають поведінку CO₂ після закачування, включаючи структурне, розчинне та мінеральне зв'язування. У звіті підкреслено важливість довгострокового моніторингу та оцінки ризиків витоків CO₂ із геологічних формацій.

Питання динаміки поширення CO₂ у підземних колекторах досліджували Juanes R., MacMinn C. W. та Szulczewski M. L. [15]. Дослідники здійснили аналіз механізмів розповсюдження та утримання CO₂ у пористому середовищі, зокрема капілярного захоплення, що є одним із ключових механізмів довгострокового зберігання.

Burachok O., Nistor M. L. та інші [16] розглянули можливість поєднання закачування CO₂ для підвищення вилучення конденсату з одночасним його довгостроковим геологічним зберіганням. Оцінили вплив закачування CO₂ на фазову поведінку флюїдів у газоконденсатних родовищах та встановили, що використання CO₂ дозволяє підтримувати пластовий тиск і підвищувати коефіцієнт вилучення вуглеводнів.

Окремий напрям досліджень стосується забезпечення цілісності свердловин під час зберігання CO₂. Carey J. W. та інші [17] дослідили довгостроковий вплив CO₂ на цементні матеріали свердловин. Встановили, що взаємодія CO₂ з цементом може призводити до змін його структури, що треба враховувати під час оцінювання герметичності сховищ.

Висвітлення невіршених раніше час-тин загальної проблеми

Аналіз наукових публікацій свідчить, що значна частина досліджень у сфері уловлювання, транспортування та геологічного зберігання CO₂ зосереджена на окремих елементах цього ланцюжка. Водночас інтегровані підходи до формування цілісної інфраструктури CCS, що поєднує всі етапи від уловлювання до зберігання, залишаються недостатньо розробленими. Це ускладнює перенесення отриманих результатів у практичну площину створення регіональних систем.

У країнах Європейського Союзу останніми роками сформувалися нові інфраструктурні підходи, що базуються на інтеграції промислових джерел викидів із транспортними мережами та об'єктами геологічного зберігання. Однак, механізми адаптації цих підходів до умов України, з урахуванням особливостей структури промисловості, просторової нерівномірності розміщення джерел викидів і потенційних сховищ, залишаються недостатньо дослідженими. Крім того, специфічним фактором є вплив воєнних ризиків, що визначає необхідність вибору безпечних регіонів для реалізації пілотних проектів та поетапного розвитку інфраструктури. Тому актуальним є завдання комплексного аналізу європейського досвіду розвитку інфраструктури CCS та визначення можливостей його адаптації до умов України з урахуванням національних особливостей.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є аналіз сучасних підходів до формування інфраструктури уловлювання, транспортування та геологічного зберігання

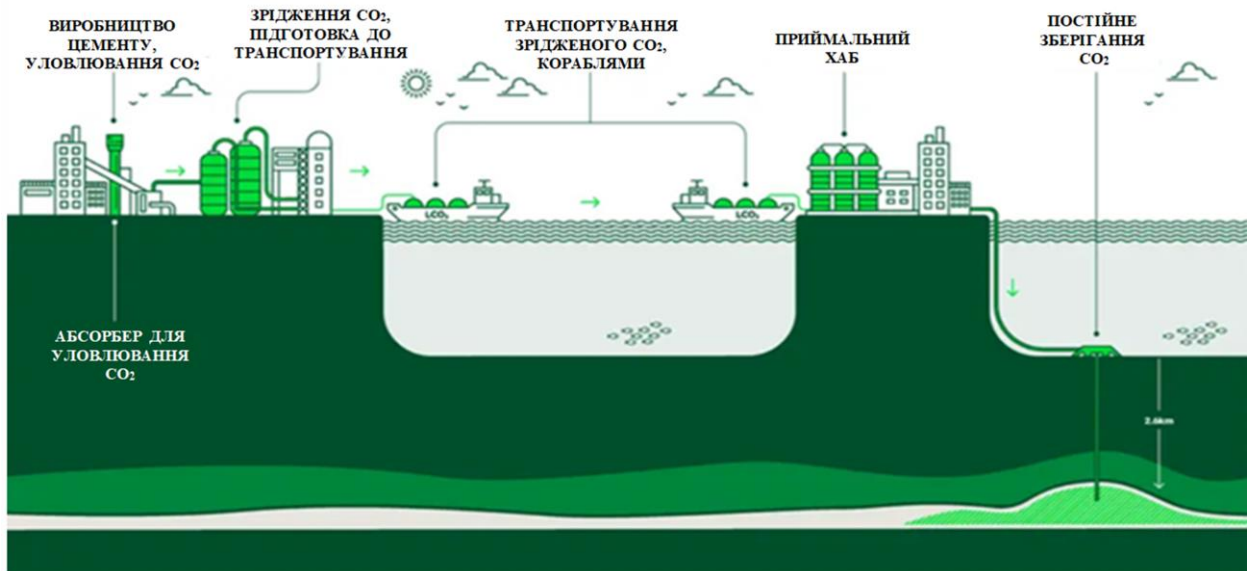


Рисунок 1 – Схема реалізації проекту Brevik CCS [18]

CO₂ у країнах Європейського Союзу та оцінювання національних передумов для їх реалізації в Україні.

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати реалізовані і заплановані проекти з влаштування інфраструктури CCS у країнах Європейського Союзу;

- дослідити національні передумови розвитку інфраструктури CCS в Україні, включаючи галузеву структуру джерел викидів, можливості з транспортування CO₂ та геологічний потенціал його зберігання у виснажених родовищах.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Значна кількість сучасних CCS-проектів, особливо в Європі, реалізується або перебуває на стадії розробки у цементній промисловості. Під час виробництва цементу відбувається найбільше викидів CO₂, оскільки близько двох третин прямих викидів CO₂ формуються не внаслідок спалювання палива, а під час хімічного розкладу вапняку на стадії утворення клінкеру. Через неможливість змінити базові хімічні реакції такі викиди CO₂ є неминучі.

Цементні заводи є одними з найбільших промислових джерел CO₂, оскільки дві третини прямих викидів виникає у процесі кальцинації вапняку в цементній клінкер під час процесу спалювання в цементній печі і одна третина на спалювання палива. Так, як неможливо змінити хімічні процеси, ці викиди неминучі. Тому технології уловлювання, транспортування та геологічного зберігання CO₂ є одним із ключо-

вих рішень для декарбонізації цього сектору промисловості.

Перший у світі повноланцюговий пілотний проект з уловлювання та зберігання вуглецю (CCS) у цементній промисловості Brevik CCS започаткований єдиним виробником цементу у Норвегії Heidelberg Materials Sement Norway. Проект Brevik CCS розрахований на уловлювання 400000 тон CO₂ в рік. Викиди CO₂ уловлюються, зріджується і тимчасово зберігається до транспортування. Так як цементний завод Heidelberg Materials Brevik розташований біля морської гавані транспортування здійснюється кораблями до берегового об'єкта (приймального терміналу) на західному узбережжі Норвегії. Далі діоксид вуглецю закачують трубопроводом до місця постійного геологічного зберігання в соляні формації Північного моря (рисунок 1). Обговорення ідеї захоплення вуглецю на цементному заводі розпочалось у 2005 році. На той час ця ідея вважалася нереалістичною. Однак, після багатьох років досліджень, розробок і співпраці проект був готовий у 2020 році. Початкові роботи розпочалися в січні 2021 року. Перше основне технологічне обладнання завезено у травні 2022 року. У 2025 році розпочато виробництво першого у світі цементу evoZero, що дає змогу отримати бетон з нульовими викидами без втрати міцності та якості [18-21].

Аналогічними є проект Slite CCS в Швеції та Holcim «Kodenco Net Zero» в Хорватії. У Швеції біля морської гавані на острові Готланд розташований цементний завод Heidelberg Cement. Тому проектом Slite CCS передбачено уловлювання до 1,8 мільйона тон CO₂ в рік,

зрідження і його транспортувати кораблями до місця геологічних сховищ у Північному морі. Орієнтовна інвестиція в об'єкт становить біля 900 млн. євро. Будівництво об'єкта планується розпочати у 2027 році і завершити у 2030 році [22, 23].

В Хорватії на березі Середземного моря розташований цементний завод Koromasno. Проектом Holcim «Kodeco Net Zero» вартістю 237 мільйонів євро передбачено уловлювання 367000 тон CO₂ на рік, зрідження і його транспортувати кораблями до місця геологічних сховищ у Середземному морі. На реалізацію цього проєкту отримано грант фонду інновацій ЄС у розмірі 117 мільйонів євро. Завершення будівництва заплановано на 2028 рік. [24, 25]

Серед інших повноланцюгових подібних проєктів із зменшенням викидів CO₂, пов'язаних з процесами у виробництві цементу в Європейському Союзі вирізняється проєкт GeZero компанії Heidelberg Materials у м. Гезеке, Північний Рейн-Вестфалія (Німеччина). GeZero є рішенням для промислових об'єктів, які не знаходяться поруч із узбережжям чи водним шляхом. Особливістю проєкту є транспортне рішення, яке доцільне у разі відсутності необхідної трубопровідної інфраструктури. Після уловлювання CO₂ його планується зріджувати і тимчасово зберігати. Від цементного заводу зріджений CO₂ передбачено транспортувати залізницею до хабу Wintershall Dea «CO₂nectNow» у Вільгельмсхафені, де його будуть завантажувати на судна і доставляти до морських платформ у Північному морі і трубопроводами закачувати у геологічні формації на глибинах від 1000 м до 3000 м.

Проектом GeZero передбачено уловлювання 700000 т CO₂ на рік. Загальна сума інвестицій перевищує 0,5 мільярда євро з яких і 191 мільйони фінансується фондом інновацій ЄС. Очікується, що будівництво інфраструктури розпочнеться у 2026 році. Запуск проєкту в експлуатаційний режим заплановано на 2029 рік [18, 26-28].

Проектом AirvaultGOCO₂ у Франції передбачено уловлювання 1 мільйона тон CO₂ на рік на цементному заводі Airvault у Де-Севр, Нова Аквітанія. Обливістю цього проєкту є те, що уловлений CO₂ буде транспортуватись трубопроводом до прибережного міста Сен-Назер в Луарі-Атлантику, а тоді кораблями до місця зберігання у Північному морі [29, 30].

Також трубопроводом передбачається транспортування уловленого CO₂ на цементному заводі Rezzato Mazzano в провінції Бреція, Італія. Транспортування буде здійснюва-

тись до виснажених газових родовищах Елі в Адриатичному морі біля узбережжя Равенни. Загальна ємність цих родовищ оцінюється понад 500 мільйонів тон, що робить цей проєкт еталонним центром CCS у Середземномор'ї [31].

Крім того трубопроводами планується транспортувати CO₂ в проєктах Anthemis (Бельгія) та HuCCSar (Польща) [32, 33].

У Східній Європі першим повноланцюговим пілотним проєктом CCUS на промисловому рівні є ANRAV. Його мета уловлювання викидів CO₂ на болгарському цементному заводі “Девня” біля м. Варна (група Heidelberg Cement) та транспортування наземною та морською трубопровідною системою до виснаженого газового родовища Галата в Чорному морі для постійного зберігання. Проєкт реалізується спільно з нафтогазовою компанією Petroceltic. Повноцінно проєкт може розпочати роботу у 2028 році. ANRAV матиме потужність уловлювання CO₂ біля 800000 тон на рік. Проєкт отримав фінансування від фонду інновацій ЄС у розмірі 190 мільйонів євро. Таким чином цементний завод “Девня” стане першим підприємством у регіоні з вуглецево нейтральним виробництвом цементу [18, 34].

Окрім цементної промисловості проєкти з уловлювання, транспортування та зберігання CO₂ активно плануються, проєктуються та впроваджуються і для інших значних стаціонарних джерел викидів парникових газів. До них насамперед належать теплові електростанції на викопному паливі, підприємства чорної та кольорової металургії, нафтопереробні заводи, хімічна та нафтохімічна промисловість (зокрема виробництво аміаку, водню, метанолу), заводи з виробництва біогазу, установки з виробництва “синього” водню, вапна тощо. Такі джерела характеризуються високими обсягами концентрованих викидів CO₂, що робить їх технічно та економічно придатними для впровадження технологій уловлювання вуглецю.

Розширення контингенту промислових та енергетичних джерел, для яких здійснюється планування, проєктування та реалізація проєктів з уловлювання CO₂, призводить до суттєвого збільшення сумарних обсягів уловленого діоксиду вуглецю. Така тенденція зумовлює необхідність переходу від поодиноких локальних рішень до формування масштабнішої інфраструктури з транспортування CO₂, яка забезпечить об'єднання потоків із різних розосереджених джерел та їх подальше спрямування до місць довгострокового зберігання. Також така інфраструктура має забезпечити поєднан-

ня різних способів транспортування – трубопровідного, залізничного, автомобільного та морського з урахуванням нерівномірності обсягів, режимів подачі та агрегатного стану діоксиду вуглецю.

Тому все більшого значення набуває створення трубопровідних систем CO₂ та проміжних інфраструктурних вузлів (хабів) для приймання, тимчасового зберігання, за потреби зрідження CO₂, що надходить із різних промислових джерел різними видами транспорту у різних обсягах і агрегатних станах. Такі хаби виконують функцію поєднання потоків CO₂, забезпечуючи їх подальше транспортування до одного або декількох об'єктів геологічного зберігання.

Першим у світовій практиці прикладом транскордонного CO₂-хабу є проєкт Northern Lights. Такий проєкт реалізовано для надання послуги з зберігання CO₂ з різних джерел усю Європу і він є частина норвезького повномасштабного проєкту CCS Longship, який передбачає вловлювання CO₂ на виробничих підприємствах, зокрема цементному заводі Heidelberg Materials Brevik, заводі з переробки відходів у енергію Fortum Oslo Varme в Осло, зрідження і його транспортування кораблями до хабу Northern Lights на західному узбережжі Норвегії, де зберігання під тиском у резервуарах. Звідти зріджений CO₂ транспортують трубопроводом довжиною 110 км до морського сховища і закачують у геологічну формацію на глибину біля 2500 метрів під морським дном у Північному морі для постійного зберігання.

Перший етап проєкту Northern Lights має пропускну здатність 1,5 мільйона тонн CO₂ на рік. Він був завершений у 2024 році і у серпні 2025 року 12 резервуарів загальною місткістю 7500 м³ були наповнені першими обсягами CO₂. 80 % необхідних інвестицій обсягом 1,2 мільярда євро для першої фази профінансував Норвезький уряд. Про другий етап оголошено у березні 2025 року. Планується збільшити його пропускну здатність з 1,5 мільйонів тонн на рік до мінімум 5 мільйонів тонн на рік. Проєкти та технологія експлуатації таких об'єктів схожі на ті, які використовуються для зрідженого газу [18, 35-37].

На сьогодні простежується тенденція до влаштування CO₂-хабів у великих морських портах з доступом до морської транспортної інфраструктури. Великі європейські порти є промисловими кластерами із концентрацією джерел викидів CO₂ нафтопереробних, хімічних, металургійних і енергетичних підприємств. Тому наявність CO₂-хабів у великих

морських портах створює інфраструктурні передумови для декарбонізації таких промислово розвинених регіонів, а також для приймання потоків діоксиду вуглецю з різних зовнішніх промислових джерел, його тимчасового зберігання та транспортування трубопровідним або морським транспортом до місць офшорного зберігання. Використання портової інфраструктури дає змогу поєднати різні види транспорту, зокрема берегові трубопроводи, автомобільний і залізничний транспорт, морські CO₂-танкери та офшорні трубопровідні системи, що підвищує гнучкість транспортної логістики.

Так, у порту Роттердама у Нідерландах, який є головним морським портом Європи та один з найбільших у світі за вантажообігом, одразу реалізується три проєкти, безпосередньо пов'язані з формуванням інфраструктури уловлювання, транспортування та геологічного зберігання діоксиду вуглецю, що мають на меті декарбонізацію промислового кластера порту та розвиток регіональних і транскордонних логістичних ланцюгів CO₂. Це проєкти Porthos, Aramis та CO₂next.

У портовій зоні Роттердама відбувається біля 15 % викидів CO₂ у Нідерландах. Тому проєктом Porthos передбачено уловлювання CO₂ на промислових підприємствах у порту Роттердама, його транспортування під низьким початковим тиском 3,5 МПа збірними портовими трубопроводами загальною довжиною понад 30 км, компримування до тиску 13 МПа і транспортування у газоподібному стані підводним трубопроводом довжиною понад 20 км до місць геологічного зберігання у виснажених газових родовищах Північного моря (рис. 2). Планується, що загальний обсяг уловленого та захороненого CO₂ буде складати біля 37 млн тонн, що складає біля 2,5 млн тонн CO₂ щороку протягом 15 років. Будівництво інфраструктури проєкту Porthos розпочалося на початку 2024 року. Очікується, що введення в експлуатацію відбудеться у 2026 році [38].

Також у портовій зоні Роттердама планується розташувати пункт збору CO₂ проєкту Aramis. Такий проєкт є масштабована, відкрита для доступу та довгострокова трубопровідна транспортна система CO₂ Нідерландів, яка призначена для обслуговування великої кількості джерел, у тому числі нові проєкти з уловлювання CO₂ та транскордонні потоки, які можуть поступово додаватися. Центром збору CO₂ проєкту Aramis має бути портова зона Роттердама, де буде відбуватись компримування CO₂ для його транспортування морським трубопроводом до офшорної розподільчої пла-

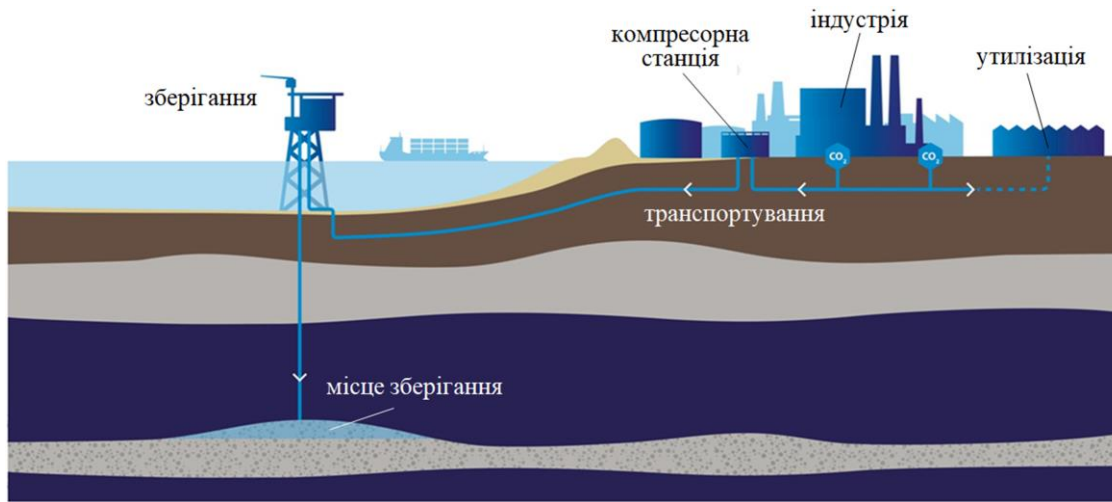


Рисунок 2 – Схема реалізації проекту Porthos [38]

тформи розташованої на віддалі біля 200 км. Через розподільну платформу CO₂ буде трубопроводом доставлятися до газових платформ для закачування у відпрацьовані газові родовища на глибину 3-4 км під морським дном. Загальна оцінювана місткість зберігання перевищує 400 млн тонн. Очікується, що проект Agamis буде введений у промислову експлуатацію у 2026 року. Передбачається, що проєктна пропускна спроможність інфраструктури Agamis складатиме до 22 млн тонн CO₂ на рік, що, сприятиме скороченню викидів діоксиду вуглецю на 55 % до кінця десятиліття порівняно з рівнем 1990 року. У проєкті Agamis заплановано використовувати компресійні потужності проєкту Portos. Компресорна станція має приймати CO₂, що постачається наземними трубопроводами, і створювати тиск для транспортування морським трубопроводом, для чого заплановано її реконструкцію. Проєкти Porthos і Agamis є окремими, незалежними інфраструктурними проєктами, але вони проєктуються як взаємодоповнювані та потенційно сумісні. Проєкт CO₂next це термінал для тимчасово зберігання зрідженого CO₂ і надає можливість кораблям завозити та вивозити рідкий CO₂, що полегшить надання послуг CCS для підприємств, які не під'єднані безпосередньо до трубопровідної системи проєкта Agamis. Передбачено під'єднання терміналу CO₂next до інфраструктури проєкта Agamis. [39-44]

Другим найбільшим портом в Європейському Союзі є порт Антверпен у Бельгії. У цьому порту заплановано влаштувати експортний хаб CO₂ Antwerp@C. Такий хаб буде відкритою інфраструктурою, призначеною для транспортування, зрідження та завантаження CO₂ на кораблі для доставки його до геологічних сховищ у Північному морі. Уловлений на про-

мислових кластерах порту Антверпена CO₂ буде збиратися та транспортуватися внутрішньопортовою трубопровідною мережею. Тоді відбуватиметься його зрідження і транспортування до буферних сховищ звідки завантаження на кораблі. Очікується, що експортний хаб CO₂ Antwerp@C розпочне роботу з експортної потужності 2,5 млн тонн на рік, з планами масштабування до 10 млн тонн на рік до 2030 року. У майбутньому планується побудувати один або кілька трубопроводів для з'єднання промислових кластерів у Бельгії, північній Франції та Німеччині з хабом Antwerp@C [44, 45].

У порту Есб'єрг у Данії, який є найбільшим логістичним центром Північної Європи розпочато будівництво транзитного терміналу CO₂ компанії Greensand. Термінал буде складатися з шести великих резервуарів, у кожному з яких може зберігатися біля 1000 тон зрідженого CO₂, необхідної інфраструктури для розвантаження та транспортування CO₂.

Зріджений CO₂ до терміналу Greensand має транспортуватися вантажівками від кількох данських біогазових заводів, де буде тимчасово зберігатися. Коли резервуари будуть заповнені, зріджений CO₂ буде завантажений на спеціалізовані кораблі і доставлений на платформу INEOS Nini в Північному морі Данії. Із платформи буде відбуватися його закачування трубопроводом у підземні геологічні структури на глибину біля 1800 метрів під морським дном для постійного зберігання. Закачування планується розпочати на початку 2026 року [46, 47].

Аналогічний проєкт D'Aragnan заплановано реалізувати у порту Дюнкерка в Франції. Тільки з місць уловлювання (цементний завод у Ламбресі та виробництво вапна в Реті тощо)

до терміналу у порту зріджений CO₂ передбачено транспортувати трубопроводом Air Liquide. Термінал зможе приймати 1,5 млн тонн на рік, а в майбутньому до 4 млн тонн CO₂ на рік, що еквівалентно понад 5 % викидів парникових газів промисловістю Франції. [48]

Що ж до трубопровідної інфраструктури то для транспортування CO₂ від німецького кордону поблизу Венло до Роттердама (промислової зони Маасвлакте) заплановано проєкт Delta Rhine Corridor. При цьому в одному коридорі буде прокладено два трубопроводи для CO₂ та водню. Довжина трубопроводу для транспортування CO₂ у Нідерландах складає 270 км, а у Німеччині 450 км. Такий CO₂ трубопровід у Німеччині буде з'єднано з трубопроводами від промислових підприємств [49-51].

Також у Німеччині заплановано будівництво двох великих трубопроводів для збору CO₂. Такі трубопроводи мають бути спеціалізованою мережею для транспортування уловленого CO₂ з промислових підприємств до місць зберігання. Одним із трубопроводів CO₂ буде транспортуватись до геологічних сховищ у Північному морі та на материковій частині Данії. Другий буде проходити від південної та західної Німеччини до бельгійського кордону, де його з'єднають з запланованим транзитним трубопроводом Fluxus до порту Зебрюгге на Північному морі. Звідти CO₂ буде доставлятися в офшорні сховища. Так як неможливо перепрофілювати існуючі газопроводи для транспортування CO₂. Обидва проєкти передбачають будівництво нових трубопроводів, які здебільшого будуть проходити поруч із існуючими газопроводами [52, 53].

Також заплановано трубопровід CO₂ Delta Schelde CO₂ Connection, який з'єднає Роттердам і Антверпен для посилення інтеграцію CCS у Північно-Західній Європі [54].

Італійські нафтогазові компанії Eni та Snam реалізують перший проєкт з уловлення та зберігання CO₂ в Італії Ravenna CCS. Перша фаза проєкту передбачає уловлювання викидів CO₂ з очисної станції Eni компанії Eni в Казальборсетті, у муніципалітеті Равенна (біля 25000 тон на рік). Після уловлювання CO₂ має транспортуватись переобладнаною системою газопроводів до офшорної платформи Porto Corsini Mare Ovest. Тоді CO₂ буде спрямовано на глибину 3000 м у виснажене газове родовище Porto Corsini Mare Ovest, яке знаходиться в Адріатичному морі. Друга фаза проєкту Ravenna CCS має розпочатися до 2030 року і забезпечить можливість щорічно зберігати до

4 млн тонн CO₂. Значна частина цієї продукції буде уловлена на цементних, сталеливарних та хімічних підприємствах і електростанціях у промисловій зоні Равенни. Також у промисловій зоні Равенни буде влаштовано логістичний хаб до якого зріджений CO₂ будуть транспортувати кораблями та залізницею з інших регіонів середземноморської Європи, що передбачається проєктом Callisto [55-58].

Проєкти з уловлювання і транспортування CO₂ формують тільки початкові ланки ланцюжка CCS, який набуває завершеного вигляду виключно за наявності надійних рішень для геологічного зберігання, що зумовлює необхідність огляду відповідних проєктів, орієнтованих саме на створення сховищ CO₂.

Одним із наймасштабніших проєктів світового рівня із довгострокового геологічного зберігання CO₂ у Північному морі є проєкт Poseidon. Він розглядається як незалежний об'єкт зберігання, здатний приймати значні обсяги діоксиду вуглецю від різних промислових джерел і транспортних систем у північноєвропейському регіоні. Зберігання CO₂ планується здійснювати в виснаженому газовому родовищі Leman, яке є найбільшим комплексом резервуарів на континентальному шельфі Великої Британії, що розташований у південному секторі Північного моря. Також CO₂ буде знаходитись у прилеглих до газового родовища солоних водоносних горизонтах. Максимальна ємність такого родовища біля 1 гігатони.

Очікується, що початкова потужність закачування передбачається 1,5 млн тонн на рік з 2029 року з збільшенням до 10 млн тонн на рік до 2034 року та з подальшим геологічним потенціалом до біля 40 млн тонн на рік.

Станом на сьогодні компанія Perenco UK уже успішно завершила тестове закачування CO₂, що дало змогу отримати винятковий набір даних для подальших досліджень. Для цього було використано платформу Leman 27H, яка була спеціально модифікована для закачування CO₂ у секцію H покинутого газового родовища Leman. Закачування відбулось після успішного оновлення свердловини H27 у серпні 2024 року. Загалом здійснено 15 циклів закачування.

Початок промислового закачування заплановано на 2029 рік. Початково CO₂ буде подаватись із газового терміналу Wiston розташованого на узбережжі Східної Англії і призначено для приймання CO₂ з різних джерел перед його відправленням на зберігання в море. У перспективі заплановано, що CO₂ буде подаватись з декількох портових хабів Великої



Рисунок 3 – Схема подавання CO₂ до виснаженого газового родовища Leman (проект Poseidon) [60]

Британії, а також Північно-Західної Європи, зокрема Бельгії та Нідерландів (рис. 3) [59-63].

Також у виснажених газових родовищах Північного моря геологічне зберігання CO₂ передбачено проектом Porthos. Від компресорної станції у порту Роттердама під тиском 13 МПа морським трубопроводом у газоподібному стані CO₂ буде транспортуватись до платформи P18-A нідерландської компанії TAQA Energy B.V., яка раніше використовувалась для видобування природного газу. З платформи P18-A CO₂ буде закачуватись свердловинами у виснажені газові родовища P18-2 та P18-4, які знаходяться за 20 кілометрів від узбережжя на глибині понад 3 кілометри під морським дном, що передбачено проектом P18-CO₂ storage. Видобування газу на платформі P18-A припинилось 26 березня 2025 року. З платформи P18-A CO₂ планується закачувати у родовище новою внутрішньою трубою, яка попередньо буде поміщена в свердловину. Родовища P18-2 та P18-4 складається з пористих піщаникових порід нижнього тріасу, які належать до тріасової основної підгрупи бунтсандштейну. Вони лежать під непроникним шаром покришки, утвореної із алевролітів, глинистих каменів, евапоритів і долостонів. Таке розташування дає змогу закачувати великі обсяги CO₂ у пористі породи, а покришки запобігають його виходу. Коли кожне родовище буде заповнене його герметизують і будуть здійснювати постійний моніторинг. При цьому планується, що кінцевий тиск CO₂ у пласті буде близький до початкового тиску природного газу [64-66].

Аналогічне зберігання CO₂ у виснаженому газовому родовищі L10 Північного моря передбачено проектом Aramis. Родовище L10 це

пісковик верхнього ротлігендесу на глибині до 3800 м від дна моря. L10 виведено з експлуатації у 2021 році. Транспортна інфраструктура проекту Aramis буде під'єднана до платформ родовища [67, 68].

На півдні Європи в Егейському морі в 2024 році компанія Energean Greece завершила видобування нафти на родовищі Prinos і зосередилась на інвестиціях у 1 мільярд євро в зберігання CO₂ на цьому об'єкті. Це буде перше в Греції місце зберігання CO₂. Його планується влаштувати на базі існуючої інфраструктури. Перший етап, з обсягом зберігання газоподібного CO₂ в 1 млн. тонн на рік планується завершити у 2026 році. Тоді планується здійснити поступове нарощування з обсягом зберігання до 3 млн тонн на рік до 2028 року. На другому етапі буде передбачено закачування і рідкого CO₂. Підтверджена умовна ємність для зберігання CO₂ складає 66,4 млн тонн. Родовище Prinos є антиклінальною структурою на віддалі 17 км від узбережжя. В межах родовища розташовано дві платформи Alpha і Beta. Кожна платформа має 12 раніше експлуатованих свердловин. Свердловини було оглянуто та проведено оцінку їх стану з метою вивчення можливості перепрофілювання, зарізання бокових стволів в деяких та адаптації їх для закачування CO₂ [69-71].

Також на півдні Європи в Адріатичному морі в межах італійського проекту Ravenna CCS передбачається транспортування CO₂ переобладнаним газопроводом до платформи Porto Corsini Mare Ovest, з подальшим закачуванням у однойменне виснажене газове родовище. Ін'єкція CO₂ планується на глибину близько 3000 м під дном моря. Родовище Porto

Corsini Mare Ovest розташоване на віддалі біля 20 км від узбережжя поблизу Равенни. Промислова експлуатація родовища здійснювалася у період з 2001 по 2014 рік через чотири видобувні свердловини, при цьому було досягнуто високого коефіцієнта вилучення природного газу – близько 80 %. Початковий пластовий тиск становив 14,5 МПа, тоді як на момент завершення видобування він знизився до 7,9 МПа, що створює сприятливі гідродинамічні умови для подальшого використання родовища як об'єкта геологічного зберігання CO₂ [72, 73].

Здійснений аналіз проєктів з влаштування інфраструктури уловлювання, транспортування та зберігання CO₂ у країнах Європейського Союзу дає змогу сформувавши підґрунтя для розроблення стратегії розвитку інфраструктури CCS в Україні в контексті післявоєнного відновлення. Обґрунтованим є питання можливостей адаптації та застосування зазначеного досвіду в умовах України, з урахуванням структури та потенціалу розвитку національної промисловості, її значущості у процесах післявоєнного відновлення, просторового розміщення основних джерел викидів, наявного транспортного потенціалу та перспектив використання геологічних формацій для зберігання діоксиду вуглецю.

Особливої уваги потребує аналіз базових промислових секторів, які будуть мати визначальне значення для матеріального забезпечення післявоєнної відбудови та характеризуються високою інтенсивністю викидів CO₂. Виділення таких секторів дає змогу сформувати обґрунтовані пріоритети впровадження технологій уловлювання CO₂, з урахуванням їхньої ролі у процесах післявоєнного відновлення, масштабів викидів та технологічних особливостей виробництва.

У повоєнні роки найбільший вплив на процеси відбудови будуть мати підприємства, що виробляють цемент і сталь, які є основними матеріалами для житлових і промислових будівель, енергетики, мостів, трубопроводних мереж тощо.

Цемент буде однією з найбільших потреб відбудови і одним із найбільших джерел збільшення обсягів викидів CO₂ в Україні. Основними цементними заводами України є АТ “Подільський цемент”, “Волинь-Цемент” філія ПрАТ “ВПЦЕМ”, “Південь-Цемент” філія ПрАТ “ВПЦЕМ”, ПрАТ “Івано-Франківськ-цемент”, ПрАТ “Кривий Ріг Цемент”, ПрАТ “Миколаївцемент” та ТОВ “ЦЕМЕНТ”.

ПрАТ “Кривий Ріг Цемент” з 2008 по 2019 рік був на ринку України, як філія німецької

групи HeidelbergCement [74], яка займається активним впровадженням технологій з уловлення та зрідження CO₂ на цементних заводах, які входять до цієї групи, зокрема розглянуті вище проєкти Brevik CCS, Slite CCS та GeZero.

“Південь-Цемент”, “Подільський цемент” та ТОВ “ЦЕМЕНТ” входять до складу групи CRH – провідного виробника будівельних матеріалів у світі та найбільшого у Північній Америці та Європі, яка активно займається впровадженням технологій, пов'язаними з уловлюванням та зрідженням CO₂ на підприємствах групи, зокрема в Європі реалізує розглянутий вище проєкт D'Aragnan.

З огляду на те, що провідні світові цементні групи активно масштабують на своїх заводах технології уловлювання та зрідження CO₂, залучають для цього фінансування з боку європейських інституцій, існує обґрунтований потенціал для поширення таких рішень і технологій на цементні заводи в Україні. У післявоєнний період, у межах відбудови та інтеграції України до європейських кліматичних і промислових політик, відповідні технології можуть бути впроваджені і на цементних заводах, що входять до складу міжнародних груп, присутніх на українському ринку. Очевидним, що у післявоєнний період також відбудеться збільшення кількості українських цементних підприємств, які будуть інтегрованими до складу провідних цементних груп, що, своєю чергою, може прискорити трансфер технологій та доступ до відповідного фінансування.

Що стосується металургії, то вона є одним із найбільших промислових джерел викидів парникових газів. У 2022 році ця промисловість була відповідальною за понад 8 % світових викидів парникових газів та понад 11 % світових викидів CO₂ [75]. У цьому секторі уловлювання CO₂ розглядається як перехідне рішення у коротко- та середньостроковій перспективі, що дозволяє суттєво скоротити викиди CO₂ до повномасштабного впровадження технологій чистої енергії в сталеплавильному виробництві, які будуть працювати на екологічно чистих видах палива, зокрема водні, виробництві сталі з циклічним використанням вуглецю та уловлюванню і повторному використанню вуглецю у виробництві сталі [76].

Ще одним надзвичайно перспективним напрямом масштабного застосування технологій CCS в Україні є сектор виробництва біогазу та біометану. Технологічні процеси очищення біогазу до параметрів біометану супроводжуються відокремленням значних обсягів CO₂ з високим ступенем концентрації. Україна має

значний потенціал розвитку біогазової галузі завдяки розвиненому агропромислому комплексу, наявності великих обсягів органічних відходів сільського господарства, харчової промисловості та комунального сектору. Загальний оцінений потенціал виробництва біометану в Україні складає 9,7 млрд м³ на рік, що відповідало майже 50 % всього обсягу видобування природного газу в Україні та перевищувало обсяг імпорту станом на 2020 рік [77]. У контексті післявоєнного відновлення та енергетичної безпеки масштабування виробництва біогазу буде одним із ключових елементів стійкого розвитку.

Завдяки географічній близькості, розвиненій газотранспортній інфраструктурі Україна має сприятливі передумови для експорту біометану до країн Європейського Союзу. Сертифікаційні вимоги Європейського Союзу щодо виробництва та обігу біометану не встановлюють обов'язкової вимоги уловлювання діоксиду вуглецю, що відокремлюється на етапі очищення біогазу до стандартів біометану. Біогенний CO₂, утворений у цьому процесі, може бути випущений в атмосферу без порушення чинних нормативних вимог. Водночас, спосіб поводження з біогенним CO₂ безпосередньо впливає на показники скорочення викидів парникових газів, що декларуються в процесі сертифікації. Уловлювання та зберігання CO₂ дозволяє істотно покращити результати оцінки життєвого циклу. У сучасних умовах європейського енергетичного ринку це все більше набуває особливого значення, оскільки біометан з кращими показниками скорочення викидів має вищу ринкову привабливість, легший доступ до механізмів державної підтримки, зелених контрактів та добровільних кліматичних ініціатив. Крім того, поєднання виробництва біометану з уловлюванням і зберіганням біогенного CO₂ розглядається як перспективний напрям формування негативних викидів, що відповідає довгостроковим кліматичним цілям ЄС. Тому, хоча уловлювання CO₂ не є формальною вимогою сертифікації біометану, воно дедалі частіше розглядається як стратегічний інструмент підвищення конкурентоспроможності продукції, а також як складова інтеграції біометанових проєктів у ширші європейські системи декарбонізації та управління вуглецевими викидами.

Біогазові та біометанові установки, на відміну від великих промислових джерел, є територіально розосередженими та представлені значною кількістю об'єктів відносно малої і середньої потужності. За таких умов форму-

вання єдиної трубопровідної системи для транспортування CO₂ у газоподібному стані є технічно складним і економічно необґрунтованим через високу капіталомісткість лінійної інфраструктури, необхідність підключення великої кількості точок відбору, а також нерівномірність і сезонність виробництва біогазу, що формує змінні обсяги потоку CO₂. Тому технологічно обґрунтованим рішенням є локальне зрідження CO₂ безпосередньо на біометанових заводах. Зрідження суттєво зменшує питомий об'єм CO₂, і, відповідно, робить можливим і економічно прийнятним перевезення автоцистернами.

Також перевагою зрідження CO₂ у обох розглянутих випадках (цементні і біогазові (біометанові) заводи) є можливість швидкого переходу від локального уловлювання до організації транспортування без очікування створення трубопровідної інфраструктури. Це дозволяє власникам джерел викидів розробляти свої проєкти без необхідності створювати власне рішення для транспортування та зберігання. Оскільки, саме зрідження CO₂ на цементних і біогазових заводах є найімовірнішим сценарієм започаткування рішень щодо мінімізації викидів CO₂, подальший розвиток інфраструктури транспортування та зберігання доцільно орієнтувати на забезпечення можливості роботи зі зрідженим CO₂.

Після зрідження CO₂ на цементних і біогазових заводах його потрібно накопичувати у спеціалізованих криогенних резервуарах, обладнаних системами теплоізоляції, контролю тиску та температури. Таким чином можна вирівняти графіки виробництва і транспортування та забезпечити гнучкість логістичних операцій.

Переведення CO₂ у рідкий стан забезпечує істотне зменшення його питомого об'єму, що, у свою чергу, створює техніко-економічні передумови для ефективного застосування залізничного (за можливості водного) транспорту при вивезенні діоксиду вуглецю з цементних заводів за прикладом проєкту GeZero та автомобільного транспорту (автоцистерн) – з біогазових і біометанових, за прикладом проєкту запланованого у порту Есб'єрг у Данії. Такий підхід є особливо важливим на початкових етапах розгортання CCS-інфраструктури, коли джерел викидів, де буде здійснюватися уловлювання буде небагато, і вони будуть просто розосередженими.

Залізничним транспортом у спеціалізованих криогенних цистернах із цементних заводів зріджений CO₂ буде можна транспортувати до регіональних хабів розташованих поблизу

об'єктів геологічного зберігання або до портів СО₂-хабів. Такі хаби доцільно буде влаштувати для тимчасового накопичення СО₂, який буде доставлятися із різних джерел, та подальшого його спрямування трубопроводом сушею, морським трубопроводом або кораблем до об'єктів геологічного зберігання.

Що стосується біогазових заводів, які є територіально розосередженими, то для збору від них зрідженого СО₂, транспортування якого буде здійснюватися автоцистернами, доцільно влаштувати регіональні хаби первинного збору. Функціонування таких хабів дозволяє консолідувати потоки СО₂ з великої кількості джерел та оптимізувати подальші етапи транспортування. Надалі, з цих хабів трубопроводом, залізничним або річковим транспортом зріджений СО₂ можна доставляти до регіональних хабів, розташованих поблизу об'єктів геологічного зберігання, або до портів СО₂-хабів.

Після влаштування систем уловлювання та зрідження СО₂ на цементних заводах неминуче постає ключове питання пункту доставки зрідженого діоксиду вуглецю для його довгострокового зберігання. На відміну від етапів уловлювання та зрідження СО₂, які можуть бути реалізовані безпосередньо на промислових майданчиках підприємства, зберігання потребує наявності відповідних геологічних формацій і наявності транспортної інфраструктури для доставки до них.

Найбільш опрацьованим і технологічно готовим напрямом на той момент може стати транспортування зрідженого СО₂ залізничним транспортом до портів СО₂-хабів з подальшим закачуванням у геологічні формації Північного моря. Акваторія Північного моря на сьогодні є основним європейським регіоном з промислово реалізованими та запланованими проектами геологічного зберігання СО₂, що базуються на використанні виснажених нафтових і газових родовищ та глибоких соляних водоносних горизонтів. Однак, такий сценарій пов'язаний із значними економічними витратами, зумовленими великою протяжністю транспортних маршрутів, багатоступеневою логістикою (залізничне транспортування – портіві операції – морське транспортування – офшорне закачування), а також високою вартістю офшорних операцій з геологічного зберігання. У такому випадку сукупна вартість транспортування і зберігання СО₂ у Північному морі може становити істотну частку загальних витрат на CCS-проект, що обмежує економічну доцільність такого рішення для масового впро-

вадження. Тому надзвичайно актуальним є завдання пошуку та оцінки можливостей геологічного зберігання СО₂ на території України. Розвиток власних потужностей геологічного зберігання СО₂ в Україні дозволив би зменшити залежність від транскордонних логістичних ланцюгів, скоротити транспортні витрати та сформувати національну інфраструктуру.

Влаштування об'єктів геологічного зберігання СО₂ є значно тривалішим і складнішим процесом, ніж впровадження уловлювання та зрідження СО₂ на промислових підприємствах. На відміну від технологій уловлювання і зрідження СО₂, які базуються на відпрацьованих інженерних рішеннях і можуть бути реалізовані у відносно стислих часових рамках, створення об'єктів зберігання СО₂ потребує досліджень, масштабної наукової роботи, багаторічних підготовчих робіт. Потрібні детальні геологічні, геофізичні та гідрогеологічні дослідження, моделювання поведінки СО₂ у підземних формаціях, оцінка місткості, герметичності та довгострокової безпеки потенційних сховищ. Окрім цього, необхідними є пілотні проекти, розроблення нормативно-правової бази, процедури оцінки впливу на довкілля та громадського обговорення, що суттєво подовжує терміни реалізації таких проектів. Тому питання підготовки та розвитку інфраструктури геологічного зберігання СО₂ набуває термінового характеру, навіть за умови, що повномасштабне закачування СО₂ розпочнеться у середньо- або довгостроковій перспективі. Зволікання з початком дослідницьких і проектних робіт може призвести до ситуації, за якої системи уловлювання та зрідження СО₂ будуть готові до експлуатації, тоді як інфраструктура зберігання залишатиметься відсутньою або недостатньо підготовленою, унаслідок чого єдиним практичним варіантом стане експорт СО₂ для зберігання за кордоном із відповідними надвеликими економічними витратами, і може призвести до втрати можливостей формування національної інфраструктури зберігання СО₂. Таким чином випереджувальний старт досліджень у сфері зберігання, є критично важливою умовою формування необхідної інфраструктури. Це особливо актуально для України вже сьогодні, оскільки прийняті стратегічні рішення, в умовах початку післявоєнного відновлення, визначатимуть можливість декарбонізації промисловості у наступні десятиліття.

Першим кроком є дослідження потенціалу зберігання СО₂ в Україні, огляд потенційних потужностей для зберігання, потенційно придатних геологічних формацій, зокрема виснажених нафтових і газових родовищ, визначен-

ня можливості зберігання в них зрідженого CO₂, їхньої місткості, герметичності та оцінюванні ризиків.

До підземних формацій для постійного геологічного зберігання CO₂ насамперед належать виснажені поклади нафти і газу. В Україні є потужна геологічна база для розвитку технологій геологічного зберігання CO₂, зокрема у виснажених газових і нафтових родовищах. Багаторічна історія розвідки та експлуатації вуглеводневих ресурсів забезпечила наявність значного масиву геологічних, геофізичних і промислових даних, що створює сприятливі передумови для оцінки придатності таких об'єктів до використання як сховищ CO₂. На території України виділяються три основні нафтогазоносні регіони, кожен з яких потенційно може бути залучений до системи геологічного зберігання діоксиду вуглецю. Це Східний нафтогазоносний регіон, представлений Дніпровсько-Донецькою западиною. Західний нафтогазоносний регіон, до складу якого входять Волино-Подільська газонафтоносна провінція, Передкарпатська нафтогазоносна провінція, Карпатська складчаста нафтоносна область та Закарпатська газонасна область. Південний нафтогазоносний регіон, представлений Південно-Кримською (Кримською) нафтогазоносною провінцією.

Найперспективнішим з точки зору геологічного зберігання CO₂ є східний регіон. Він характеризується високим ступенем геологічної вивченості, значною кількістю виснажених і частково виснажених газових родовищ, а також наявністю розвинутої нафтогазової інфраструктури. Глибини залягання продуктивних горизонтів, наявність надійних покривних порід і багаторічний досвід експлуатації свердловин створюють сприятливі умови для переобладнання таких об'єктів під закачування CO₂. Додатковою перевагою регіону є його відносна близькість до великих промислових підприємств, що зменшує потребу у протяжних транспортних маршрутах.

Південний регіон характеризується наявністю шельфових покладів вуглеводнів. З геологічної точки зору регіон має потенціал для зберігання CO₂ у виснажених газових родовищах. Реалізація цього потенціалу потребує комплексної переоцінки геологічних умов. Важливою перевагою південного регіону є можливість інтеграції геологічного зберігання CO₂ з портовою інфраструктурою, що створює передумови для формування портів CO₂-хабів. Найбільш доцільними локаціями для їх розміщення є великі морські порти Чорного

моря, зокрема порти Одеси, Південного та Чорноморська, які мають розвинуту транспортну інфраструктуру, залізничні під'їзди та досвід обробки наливних і небезпечних вантажів. Розміщення CO₂-хабу у одному з таких портів дозволить організувати приймання зрідженого CO₂ з внутрішніх регіонів країни, здійснювати його тимчасове накопичення. На початкових етапах розвитку інфраструктури за малих об'ємів надходження CO₂ найдоцільнішим рішенням є використання спеціалізованого морського корабля для перевезення зрідженого діоксиду вуглецю, що дозволить забезпечити транспортування до шельфових родовищ без необхідності негайного будівництва морських трубопроводів. У довгостроковій перспективі, за умови формування стабільних великих обсягів надходження CO₂, портів хаб у південному регіоні доцільно буде поєднати з офшорними об'єктами зберігання морським трубопроводом.

Потенціал геологічного зберігання CO₂ у західному регіоні України пов'язаний насамперед із можливістю влаштування сховищ у виснажених газових і нафтових родовищах. Наявність таких родовищ створює базові передумови для використання існуючих колекторських горизонтів і частини промислової інфраструктури у проєктах геологічного зберігання CO₂. Водночас, геологічна будова західного регіону є структурно складною, що зумовлено інтенсивними тектонічними процесами, розломами та складчастістю. Це суттєво підвищує вимоги до обґрунтування безпечності зберігання CO₂ та потребує проведення поглиблених геологічних, геофізичних і гідрогеологічних досліджень, а також чисельного моделювання міграції CO₂ у підземних середовищах. Поряд із геологічними обмеженнями, західний регіон має суттєві логістичні та інфраструктурні переваги. Близькість до західних кордонів України та інтеграція у європейську газотранспортну систему створює сприятливі умови для включення майбутніх сховищ CO₂ у міжнародну інфраструктуру транспортування і зберігання діоксиду вуглецю. Це відкриває можливості для потенційного приймання CO₂ з країн Європейського Союзу.

З огляду на масштабність, технологічну складність і капіталомісткість інфраструктури уловлювання, транспортування та зберігання CO₂, їх упровадження доцільно здійснювати поетапно, починаючи з реалізації пілотного демонстраційного проєкту. Такий підхід відповідає міжнародній практиці розвитку CCS-інфраструктури та дозволяє апробувати техно-

логічні рішення, логістичні схеми і регуляторні механізми в обмеженому масштабі з подальшим масштабуванням успішного досвіду. В умовах повномасштабної війни та підвищених безпекових ризиків у східному і південному регіоні України західний регіон є найдоцільнішою локацією для реалізації пілотних досліджень та влаштуванні демонстраційного пілотного проєкту CO₂-інфраструктури.

Реалізація пілотного проєкту у західному регіоні дасть змогу:

- відпрацювати технологічні рішення з уловлювання, підготовки, транспортування та зберігання CO₂;
- отримати інформацію для формування нормативно-правової бази;
- оцінити економічну доцільність різних логістичних сценаріїв;
- знизити інвестиційні та операційні ризики перед масштабуванням інфраструктури в інших регіонах країни.

Таким чином, започаткування розвитку CO₂-інфраструктури з пілотного проєкту в західному регіоні України є обґрунтованим з точки зору безпеки, технічної здійсненності та створює основу для поетапного розгортання національної системи уловлювання, транспортування та зберігання CO₂ у післявоєнний період.

У межах реалізації пілотного проєкту у Західному регіоні України актуальним є завдання формування регіональної моделі інфраструктури транспортування та геологічного зберігання CO₂, яка має базуватися на поєднанні наявного інфраструктурного потенціалу та результатів поглиблених наукових досліджень. Насамперед це передбачає ідентифікації географічного розміщення основних джерел викидів CO₂ у західному регіоні, а також кількісна оцінка потенційних обсягів уловлювання діоксиду вуглецю. На цьому етапі мають бути сформовані відомості щодо просторового розподілу джерел CO₂ (зокрема цементних, біоенергетичних та інших промислових підприємств), їхніх часових режимів роботи та очікуваних обсягів уловлювання. Одними із найбільших стаціонарних джерел викидів CO₂ у західному регіоні України є цементні заводи повного виробничого циклу. До таких підприємств належать: ПрАТ “Івано-Франківськ-цемент” (Івано-Франківська область), ПрАТ “Миколаївцемент” (Львівська область), “Волинь-Цемент” філія ПрАТ “ВІПЦЕМ” (Рівненська область), АТ “Подільський цемент” (Хмельницька область). Зазначені підприємства формують основні концентровані джерела

промислових викидів CO₂ у західному регіоні, мають розвинену залізничну інфраструктуру та територіальну прив’язку до потенційних маршрутів транспортування CO₂. Це робить їх пріоритетними кандидатами для впровадження пілотних проєктів з уловлювання, зрідження та подальшого транспортування діоксиду вуглецю у межах регіональної моделі CCS.

На основі попередньо розроблених геологічних, технічних і безпекових критеріїв мають бути відібрані перспективні геологічні формації для підземного зберігання зрідженого CO₂ у західному регіоні, зокрема виснажені газові родовища. Повинні бути умови для влаштування біля таких родовищ спеціалізованих CO₂-хабів, призначених для приймання, тимчасового накопичення та подальшої подачі діоксиду вуглецю до систем закачування у підземні формації. До таких хабів має бути можливість доставки зрідженого CO₂ залізничним транспортом. Також для таких формацій необхідно розрахувати потенційну місткість, оцінити герметичність колекторів і покривних порід, а також ідентифікувати можливі геологічні ризики, пов’язані з довгостроковим зберіганням діоксиду вуглецю.

Наступним етапом є проведення тривимірного чисельного моделювання процесів закачування та міграції та зберігання CO₂ у вибраних геологічних об’єктах з урахуванням газодинамічних та термобаричних факторів. Таке моделювання дозволить оцінити динаміку поширення CO₂ у пласті, прогнозувати зміни тиску та визначити оптимальні режими закачування. Паралельно мають бути розроблені технічні вимоги до відновлення, підтримування у працездатному стані та переобладнання існуючих свердловин, забезпечення їхньої довготривалої працездатності, а також методика моніторингу стану свердловин і пластів на всіх етапах зберігання CO₂.

Окремим завданням є формування нормативно-правової та нормативно-технічної бази, яка регламентуватиме безпечне транспортування і геологічне зберігання CO₂. Результати пілотного проєкту мають стати науковим підґрунтям для розроблення відповідних стандартів, процедур контролю та механізмів управління ризиками.

Завершальним етапом має бути оцінка можливостей масштабування отриманих результатів на інші регіони України у післявоєнний період, а також аналіз потенціалу інтеграції регіональної мережі транспортування і зберігання CO₂ у загальноєвропейську інфраструктуру.

Обговорення і рекомендації

В Україні є суттєвий потенціал для розвитку сучасних низьковуглецевих технологій, зокрема систем уловлювання, транспортування та геологічного зберігання CO₂. Найвні промислові джерела концентрованих викидів CO₂ та є перспективні геологічні формації, що створює передумови не тільки для задоволення внутрішніх потреб у зберіганні CO₂, а і надання зовнішніх експортно орієнтованих послуг.

Світові тенденції розвитку технологій декарбонізації демонструють стійке зростання інвестицій у CCS, що зумовлено як поглибленням негативних кліматичних змін, так і міжнародними зобов'язаннями зі скорочення викидів парникових газів. Зобов'язання, взяті в межах Паризької угоди, а також запровадження механізму прикордонного вуглецевого коригування (СВАМ), формують для України потужний зовнішній стимул до прискореного впровадження технологій декарбонізації. Очікуване зростання вартості вуглецевих квот і розширення переліку товарів, охоплених СВАМ, додатково підсилює економічну доцільність таких рішень.

Водночас, старт розвитку нових кліматичних технологій ускладнюється відсутністю розвиненої інфраструктури, що стримує попит, а відсутність попиту стримує інвестиції в інфраструктуру. У зв'язку з цим ключовою рекомендацією є реалізація демонстраційних пілотних проєктів із повним технологічним ланцюжком (уловлювання-транспортування-зберігання), які дадуть змогу відпрацювати технічні, логістичні, регуляторні та безпекові рішення, а також сформувати довіру з боку інвесторів і суспільства.

З огляду на воєнні та безпекові ризики, найдоцільнішим регіоном для започаткування пілотних демонстраційних проєктів є західний регіон України, де є промислові джерела викидів CO₂, транспортна інфраструктура і потенціал зберігання діоксиду вуглецю та інтеграції з європейською інфраструктурою. Пілотний проєкт має включати інвентаризацію джерел CO₂ в західній Україні, формування регіонального сценарію транспортування, оцінку геологічних формацій для зберігання, насамперед виснажені нафтові і газові родовища, та створення нормативно-правового підґрунтя.

Аналіз сучасних тенденцій у країнах Європейського Союзу свідчить, що технології уловлювання та зрідження CO₂, особливо у цементній та біоенергетичній промисловості, поступово переходять зі стадії демонстраційних рішень у повсякденну промислову практи-

ку. Такі технології вже впроваджуються у промислових масштабах і розглядаються як стандартний інструмент досягнення кліматичних цілей. Завдяки накопиченню практичного досвіду, уніфікації технічних рішень та розвитку модульних установок спостерігається успішне масштабування систем уловлювання і зрідження CO₂, що супроводжується зниженням капітальних і експлуатаційних витрат.

Окремої уваги потребує оцінка потенціалу довгострокового геологічного зберігання CO₂ в Україні, насамперед у західному регіоні. Хоча використання виснажених газових і нафтових родовищ є перспективним напрямом, масштабне впровадження таких рішень вимагає поглиблених геологічних досліджень, тривимірного моделювання процесів закачування та міграції CO₂ за різними сценаріями, визначення оптимальних режимів закачування зберігання, розроблення плану моніторингу та оцінка ризиків, пов'язаних зі довгостроковим зберіганням CO₂. Враховуючи тривалість створення інфраструктури зберігання, ці наукові дослідження доцільно розпочинати вже на ранніх етапах розвитку CCS в Україні. Тоді необхідно здійснювати тестові закачування CO₂ у родовища, що дасть змогу отримати набір експериментальних даних для подальших досліджень.

У науковій сфері пріоритетними напрямками досліджень мають стати питання безпечного транспортування і зберігання CO₂, довговічності матеріалів, впливу CO₂ на існуючу інфраструктуру, а також розроблення дешевих і ефективних технологій уловлювання, зрідження, транспортування та зберігання. Результати таких досліджень повинні лягти в основу створення, оновлення нормативної бази, стандартів і технічних регламентів.

В освітньому вимірі необхідним є формування матеріалів для підготовки фахівців у сфері CCS, включно з розробленням освітньо-професійних програм для магістрів, курсів підвищення кваліфікації та навчальних матеріалів. Паралельно важливим завданням є підвищення обізнаності широкої громадськості, формування соціального прийняття нових технологій і довіри до них.

Таким чином, розвиток інфраструктури уловлювання, транспортування та зберігання CO₂ має розглядатися як багаторівневе стратегічне завдання, реалізація якого через пілотні проєкти, наукові дослідження, освітні програми та міжнародну інтеграцію створить основу для досягнення кліматичної нейтральності.

Висновок

Європейський досвід свідчить, що практична реалізація повного ланцюжка CCS є можливою завдяки функціональному його поділу на окремі підпроекти – уловлювання, транспортування та зберігання CO₂. Такий підхід створює передумови для прийняття інвестиційних рішень, оскільки дозволяє власникам джерел викидів зосереджуватися на впровадженні технологій уловлювання без необхідності розроблення власних рішень для транспортування і зберігання. При цьому газовидобувні компанії можуть розвивати відповідні проекти з геологічного зберігання CO₂ незалежно від темпів і масштабів впровадження технологій уловлювання на окремих промислових підприємствах.

Особливу увагу в процесі планування та впровадження технологій уловлювання CO₂ доцільно приділяти цементним і біогазовим підприємствам, оскільки в цих секторах значна частка викидів CO₂ має процесне походження і є безпосередньо пов'язаною з основними виробничими операціями. У цементній промисловості такі викиди зумовлені насамперед реакціями декарбонізації вапняку під час випалу клінкеру, тоді як у біогазовому та біометановому виробництві CO₂ утворюється як невід'ємний побічний продукт очищення біогазу. На відміну від цього, в більшості інших секторів промисловості та енергетики викиди CO₂ є переважно результатом спалювання палива з метою отримання енергії, що відкриває ширші можливості для їх скорочення шляхом переходу на альтернативні низьковуглецеві або відновлювані джерела енергії.

Найбільш вірогідно, що у післявоєнний період технології уловлювання і зрідження CO₂ стануть повсякденням роботи цементних і біогазових заводів. Зарубіжні промислові компанії вже на сьогодні масштабують відповідні успішні проекти, і з огляду на інтеграцію частини українських цементних заводів у міжнародні виробничі ланцюги, ці технології з високою імовірністю будуть поширюватися і в Україні. Це означає, що інфраструктуру транспортування і зберігання треба проектувати з урахуванням роботи зі зрідженим CO₂, як найгнучкішим і універсальним рішенням для поєднання великих промислових джерел і розосереджених біогазових заводів. Для транспортування зрідженого CO₂ від цементних заводів доцільним буде використання залізничного транспорту, а біогазових – автомобільного. Із метою агрегування потоків діоксиду вуглецю з різних джерел і вирівнювання режимів його подачі для закачування у геологічні формації

необхідним є створення CO₂-хабів. У південному регіоні України розміщення такого CO₂-хабу є доцільним на базі портової інфраструктури.

З огляду на значний геологічний потенціал України, зокрема наявність численних виснажених газових родовищ, а також її вигідне географічне розташування, є передумови для відігравання важливої ролі України у формуванні та розвитку регіональної системи геологічного зберігання CO₂ у східній Європі. Розвиток CCS у багатьох проектах розпочинався зі створення сховищ. Тому для започаткування розвитку зберігання CO₂ першочергово доцільно здійснити системний скринінг і відбір потенційно придатних геологічних формацій, зокрема насамперед виснажених газових і нафтових родовищ західної України. Тоді провести комплексні геологічні, геофізичні і гідрогеологічні дослідження, розрахунок їхньої місткості та оцінку довгострокової герметичності. Критично важливим є виконання тривимірного чисельного моделювання процесів закачування та міграції CO₂ за різними сценаріями, розроблення плану моніторингу, визначення оптимальних режимів закачування, розроблення технічних рішень щодо відновлення і переобладнання існуючих свердловин та оцінка ризиків, пов'язаних зі довгостроковим зберіганням CO₂. Паралельно необхідною є розробка та впровадження повноцінних систем моніторингу, які забезпечуватимуть контроль безпечності геологічного зберігання на всіх етапах життєвого циклу сховища. Реалізація демонстраційних пілотних проектів закачування з обмеженими обсягами CO₂ дасть змогу верифікувати отримані наукові результати.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Дорошенко Я. В., Карпаш М. О., Стецюк С. М., Бабельський Р. М., Воловецький В. Б. Перспективи та проблемні питання становлення і розвитку водневої енергетики в Україні. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2022. № 22(1). С. 7-33. DOI: [10.31471/1993-9973-2022-1\(82\)-7-33](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2022-1(82)-7-33)
2. Все про механізм CBAM: що це, як і коли запрацює та який вплив матиме на Україну. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/vse-pro-mehanizm-cbam-shho-ce-yak-i-koli-zapracjuie-ta-yakij-vpliv-matime-na-ukrainu/> (дата звернення: 19.04.2026).
3. Механізм прикордонного вуглецевого коригування (Carbon border adjustment mechanism (CBAM)). URL: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2022-08/1%20FINAL%20Tree%20cbam_297x210mm_4%20B4_web_180822.pdf (дата звернення: 19.04.2026).
4. Механізм коригування прикордонного вуглецевого податку (CBAM). URL: <https://kpmg.com/ua/uk/services/advisory/esg/cbam.html> (дата звернення: 19.04.2026).
5. Boot-Handford M., Abanades J., Anthony E., Blunt M., Brandani S., Mac Dowell N., et al. Carbon Capture and Storage Update. *Energy & Environmental Science*. 2014. № 1. P. 130-189. DOI: [10.1039/c3ee42350f](https://doi.org/10.1039/c3ee42350f)
6. Leung D., Caramanna G., Maroto-Valer M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 39. P. 426-443. DOI: [10.1016/j.rser.2014.07.093](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093)
7. Rochelle G. Amine scrubbing for CO₂ capture. *Science*. 2009. Vol. 325. Issue 5948. P. 1652-1654. DOI: [10.1126/science.117673](https://doi.org/10.1126/science.117673)
8. Матківський С. В. Технології уловлювання техногенного діоксиду вуглецю та перспективи його утилізації у виснажених нафтогазових родовищах. *Нафтогазова енергетика*. 2021. № 2(36). С. 31–41. DOI: [10.31471/1993-9868-2021-2\(36\)-31-41](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2021-2(36)-31-41)
9. McCoy S. T., Rubin E. S. An engineering-economic model of pipeline transport of CO₂ with application to carbon capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2008. Vol. 2, Issue 2. P. 219-229. DOI: [10.1016/S1750-5836\(07\)00119-3](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00119-3)
10. Li H., Jakobsen J., Wilhelmsen Ø., Yan J. PVTxy properties of CO₂ mixtures relevant for CO₂ transport in pipelines. *Energy Procedia*. 2011. Vol. 88, Issue 11. P. 3567-3579. DOI: [10.1016/j.apenergy.2011.03.052](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.052)
11. Fan X., Liu G. Ouyang X., Yan F., Hu Q., Wang C., Li Y. Dynamic risk assessment of corrosion in CO₂ transport pipelines under multi-factor coupling and failure probability modeling. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2025. P. 100342. DOI: [10.1016/j.jpse.2025.100342](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2025.100342)
12. Serediuk M., Tsiurak V. Application of unloaded gas pipelines for the transportation of carbon dioxide in a gaseous state. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2025. Vol. 129(2). P. 61-75. DOI: [10.5604/01.3001.0055.2682](https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.2682)
13. Bachu S. CO₂ storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008. Vol. 34, Issue 2. P. 254-273 DOI: [10.1016/j.peccs.2008.05.001](https://doi.org/10.1016/j.peccs.2008.05.001)
14. Metz B., Davidson O., Coninck H., Loos M., Meyer L. IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2005, 442 p.
15. Juanes R., MacMinn C., Szulczewski M. The footprint of the CO₂ plume during carbon dioxide storage in saline aquifers. Storage Efficiency for Capillary Trapping at the Basin Scale. *Transp Porous Med*. 2010. № 82. P. 19-30. DOI: [10.1007/s11242-009-9420-3](https://doi.org/10.1007/s11242-009-9420-3)
16. Burachok O., Nistor M., Sosio G., Kondrat O., Matkivskiy S. Potential application of CO₂ for enhanced condensate recovery combined with geological storage in the depleted gas-condensate reservoirs. *Management Systems in Production Engineering*. 2021. Vol. 29(2). P. 106-113. DOI: [10.2478/mspe-2021-0014](https://doi.org/10.2478/mspe-2021-0014)
17. Carey J., Wigand M., Chipera S., WoldeGabriel G., Pawar R., Lichtner P., Wehner S., Raines M., Guthrie G. Analysis and performance of oil well cement with 30 years Of CO(2) exposure from the SACROC Unit, West Texas, USA. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2007. Vol. 1(1). P. 75-85. DOI: [10.1016/S1750-5836\(06\)00004-1](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(06)00004-1)
18. Carbon Capture, Utilization, and Storage. URL: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/sustainability/we-decarbonize-the-construction-industry/ccus> (дата звернення: 19.04.2026).

19. Brevik CCS – world's first carbon-capture facility in the cement industry. URL: <https://www.brevikccs.com/en> (дата звернення: 19.04.2026).
20. CCS world premiere for Heidelberg Materials. URL: <https://www.agg-net.com/news/ccs-world-premiere-for-heidelberg-materials> (дата звернення: 19.04.2026).
21. A world first in Norway – CCS technology for cement production. URL: <https://www.siekmann-econosto.de/en/a-world-first-in-norway-ccs-technology-for-cement-production/> (дата звернення: 19.04.2026).
22. Slite CCS Project, Sweden. URL: <https://www.nsenergybusiness.com/projects/slite-ccs-project-sweden/?cf-view> (дата звернення: 19.04.2026).
23. Key contribution to HeidelbergCement's ambitious new sustainability targets: CCS project in Sweden takes next step. URL: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-30-05-2022> (дата звернення: 19.04.2026).
24. Dekarbonizacija cementne industrije: Holcimov projekt na listi strateških za državu. URL: <https://boljaenergija.24sata.hr/dekarbonizacija-cementne-industrije-holcimov-projekt-na-listi-strateskih-za-drzavu> (дата звернення: 19.04.2026).
25. Kodeco net zero project. URL: <https://www.holcim.com/what-we-do/green-operations/ccus/kodeco> (дата звернення: 19.04.2026).
26. Heidelberg Materials' GeZero project enters crucial technical planning phase. URL: <https://www.worldcement.com/europe-cis/12112024/heidelberg-materials-gezero-project-enters-crucial-technical-planning-phase/> (дата звернення: 19.04.2026).
27. GeZero: First German inland cement plant Geseke becomes net carbon negative by implementing a full CCS chain. URL: https://ec.europa.eu/assets/cinea/project_fiches/innovation_fund/101133005.pdf (дата звернення: 19.04.2026).
28. Geseke CCS project reaches technical planning phase. URL: <https://www.cemnet.com/News/story/178101/geseke-ccs-project-reaches-technical-planning-phase.html> (дата звернення: 19.04.2026).
29. AirvultGOCO₂: Heidelberg Materials launches CCUS project in France. URL: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-2024-03-13> (дата звернення: 19.04.2026).
30. AirvultGOCO₂ sélectionné par le Fonds Innovation de l'Union européenne. URL: <https://www.heidelbergmaterials.fr/fr/node/523390> (дата звернення: 19.04.2026).
31. Pioneering CCS in the Mediter-ranean: Hei-del-berg Ma-te-ri-als to launch de-car-bon-i-sa-tion project in Italy. URL: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-2024-09-30> (дата звернення: 19.04.2026).
32. Anthemis. URL: <https://www.anthemis-ccs.com/en> (дата звернення: 19.04.2026).
33. The HuCCS₂ Project: Developing a CCS Hub Onshore Poland. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202521078> (дата звернення: 19.04.2026).
34. HeidelbergCement's ANRAV project wins EU Innovation funding. URL: <https://www.cemnet.com/News/story/173076/heidelbergcement-s-anrav-project-wins-eu-innovation-funding.html> (дата звернення: 19.04.2026).
35. Northern Lights. URL: https://www.equinor.com/energy/northern-lights?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 19.04.2026).
36. CO₂ transport and storage: Northern Lights. URL: <https://ccsnorway.com/transport-storage-northern-lights/> (дата звернення: 19.04.2026).
37. Exploring Norway Northern Lights CCS Project. URL: <https://ecadin.org/norway-northern-lights-ccs-project/> (дата звернення: 19.04.2026).
38. Gasunie, partners make FID on first CO₂ storage project in the Netherlands. URL: <https://www.ogj.com/energy-transition/article/14300378/gasunie-partners-make-fid-on-first-co2-storage-project-in-the-netherlands> (дата звернення: 19.04.2026).
39. About the aramis project. URL: https://www.aramis-ccs.com/project/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 19.04.2026).
40. Aramis CCS project advances with start of FEED work. URL: <https://www.ogj.com/energy-transition/article/14303301/aramis-ccs-project-advances-with-start-of-feed-work> (дата звернення: 19.04.2026).
41. Netherlands backs largest CCS project and commits millions to carbon removal. URL: <https://www.green.earth/news/netherlands-backs-largest-ccs-project-and-commits-millions-to-carbon-removal> (дата звернення: 19.04.2026).
42. Aramis. URL: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/bureau-energieprojecten/lopende-projecten/aramis> (дата звернення: 19.04.2026).

43. Aramis Launch Stores project website goes live. URL: <https://www.shell.com/what-we-do/carbon-capture-and-storage/shell-offshore-carbon-storage-nl/location-and-timeline.html> (дата звернення: 19.04.2026).

44. EU Funds Awarded for Antwerp@C CO2 Export Hub. URL: <https://chemxplore.com/news/air-liquide-fluxys-port-of-antwerp-bruges-eu-funding-antwerp-c-co2-export-hub> (дата звернення: 19.04.2026).

45. Antwerp to be CO2 export hub. URL: <https://www.worldports.org/antwerp-to-be-co2-export-hub/> (дата звернення: 19.04.2026).

46. Construction begins on Greensand's CO₂ transit terminal at Port Esbjerg. The first gateway for Carbon storage in the EU. URL: <https://www.ineos.com/news/shared-news/construction-begins-on-greensands-co-transit-terminal-at-port-esbjerg.-the-first-gateway-for-carbon-storage-in-the-eu/> (дата звернення: 19.04.2026).

47. Greensand's CO₂ Transit Terminal at Port Esbjerg Starts Taking Shape. URL: <https://www.oedigital.com/news/525359-greensand-s-co2-transit-terminal-at-port-esbjerg-starts-taking-shape> (дата звернення: 19.04.2026).

48. Decarbonization of the Dunkirk basin: Air Liquide and Dunkerque LNG CO₂ infrastructure project takes a major step forward and receives support from the European Union. URL: <https://www.airliquide.com/group/press-releases-news/2024-06-18/decarbonization-dunkirk-basin-air-liquide-and-dunkerque-lng-co2-infrastructure-project-takes-major> (дата звернення: 19.04.2026).

49. Delta Rhine Corridor. URL: <https://www.gasunie.nl/en/projects/delta-rhine-corridor> (дата звернення: 19.04.2026).

50. Delta Rhine Corridor. URL: https://ewir.jura.uni-koeln.de/sites/ewir/user_upload/Presentation_Bas_Pulles_DRC_-_Cologne_-_Alleen-lezen.pdf (дата звернення: 19.04.2026).

51. Delta Rhine Corridor West. URL: <https://www.gasunie.nl/en/projects/delta-rhine-corridor/delta-rhine-corridor-west> (дата звернення: 19.04.2026).

52. German Regulator Clears Two Major Carbon Capture Pipelines. URL: <https://www.pipeline-journal.net/news/german-regulator-clears-two-major-carbon-capture-pipelines> (дата звернення: 19.04.2026).

53. Bundeskartellamt has no competition concerns about two CO₂ pipeline cooperation projects. URL: https://www.internationale-kartellkonferenz.de/SharedDocs/Meldung/EN/Pressemitteilungen/2025/08_05_2025_CO2_Pipelines.html (дата звернення: 19.04.2026).

54. Dutch CO₂ quintet paving the way for Northwest Europe's cross-border CCS network. URL: <https://www.offshore-energy.biz/dutch-co2-quintet-paving-the-way-for-northwest-europes-cross-border-ccs-network/> (дата звернення: 19.04.2026).

55. Eni and Snam Launch Italy's First Carbon Capture and Storage Project. URL: <https://jpt.spe.org/eni-and-snam-launch-italys-first-carbon-capture-and-storage-project> (дата звернення: 19.04.2026).

56. Ravenna CCS. URL: https://ccushub.ogci.com/focus_hubs/ravenna/ (дата звернення: 19.04.2026).

57. Our activities in Ravenna. URL: <https://ravennaccs.com/en-IT/project/ravenna-hub> (дата звернення: 19.04.2026).

58. Our activities in Ravenna. URL: <https://www.eni.com/en-IT/actions/global-activities/Italy/ravenna.html> (дата звернення: 19.04.2026).

59. 'Exceptional' Dataset Captured During Carbon Dioxide Injection Test in the North Sea. URL: <https://jpt.spe.org/exceptional-data-set-captured-during-carbon-dioxide-injection-test-in-the-north-sea> (дата звернення: 19.04.2026).

60. The Poseidon Project. URL: <https://www.perenco-ccs.com/the-poseidon-project/> (дата звернення: 19.04.2026).

61. A Transformational Carbon Capture & Storage Solution for the UK and Continental Europe. URL: <https://carboncatalyst.com/portfolio/poseidon/> (дата звернення: 19.04.2026).

62. Carbon Catalyst Begins UK's First Carbon Storage Project Trial In North Sea. URL: <https://carbonherald.com/carbon-catalyst-begins-poseidon-ccs-project-trial/> (дата звернення: 19.04.2026).

63. UK First: CO₂ Injection Test for Poseidon CCS Wraps Up at Perenco's North Sea Field. URL: <https://www.oedigital.com/news/524461-uk-first-co2-injection-test-for-poseidon-ccs-wraps-up-at-perenco-s-north-sea-field> (дата звернення: 19.04.2026).

64. Dutch firm wins platform modification work for large-scale CCS project. URL: <https://www.offshore-energy.biz/dutch-firm-wins-platform-modification-work-for-large-scale-ccs-project/> (дата звернення: 19.04.2026).
65. Why moisture measurement is crucial to CCS. URL: https://www.processsensing.com/en-us/blog/porthos-exciting-approach-carbon-capture-storage.htm?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 19.04.2026).
66. Porthos' Seizure of TAQA's P18-A Platform: A Carbon Capture Milestone for Europe. URL: <https://www.ainvest.com/news/porthos-seizure-taqa-p18-platform-carbon-capture-milestone-europe-2505/> (дата звернення: 19.04.2026).
67. Carbon Capture Storage. URL: <https://110ccs-storage.com/home/storage-2/> (дата звернення: 19.04.2026).
68. L10 gas field. URL: https://www.wikiwand.com/en/articles/L10_gas_field (дата звернення: 19.04.2026).
69. Emitters oppose ministry plan for Prinos CO₂ storage allocation. URL: <https://energypress.eu/tag/prinos/> (дата звернення: 19.04.2026).
70. CO₂ storage at Prinos field. URL: <https://www.ekathimerini.com/economy/1236408/co2-storage-at-prinos-field/> (дата звернення: 19.04.2026).
71. Prinos, a CO₂ storage option for SE. Europe. URL: <https://www.iene.eu/articlefiles/inline/sardi%20-%2014th%20seed.pdf> (дата звернення: 19.04.2026).
72. Our activities in Ravenna. URL: <https://ravennaccs.com/en-IT/project/ravenna-hub> (дата звернення: 19.04.2026).
73. Eni Injects First CO₂ in Offshore Ravenna CCS Project. URL: <https://jpt.spe.org/eni-injects-first-co2-in-offshore-ravenna-ccs-project> (дата звернення: 19.04.2026).
74. Компанія “Кривий Ріг Цемент”. URL: <https://krcement.com/about-company/> (дата звернення: 19.04.2026).
75. IEA - International Energy Agency. Iron and Steel Technology Roadmap. IEA report. 2022. 187 p.
76. ArcelorMittal у Європі скоротить викиди CO₂ на 30% до 2030 року. URL: <https://gmk.center.ua/news/arcelormittal-u-ievropi-skorotit-vikidi-so2-na-30-do-2030-roku/> (дата звернення: 19.04.2026).
77. Гелетуха Г. Г., Кучерук П. П., Матвеев Ю. Б. Перспективи виробництва біометану в Україні. Аналітична записка УАБІО № 29. Біоенергетична асоціація України, 2022. 58 с.

References

1. Doroshenko Ya. V., Karpash M. O., Stetsiuk S. M., Babelskyi R. M., Volovetskyi V. B. Perspektyvy ta problemni pytannia stanovlennia i rozvytku vodnevoi enerhetyky v Ukraini. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2022. № 22(1). S. 7-33. DOI: [10.31471/1993-9973-2022-1\(82\)-7-33](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2022-1(82)-7-33) [in Ukrainian]
2. Vse pro mekhanizm SVAM: shcho tse, yak i koly zapratsiuie ta yakyi vplyv matyme na Ukrainu. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/vse-pro-mekhanizm-cbam-shho-ce-yak-i-koli-zapracjuie-ta-yakij-vplyv-matyme-na-ukrainu/> [in Ukrainian]
3. Mekhanizm prykordonnoho vuhletsevoho koryhuvannia (Carbon border adjustment mechanism (SVAM)). URL: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2022-08/1%20FINAL%20Tree%20cbam_297x210mm_4%20B4_web_180822.pdf [in Ukrainian]
4. Mekhanizm koryhuvannia prykordonnoho vuhletsevoho podatku (SVAM). URL: <https://kpmg.com/ua/uk/services/advisory/esg/cbam.html> (дата звернення: 19.04.2026). [in Ukrainian]
5. Boot-Handford M., Abanades J., Anthony E., Blunt M., Brandani S., Mac Dowell N., et al. Carbon Capture and Storage Update. *Energy & Environmental Science*. 2014. № 1. P. 130-189. DOI: [10.1039/c3ee42350f](https://doi.org/10.1039/c3ee42350f)
6. Leung D., Caramanna G., Maroto-Valer M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 39. P. 426-443. DOI: [10.1016/j.rser.2014.07.093](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093)
7. Rochelle G. Amine scrubbing for CO₂ capture. *Science*. 2009. Vol. 325. Issue 5948. P. 1652-1654. DOI: [10.1126/science.117673](https://doi.org/10.1126/science.117673)
8. Matkivskiy S. V. Tekhnologii ulovliuvannia tekhnolohennoho dioksydu vuhletsiu ta perspektyvy yoho utylizatsii u vysnazhenykh naftohazovykh rodovyshchakh. *Naftohazova enerhetyka*. 2021. № 2(36). S. 31-41. DOI: [10.31471/1993-9868-2021-2\(36\)-31-41](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2021-2(36)-31-41) [in Ukrainian]

9. McCoy S. T., Rubin E. S. An engineering-economic model of pipeline transport of CO₂ with application to carbon capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2008. Vol. 2, Issue 2. P. 219-229. DOI: [10.1016/S1750-5836\(07\)00119-3](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00119-3)
10. Li H., Jakobsen J., Wilhelmsen Ø., Yan J. PVTxy properties of CO₂ mixtures relevant for CO₂ transport in pipelines. *Energy Procedia*. 2011. Vol. 88, Issue 11. P. 3567-3579. DOI: [10.1016/j.apenergy.2011.03.052](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.052)
11. Fan X., Liu G. Ouyang X., Yan F., Hu Q., Wang C., Li Y. Dynamic risk assessment of corrosion in CO₂ transport pipelines under multi-factor coupling and failure probability modeling. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2025. P. 100342. DOI: [10.1016/j.jpse.2025.100342](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2025.100342)
12. Serediuk M., Tsiurak V. Application of unloaded gas pipelines for the transportation of carbon dioxide in a gaseous state. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2025. Vol. 129(2). P. 61-75. DOI: [10.5604/01.3001.0055.2682](https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.2682)
13. Bachu S. CO₂ storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008. Vol. 34, Issue 2. P. 254-273 DOI: [10.1016/j.peccs.2008.05.001](https://doi.org/10.1016/j.peccs.2008.05.001)
14. Metz B., Davidson O., Coninck H., Loos M., Meyer L. IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2005, 442 p.
15. Juanes R., MacMinn C., Szulczewski M. The footprint of the CO₂ plume during carbon dioxide storage in saline aquifers. Storage Efficiency for Capillary Trapping at the Basin Scale. *Transp Porous Med*. 2010. № 82. P. 19-30. DOI: [10.1007/s11242-009-9420-3](https://doi.org/10.1007/s11242-009-9420-3)
16. Burachok O., Nistor M., Sosio G., Kondrat O., Matkivskyi S. Potential application of CO₂ for enhanced condensate recovery combined with geological storage in the depleted gas-condensate reservoirs. *Management Systems in Production Engineering*. 2021. Vol. 29(2). P. 106-113. DOI: [10.2478/mspe-2021-0014](https://doi.org/10.2478/mspe-2021-0014)
17. Carey J., Wigand M., Chipera S., WoldeGabriel G., Pawar R., Lichtner P., Wehner S., Raines M., Guthrie G. Analysis and performance of oil well cement with 30 years of CO₂ exposure from the SACROC Unit, West Texas, USA. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2007. Vol. 1(1). P. 75-85. DOI: [10.1016/S1750-5836\(06\)00004-1](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(06)00004-1)
18. Carbon Capture, Utilization, and Storage. URL: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/sustainability/we-decarbonize-the-construction-industry/ccus>
19. Brevik CCS – world's first carbon-capture facility in the cement industry. URL: <https://www.brevikccs.com/en>
20. CCS world premiere for Heidelberg Materials. URL: <https://www.agg-net.com/news/ccs-world-premiere-for-heidelberg-materials>
21. A world first in Norway –CCS technology for cement production. URL: <https://www.siekmann-econosto.de/en/a-world-first-in-norway-ccs-technology-for-cement-production/>
22. Slite CCS Project, Sweden. URL: <https://www.nsenerybusiness.com/projects/slite-ccs-project-sweden/?cf-view>
23. Key contribution to HeidelbergCement's ambitious new sustainability targets: CCS project in Sweden takes next step. URL: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-30-05-2022>
24. Dekarbonizacija cementne industrije: Holcimov projekt na listi strateških za državu. URL: <https://boljaenergija.24sata.hr/dekarbonizacija-cementne-industrije-holcimov-projekt-na-listi-strateskih-za-drzavu>
25. Kodeco net zero project. URL: <https://www.holcim.com/what-we-do/green-operations/ccus/kodeco>
26. Heidelberg Materials' GeZero project enters crucial technical planning phase. URL: <https://www.worldcement.com/europe-cis/12112024/heidelberg-materials-gezero-project-enters-crucial-technical-planning-phase/>
27. GeZero: First German inland cement plant Geseke becomes net carbon negative by implementing a full CCS chain. URL: https://ec.europa.eu/assets/cinea/project_fiches/innovation_fund/101133005.pdf
28. Geseke CCS project reaches technical planning phase. URL: <https://www.cemnet.com/News/story/178101/geseke-ccs-project-reaches-technical-planning-phase.html>
29. AirvaultGOCO: Heidelberg Materials launches CCUS project in France. URL: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-2024-03-13>

30. AirvultGOCO2 sélectionné par le Fonds Innovation de l'Union européenne. URL: <https://www.heidelbergmaterials.fr/fr/node/523390>
31. Pioneering CCS in the Mediter-ranean: Hei-del-berg Ma-te-ri-als to launch de-car-bon-i-sa-tion project in Italy. URL: <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-2024-09-30> (дата звернення: 19.04.2026).
32. Anthemis. URL: <https://www.anthemis-ccs.com/en>
33. The HuCCSsar Project: Developing a CCS Hub Onshore Poland. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202521078>
34. HeidelbergCement's ANRAV project wins EU Innovation funding. URL: <https://www.cemnet.com/News/story/173076/heidelbergcement-s-anrav-project-wins-eu-innovation-funding.html>
35. Northern Lights. URL: https://www.equinor.com/energy/northern-lights?utm_source=chatgpt.com
36. CO₂ transport and storage: Northern Lights. URL: <https://ccsnorway.com/transport-storage-northern-lights/>
37. Exploring Norway Northern Lights CCS Project. URL: <https://ecadin.org/norway-northern-lights-ccs-project/>
38. Gasunie, partners make FID on first CO₂ storage project in the Netherlands. URL: <https://www.ogj.com/energy-transition/article/14300378/gasunie-partners-make-fid-on-first-co2-storage-project-in-the-netherlands>
39. About the aramis project. URL: https://www.aramis-ccs.com/project/?utm_source=chatgpt.com
40. Aramis CCS project advances with start of FEED work. URL: <https://www.ogj.com/energy-transition/article/14303301/aramis-ccs-project-advances-with-start-of-feed-work>
41. Netherlands backs largest CCS project and commits millions to carbon removal. URL: <https://www.green.earth/news/netherlands-backs-largest-ccs-project-and-commits-millions-to-carbon-removal>
42. Aramis. URL: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/bureau-energieprojecten/lopende-projecten/aramis>
43. Aramis Launch Stores project website goes live. URL: <https://www.shell.com/what-we-do/carbon-capture-and-storage/shell-offshore-carbon-storage-nl/location-and-timeline.html>
44. EU Funds Awarded for Antwerp@C CO₂ Export Hub. URL: <https://chemxplore.com/news/air-liquide-fluxys-port-of-antwerp-bruges-eu-funding-antwerp-c-co2-export-hub>
45. Antwerp to be CO₂ export hub. URL: <https://www.worldports.org/antwerp-to-be-co2-export-hub/>
46. Construction begins on Greensand's CO₂ transit terminal at Port Esbjerg. The first gateway for Carbon storage in the EU. URL: <https://www.ineos.com/news/shared-news/construction-begins-on-greensands-co-transit-terminal-at-port-esbjerg.-the-first-gateway-for-carbon-storage-in-the-eu/>
47. Greensand's CO₂ Transit Terminal at Port Esbjerg Starts Taking Shape. URL: <https://www.oedigital.com/news/525359-greensand-s-co2-transit-terminal-at-port-esbjerg-starts-taking-shape>
48. Decarbonization of the Dunkirk basin: Air Liquide and Dunkerque LNG CO₂ infrastructure project takes a major step forward and receives support from the European Union. URL: <https://www.airliquide.com/group/press-releases-news/2024-06-18/decarbonization-dunkirk-basin-air-liquide-and-dunkerque-lng-co2-infrastructure-project-takes-major>
49. Delta Rhine Corridor. URL: <https://www.gasunie.nl/en/projects/delta-rhine-corridor>
50. Delta Rhine Corridor. URL: https://ewir.jura.uni-koeln.de/sites/ewir/user_upload/Presentation_Bas_Pulles_DRC_-_Cologne_-_Alleen-lezen.pdf
51. Delta Rhine Corridor West. URL: <https://www.gasunie.nl/en/projects/delta-rhine-corridor/delta-rhine-corridor-west>
52. German Regulator Clears Two Major Carbon Capture Pipelines. URL: <https://www.pipeline-journal.net/news/german-regulator-clears-two-major-carbon-capture-pipelines>
53. Bundeskartellamt has no competition concerns about two CO₂ pipeline cooperation projects. URL: https://www.internationale-kartellkonferenz.de/SharedDocs/Meldung/EN/Pressemitteilungen/2025/08_05_2025_CO2_Pipelines.html
54. Dutch CO₂ quintet paving the way for Northwest Europe's cross-border CCS network. URL: <https://www.offshore-energy.biz/dutch-co2-quintet-paving-the-way-for-northwest-europes-cross-border-ccs-network/>

55. Eni and Snam Launch Italy's First Carbon Capture and Storage Project. URL: <https://jpt.spe.org/eni-and-snam-launch-italys-first-carbon-capture-and-storage-project>
56. Ravenna CCS. URL: https://ccushub.ogci.com/focus_hubs/ravenna/
57. Our activities in Ravenna. URL: <https://ravennaccs.com/en-IT/project/ravenna-hub>
58. Our activities in Ravenna. URL: <https://www.eni.com/en-IT/actions/global-activities/Italy/ravenna.html>
59. 'Exceptional' Dataset Captured During Carbon Dioxide Injection Test in the North Sea. URL: <https://jpt.spe.org/exceptional-data-set-captured-during-carbon-dioxide-injection-test-in-the-north-sea>
60. The Poseidon Project. URL: <https://www.perenco-ccs.com/the-poseidon-project/>
61. A Transformational Carbon Capture & Storage Solution for the UK and Continental Europe. URL: <https://carboncatalyst.com/portfolio/poseidon/>
62. Carbon Catalyst Begins UK's First Carbon Storage Project Trial In North Sea. URL: <https://carbonherald.com/carbon-catalyst-begins-poseidon-ccs-project-trial/>
63. UK First: CO2 Injection Test for Poseidon CCS Wraps Up at Perenco's North Sea Field. URL: <https://www.oedigital.com/news/524461-uk-first-co2-injection-test-for-poseidon-ccs-wraps-up-at-perenco-s-north-sea-field>
64. Dutch firm wins platform modification work for large-scale CCS project. URL: <https://www.offshore-energy.biz/dutch-firm-wins-platform-modification-work-for-large-scale-ccs-project/>
65. Why moisture measurement is crucial to CCS. URL: https://www.processsensing.com/en-us/blog/porthos-exciting-approach-carbon-capture-storage.htm?utm_source=chatgpt.com
66. Porthos' Seizure of TAQA's P18-A Platform: A Carbon Capture Milestone for Europe. URL: <https://www.ainvest.com/news/porthos-seizure-taqa-p18-platform-carbon-capture-milestone-europe-2505/>
67. Carbon Capture Storage. URL: <https://110ccs-storage.com/home/storage-2/>
68. L10 gas field. URL: https://www.wikiwand.com/en/articles/L10_gas_field
69. Emitters oppose ministry plan for Prinos CO₂ storage allocation. URL: <https://energyexpress.eu/tag/prinos/>
70. CO₂ storage at Prinos field. URL: <https://www.ekathimerini.com/economy/1236408/co2-storage-at-prinos-field/>
71. Prinos, a CO₂ storage option for SE. Europe. URL: <https://www.iene.eu/articlefiles/inline/sardi%20-%2014th%20seed.pdf>
72. Our activities in Ravenna. URL: <https://ravennaccs.com/en-IT/project/ravenna-hub>
73. Eni Injects First CO₂ in Offshore Ravenna CCS Project. URL: <https://jpt.spe.org/eni-injects-first-co2-in-offshore-ravenna-ccs-project>
74. Компанія "Кривий Ріг Цемент". URL: <https://krcement.com/about-company/> [in Ukrainian]
75. IEA - International Energy Agency. Iron and Steel Technology Roadmap. IEA report. 2022. 187 p.
76. ArcelorMittal у Європі скоротить викиди CO₂ на 30% до 2030 року. URL: <https://gmk.center/ua/news/arcelormittal-u-ievropi-skorotit-vikidi-so2-na-30-do-2030-roku/>
77. Heletukha H. H., Kucheruk P. P., Matvieiev Yu. B. Perspektyvy vyrobnytstva biometanu v Ukrainy. Analitychna zapyska UABIO № 29. Bioenerhetychna asotsiatsiia Ukrainy, 2022. 58 s. [in Ukrainian]

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF CO₂ CAPTURE, TRANSPORT AND STORAGE INFRASTRUCTURE IN UKRAINE: EUROPEAN EXPERIENCE AND NATIONAL PRECONDITIONS

Doroshenko Ya.V.

Doctor of Engineering, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5853-3286>
e-mail: yaroslav.doroshenko@nung.edu.ua

Kondrat O.R.

Doctor of Engineering, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-0928-2748>
e-mail: oleksandr.kondrat@nung.edu.ua

Stetsiuk S.M.

Doctor of Engineering
Branch Ukrainian Scientific Research Institute of Natural Gases JSC “Ukrigasvydobuvannya”
Himnaziina Naberezhna str., 20, Kharkiv, 61125, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-9918-7692>
e-mail: stetsyuk.sergey@ugv.com.ua

Diakunchak D.R.

Strategic Projects Analyst
Naftogaz Group
St. Mykhailivska, 12, Kyiv, 01001, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-4929-9285>
e-mail: dan.dyakunchak@gmail.com

Abstract. The study examines current trends in the development of carbon dioxide (CO₂) capture, transport, and geological storage (CCS) infrastructure in the European Union and provides an analysis of the prospects for its implementation in Ukraine. The analysis of European projects confirms that the establishment of a fully functional CCS chain is ensured by the coordinated integration of capture, transport, and geological storage processes, with the development of geological storage capacities playing a key role as the foundation for the entire infrastructure. It is shown that in the context of post-war recovery and the transition to a low-carbon economy, particular importance will be associated with the cement and biogas sectors, where CO₂ emissions are predominantly process-related and cannot be eliminated solely through a transition to renewable energy sources. This makes them priority targets for the deployment of carbon capture technologies and the subsequent transport and storage of CO₂. The study substantiates the feasibility of focusing on CO₂ liquefaction technologies, which significantly reduce its volume and enable the efficient use of rail and road transport. Special attention is given to the need for implementing the concept of regional CO₂ hubs to aggregate carbon dioxide flows and direct them to geological storage sites. The geological potential of Ukraine for CO₂ storage is analyzed, particularly the use of depleted oil and gas fields as long-term storage sites. A conceptual approach to the development of CCS infrastructure is proposed, including the implementation of pilot projects in regions with lower war-related risks, comprehensive geological studies, the establishment of regional CO₂ hubs, and the development of rail and road logistics for transporting liquefied CO₂. The importance of state coordination, regulatory framework development, international cooperation, and Ukraine’s integration into European CO₂ transport and storage networks is emphasized. The obtained results can be used to support decision-making on the development of CCS systems in Ukraine and their integration into the European decarbonization framework.

Key words: decarbonization; cement industry; biogas plants; CO₂ liquefaction; CO₂ hubs; depleted gas fields.