

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗБЕРІГАННЯ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ТА ІНШИХ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ В ОСАДОВИХ БАСЕЙНАХ УКРАЇНИ ТА СВІТУ

PROBLEMS AND PROSPECTS OF CARBON DIOXIDE AND OTHER GREENHOUSE GASES STORAGE IN SEDIMENTARY BASINS OF UKRAINE AND THE WORLD

В. П. Стрижак, Л. І. Стрижак
Vasyl P. Stryzhak, Liudmyla I. Stryzhak

Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara Str., Kyiv, Ukraine, 01601
(chgeol@ukr.net, l.litology@gmail.com)

У статті досліджено потенціал геологічного зберігання діоксиду вуглецю (CO₂) в геологічних структурах України як одного з перспективних рішень для зменшення викидів парникових газів. Обґрунтовано актуальність проблеми у контексті глобальних кліматичних змін і необхідності впровадження технологій уловлювання та зберігання вуглецю (CCS). Наведено аналіз існуючих підходів до зменшення викидів CO₂, зокрема застосування механізмів уловлювання, транспортування та зберігання. Розглянуто публікації, присвячені характеристикам джерел викидів CO₂, та схарактеризовано технологічні варіанти CCS. Описано осадові басейни світу з точки зору їхньої придатності до зберігання CO₂, а також діючих міжнародних проектів у цій сфері. Особливу увагу приділено класифікаціям оцінки місткості сховищ, критеріям комерційної доцільності геологічного захоронення CO₂ та можливим ризикам реалізації подібних проектів. Визначено перспективи використання осадових формацій України як сховищ для CO₂. Виявлено основні проблемні питання, пов'язані з впровадженням технологій CCS в Україні. Отримані результати можуть бути використані для подальшого планування та розробки проектів геологічного зберігання CO₂ в Україні.

Ключові слова: уловлювання та зберігання CO₂, геологічне зберігання CO₂, осадові басейни України, технології CCS, викиди парникових газів.

The article explores the potential for geological storage of carbon dioxide (CO₂) in Ukraine's geological formations as a promising solution to reduce greenhouse gas emissions. The introduction substantiates the relevance of the issue in the context of global climate change and the need to implement carbon capture and storage (CCS) technologies. The study provides an analysis of existing approaches to reducing CO₂ emissions, including mechanisms for capturing, transporting, and storing CO₂. Publications on the characteristics of CO₂ emission sources are analyzed, and technological options for CCS are described. A review of sedimentary basins worldwide is conducted to assess their suitability for CO₂ storage, alongside an analysis of ongoing international CCS projects. Special attention is given to the classifications of storage capacity assessments, criteria for the commercial viability of CO₂ geological storage, and the potential risks of implementing such projects. Based on literature and the analysis conducted, the prospects of using Ukraine's hydrocarbon-bearing regions, particularly depleted oil and gas reservoirs, as CO₂ storage sites are identified. Key challenges related to the implementation of CCS technologies in Ukraine are highlighted. The results can be utilized for further planning and development of geological CO₂ storage projects in Ukraine.

Keywords: carbon capture and storage technology, geological storage of CO₂, Carbon capture, Sedimentary basins of Ukraine, CCS technologies, Greenhouse gas emissions.

ВСТУП

Зміни клімату та його наслідки займають значне місце в переліку викликів, для вирішення яких світова спільнота поєднує свої зусилля. Одним із основних джерел забруднення навколишнього середовища є викиди продуктів згорання, зокрема

діоксиду вуглецю (CO₂). Тому декілька країн прийняли зобов'язання зменшити свої викиди CO₂, згідно з Кіотським протоколом 1992 року і підписанням Паризької угоди під егідою Організації Об'єднаних Націй (ООН) у 2015 році. Відповідно до визначення Міжнародної групи експертів

Цитування: Стрижак В. П., Стрижак Л. І. Проблеми та перспективи зберігання діоксиду вуглецю та інших парникових газів в осадових басейнах України та світу. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2023. Т. 16, вип. 2. С. 99–108. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.268430>.

Citation: Stryzhak V. P., Stryzhak L. I., 2023. Problems and prospects of carbon dioxide and other greenhouse gases storage in sedimentary basins of Ukraine and the world. Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine. Vol. 16. Iss. 2. Pp. 99–108. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.268430>.

зі зміни клімату (МГЕЗК), яка була заснована Всесвітньою метеорологічною організацією (ВМО) та Програмою ООН з навколишнього середовища, «Уловлювання та зберігання CO₂ (УЗВ) (англ. carbon capture and storage technology, CCS) — це процес, який включає відокремлення CO₂ від промислових та енергетичних джерел, транспортування його до місць зберігання й тривалу ізоляцію від викидів у атмосферу» (Улавливание..., 2005; Рамочная..., 2009). Починаючи з середини ХХ ст. розробляються способи пом'якшення наслідків, викликаних зміною клімату, з метою стабілізації концентрації парникових газів у атмосфері.

Підходи до зменшення впливу CO₂ на довкілля включають ряд заходів. Для ефективного зменшення концентрації CO₂ в атмосфері актуальними є такі: підвищення енергетичного коефіцієнту корисної дії, перехід на види палива з меншим вмістом вуглеводнів, використання атомної енергії та відновлюваних джерел енергії, вдосконалення біологічних поглиначів парникових газів, а також розвиток наукових та технічних можливостей для зниження вартості технологій уловлювання та зберігання CO₂.

Широке застосування технології уловлювання та зберігання вуглеводнів (УЗВ) залежить від різних чинників, таких як технічна зрілість, вартість, загальний потенціал, поширення та передача технологій між країнами, здатність країн застосовувати цю технологію і дотримуватися нормативно-правових аспектів, що стосуються навколишнього середовища, а також сприйняття цих аспектів суспільством.

Слід зауважити, що забезпечення первинною енергією буде залежати від викопних видів щонайменше до середини поточного століття. Перехід до застосування технології уловлювання та зберігання вуглеводнів сприятиме уникненню досягнення точки неповернення. Шляхом використання наявних технологій та їх удосконалення можна досягти широкого діапазону стабілізації стану атмосфери. За цілями їх реалізації необхідні нові наукові підходи та соціально-економічні зміни.

Метою статті є встановлення потенціалу захоплення та зберігання діоксиду CO₂ в геологічних формаціях території України з урахуванням світових тенденцій та виділення перспективних об'єктів. Робота спрямована на визначення критеріїв відбору подібних геологічних об'єктів, перспективних для ізоляції CO₂, з урахуванням світового та українського досвіду. Проведено аналіз наяв-

ного геологічного, літературного та промислово-геофізичного матеріалу для визначення критеріїв відбору об'єктів, перспективних для ізоляції CO₂ у різновікових відкладах родовищ вуглеводнів у світі та Україні. Використано монографічні видання, публікації у фахових періодичних виданнях, а також відомості що до Державного балансу запасів корисних копалин України, нормативні документи.

Аналіз технологічних варіантів захоронення та зберігання діоксиду вуглецю

Головними джерелами викидів CO₂ є енергетичні установки, що працюють на викопному паливі або біомасі, а також ключові галузі промисловості, такі як машинобудування, цементне виробництво, металургія та хімічна промисловість. Серед інших джерел — це установки з виробництва синтетичного палива, виробництво водню з використанням викопного палива, виробництво добрив, видобуток та переробка природного газу і нафти.

Одними з важливих способів зменшення вмісту CO₂ в атмосфері є стратегії та технології уловлювання, захоронення і зберігання його в геологічному середовищі. Впровадження технологій із зберігання CO₂ в надрах вказує на великий потенціал для захоронення значних обсягів CO₂.

Можливі методи зберігання CO₂ включають геологічне зберігання (захоронення в геологічних структурах) і зберігання у водах Світового океану.

Зберігання CO₂ в океані може здійснюватися двома способами. Перший з них — розміщення CO₂ шляхом його нагнітання та розчинення у водному стовпі на глибині понад 1000 м. Діоксид вуглецю у газоподібному або рідкому стані подають у задану зону через трубопровід з берега або із судна. Другий спосіб — транспортування CO₂ трубопроводом або через морську платформу на дно моря на глибину понад 3000 м, де він має більшу густину порівняно з водою і утворює «озеро» що стримує його розчинення у морській воді (Кондрат та ін., 2010).

Варіанти геологічного зберігання CO₂: солоні формації; вироблені нафтові та газові пласти; використання CO₂ для підвищення вилучення нафти та газу; використання CO₂ для вилучення метану з вугільних пластів; високомінералізовані водоносні пласти

Зберігання в осадових формаціях

Геологічне зберігання передбачає захоронення і зберігання CO₂ в гірських породах, які можуть

поглинати та утримувати його протягом тисяч років. Придатні для захоронення породи нагромаджувалися в осадових басейнах світу протягом тривалих геологічних періодів. Зазвичай ці басейни простягаються на тисячі кілометрів. Придатними для зберігання CO₂ визначені варіанти геологічного зберігання що наведені вище (Van der Meer, 1993, 2005)

Пористі та проникні шари порід, що містять флюїди (нафта, вода або газ), перекриваються непроникною покриткою — сольовою або глиняною. Працюючими прикладами такого застосування згаданого вище способу зберігання CO₂ є захоронення у газове родовище (проект CO₂Sink, Німеччина, 2008 р.) та закачування в підземний нафтоносний пласт у розчиненому у воді стані (США, 1999).

Геологічне зберігання CO₂ тривалий час дає можливість зменшувати його вплив на клімат і навколишнє середовище

Перспективним та економічно доцільним методом є використання як сховища некондиційних вугільних пластів, завдяки унікальній властивості вуглекислого газу сорбуватись у вугіллі, і заміщувати при цьому сорбований метан. У зв'язку з цим вугільні масиви, які не придатні для промислового використання, є надзвичайно перспективними, оскільки вартість метану, що видобувається при цьому, може покрити вартість зберігання CO₂ (Сластунов та ін., 2009; Ranathunga, 2017).

Одним із варіантів захоронення CO₂ є закачування його в глибокі солоні водоносні горизонти, подібно до його закачування у нафтові та газові пласти, де він буде частково розчиняється у воді. У деяких породах CO₂ реагуватиме з карбонатними мінералами, утворюючи стабільні карбонатні утворення, але перед зберіганням необхідно провести геологічні дослідження, що до герметичності зони. Так, норвезький проект "Слейпнер" (початок реалізації з 1996 р. і донині) є прикладом того, як вуглекислий газ можна зберігати у водоносному горизонті без фільтрації. Проте, у роботах (Улавливание..., 2005; Zoback, 2009) висвітлено проблему можливих ризиків окиснення океану, негативного впливу на екосистему.

Одним із варіантів, який потребує додаткових досліджень, є зберігання CO₂ в тріщинуватих магматичних породах.

Критерії визначення перспективних резервуарів для захоронення

Для кожного типу підземних резервуарів критерії визначення їх потенційної місткості різні. Особливо можуть різнитися резервуари на суші та шельфі, як закриті так і відкриті формації.

Перспективними є резервуари з високою пористістю — в них накопичується великий обсяг вуглекислого газу; аналогічними є умови і для водоносних пластів — CO₂ проникатиме у підземні формації через механізми закачування. Водночас резервуари для його зберігання мають перекиватися непроникними породами, що залягають вище, тобто мати надійну покритку. При глибині залягання резервуару більше 800 м, захоронений CO₂ переходить в певний стан флюїду: ні рідина, ні газ, але виявляє властивості обох, легко стискається і має густину рідини. Зберігання на великих глибинах (4000 м і більше) потребує додаткового вивчення. Ефективність такої утилізації визначається також мінливістю властивостей вуглекислого газу зі зростанням температури й тиску, які характерні для глибоких геологічних структур.

Вуглекислий газ може існувати в чотирьох фазових станах — газоподібному, рідкому, твердому та надкритичному (Рубан, 2008). У газоподібному стані CO₂ добре розчиняється у воді (0,88 об'єму в 1 об'ємі води), частково взаємодіючи з нею з утворенням вугільної кислоти. В разі різкого охолодження внаслідок розширення CO₂ здатний переходити відразу в твердий стан, минаючи рідку фазу. За нормальних умов густина CO₂ становить 1,977 кг/м³. У рідкому стані вугільна кислота має середню густину 771 кг/м³ і існує тільки за тиску 482–519 кПа та температури 0–56,5 °С.

За температури більше як 31,6 °С і тиску понад 7,4 МПа CO₂ перебуває в так званому надкритичному стані і виявляє властивості як рідини (густина), так і газу (в'язкість) (Holloway, Savage, 1993; Flett, 2003). Зазвичай у пластах з глибиною залягання більш як 1000 м CO₂ характеризується надкритичним станом, а у вироблених пластах родовищ вуглеводнів через знижений пластовий тиск речовина може перебувати і в газоподібному стані (Van der Meer, 1993, 2005)

За даними (Vachu, 2000) у тих регіонах, де методика захоронення активно впроваджується, були визначені такі геологічні вимоги до резервуарів:

- над горизонтами-колекторами мають залягати покритки, складені не проникними породами;

- покриття над вибраним об'єктом має бути витриманою за площею поширення та її потужність має становити не менше як 2–6 м за глибини залягання до 800 м та 4–5 м за глибини залягання понад 800 м;
- для забезпечення тривалого функціонування сховищ у розрізі мають бути виявлені додаткові прошарки з екрануючими властивостями;
- у межах розрахункового контуру майбутнього сховища CO₂ має бути мінімальне число тектонічних порушень, що можуть сприяти зниженню герметичності основної та резервної покриття;
- проникність покриття не має перевищувати 10⁻⁷ мкм²

У подальшому необхідно враховувати час утримання вуглекислого газу в підземних резервуарах, щоб уникнути його витоків та впливу на клімат для майбутніх поколінь.

На даний час для зберігання CO₂ у морських і континентальних відкладах застосовуються технології, що розроблені нафтогазовою промисловістю і довели свою економічну ефективність.

Зазвичай CO₂ закачують у глибокозалягаючі пласти вироблених родовищ вуглеводнів. Слід зазначити, що вартість таких технологій поки що дуже висока — захоронення 1 т CO₂ коштує в середньому 160–170 дол. США. Незважаючи на велику зацікавленість даним напрямом декарбонізації, рівень готовності різних країн різниться. Розвиток таких технологій найчастіше залежить від заходів державної підтримки. Зокрема, у США, протягом 15 років від часу запуску проекту CCS держава платить субсидію по 50 дол. США на 1 т CO₂ при захороненні і зберіганні та 35 дол. США на 1 т за подальше використання вуглекислого газу для збільшення нафтовіддачі на родовищах (підвищення тиску в пластах). Серед можливих недоліків застосування CO₂ є підвищена корозійність свердловинного обладнання, що потребує застосування інгібіторів корозії, спеціального антикорозійного захисту та переходу на полімерні насосно-компресорні труби.

За оцінками достовірності, що спираються на літературні дані, а також за регіональними і глобальними оцінками експертів місткість зберігання CO₂ у нафтогазових резервуарах становить 675 Гт CO₂, у вугільних пластах, що не мають промислового значення 3–15 Гт, у соленосних глибокозалягаючих формаціях — 1 Гт (Улавливание..., 2005).

Через геологічну неоднорідність будови Землі потенціал для зберігання CO₂ мають не всі країни світу (Геологическое..., 2021).

Зазначене підтверджується аналізом провідних світових експертів, що ґрунтується на загальнодоступній базі даних що до басейнів та покладів Robertson Basins and Plays (AAPG, 2020), в якій міститься інформація про розміщення та протяжність осадових басейнів у всьому світі. Тільки у Євразійському регіоні налічується 95 осадових басейнів, 14 з них класифіковано в базі даних як добре розвідані та мають виявлені поклади вуглеводнів. Характеристики цих басейнів добре відомі, тому вони є основними цільовими об'єктами зберігання CO₂ (Zakkour, 2019).

За місцем розміщення виділено два типи осадових басейнів: суходільні та комбіновані (суходіл і шельфи морів та океанів). У Євразійському регіоні до басейнів у межах суходолу належать: Дніпровсько-Донецький — потужність відкладів 20 км, Амударьїнський — 15 км, Карпатський — 12 км, Кура-Картлійський — 11 км, Ферганський — 10 км, Євфратсько-Синджарський — 9 км, Паннонський — 7 км; до комбінованого типу — Центральний суббасейн Західного Сибіру — 16 км, Північнокавказький — 14 км, Індоло-Кубанський — 11 км, Синайсько-Левантійський — 11 км, Південно-Східна Туреччина (Аравійський форланд) — 10 км, Фракійський — 9 км (Геологическое..., 2021).

Згідно з аналізом даних, що є у відкритому доступі, на сьогодні існує понад 190 проектів у 20 країнах, зокрема як діючі, так і ті, що перебувають на стадії розробки чи доопрацювання (Khan, 2010). Розроблено проекти за типом уловлювання вуглекислого газу і за типом його зберігання (захоронення в різних геологічних структурах або використання для підвищення флюїдовіддачі).

Так, із 193 проектів 38 з них стосуються уловлювання вуглекислого газу, 47 — тільки його зберігання та 108 інтегрованих проектів розробляють і впроваджують спільний проект уловлювання, транспортування та закачування вуглекислого газу в пласти-колектори. Звичайно, більшість проектів перебувають на стадії планування та розробки але за вісьмома проектами активно вловлюють та закачують вуглекислий газ у підземний резервуар як з метою збільшення флюїдовіддачі, так і його захоронення (Khan, 2010): Ін-Салах, Алжир; K12-B Круст, Нідерланди; Слейпнер, Норвегія; Снохвіт, Норвегія; Зама, Канада; СЕКАРБ Кранфілд, США; Вейберн, Канада; Маунтанір, США.

Характеристика діючих проектів

Слейпнер. Це найвідоміший проект, за яким норвезька компанія StatoilHydro розробляє у Північному морі на газовому родовищі, а також перший комерційний приклад зберігання CO₂ у водоносному пласті на великій глибині. Природний газ забруднений вуглекислим газом, вміст якого сягає 9%, тому надлишки останнього сепарують. У 1991 р. норвезька влада ввела жорсткі податкові ставки на викид CO₂ з метою зменшення емісії забруднювальних речовин в атмосферу, які становили 50 доларів США за 1 тону. Ці дії влади стали мотивацією для створення проекту з уловлювання та зберігання CO₂ у геологічній структурі. Даний проект працює з 1996 року, обсяг закачуваного CO₂ становить близько 1 Мт/рік (загалом буде закачано 20 Мт), вартість проекту оцінено у 350 млн євро.

Ін-Салах. Підземне зберігання вуглекислого газу на сьогодні здійснюється у газовому проекті Ін-Салах в алжирській пустелі. Сирий природний газ, який видобувають на цій ділянці фірми British Petroleum, Statoil і Sonatrach, містить 9% CO₂, що не відповідає якості комерційного споживання. Тому CO₂ виділяють з природного газу, стискають і потім вводять під тиском в виснажений газовий пласт-колектор. Цей проект працює з 2004 року, обсяг закачуваного CO₂ становить 1,2 Мт/рік, вартість проекту оцінюється в 2 млрд доларів

К12-В Круст. Підземне зберігання вуглекислого газу здійснюється сьогодні у газовому проекті К12-В у Північному морі (Нідерланди) французькою компанією "Газ де Франс". Добутий природний газ містить великий відсоток вуглекислого газу, який після виділення на 1-й стадії закачують у виснажений пласт-колектор для тривалого зберігання, на 2-й стадії закачування CO₂ проводимуть для збільшення газовіддачі. Цей проект працює з 2004 року, обсяг закачуваного CO₂ становить 0,2 Мт/рік, вартість проекту оцінено у 2 млрд дол. США. На 90% фінансується урядом Нідерландів.

Снохвіт. Проект також розробляється норвезькою компанією у Північному морі. Вуглекислий газ уловлюють на заводі і закачують у пласт-колектор, насичений високомінералізованою пластовою водою. Цей проект працює з 2008 року, обсяг закачуваного CO₂ становить 0,7 Мт/рік, вартість проекту оцінено у 5,2 млрд дол. США.

Зама. Проект впроваджується канадською компанією PCOR на нафтовому родовищі Зама. Газ, що видобувається, містить високу концентра-

цію кислих газів H₂S і CO₂. Це ставить великі вимоги до обладнання і технології закачування кислих газів у родовище для збільшення нафтовіддачі. Цей проект працює з 2006 р, обсяг закачуваного CO₂ становить 0,067 Мт/рік, вартість проекту оцінено в 26 млн дол.США.

СЕКАРБ Кранфілд. Проект впроваджується американською компанією SECARB на нафтовому родовищі Кранфілд. У проекті розроблено дві стадії: перша діє з 2008 р. для збільшення нафтовіддачі, обсяг закачуваного CO₂ становить 1,5 Мт/рік, друга діє з 2009 року, обсяг закачуваного CO₂ становить 0,1–0,25 Мт/рік. Закачування вуглекислого газу здійснюється в мінералізований пласт-колектор на тривале зберігання.

Вейберн. Родовище «Вейберн» обслуговується найбільшою канадською нафтовою компанією PanCanadian. Родовище вичерпано на 23% і його продуктивність різко знизилася. Згідно з прогнозами експертів, за відсутності нового рішення щодо збільшення продуктивності видобуток нафти різко впаде. З метою сприяння розвитку альтернативних джерел палива, уряд США підтримує будівництво фабрики з виробництва синтетичного палива з вугілля. Комерційне виробництво почалося 1984 р. Щодня виробляється 3050 т синтетичного метану та 13 тис т побічних газів, 96% з яких становить CO₂. З 2000 року весь CO₂ із заводу з виробництва синтетичного метану надходить трубопроводом на родовище «Вейберн» для підвищення продуктивності. Обсяг закачуваного CO₂ становить 3 Мт/рік, вартість проекту оцінено в 1,1 млрд дол.США.

Маунтанір. Даний проект, розроблений та впроваджуваний з 2009 року компанією АЕР (США), вловлює з вугільної теплоелектростанції «Маунтанір» (штат Західна Вірджинія, США) вуглекислий газ в обсязі 0,1 Мт/рік, який закачується в глибокий водоносний пласт-колектор. До 2012 р. АЕР планує збільшити обсяг уловлюваного CO₂ до 1,5 Мт/рік. Вартість проекту оцінено у 76,8 млн дол. США.

На сьогодні найбільшим обсягом щодо геологічної будови потенційних сховищ вуглекислого газу володіють підприємства нафтогазової та вугільної галузей, тому за основу методики оцінювання ємності сховищ для CO₂ взяті методики оцінювання запасів і ресурсів вуглеводнів.

Огляд класифікацій оцінки місткості сховищ

На даний момент існують дві основні міжнародні класифікації оцінки місткості сховищ для CO₂:

Рамкова класифікація ООН (РКООН) (Рамочная..., 2009), розроблена європейською економічною комісією ООН (ЄЕК ООН) та SPE-SRMS (Storage resources management system — система управління ресурсами захоронень), розроблена спількою інженерів нафтовиків (SPE) (Система..., 2018).

Істотна відмінність класифікації РК ООН від SPE-SRMS у тому, що за першою оцінюється не тільки економічна, а й екологічно-соціальна здійсненість проекту. Ця класифікація є одним з інструментів виконання цілей сталого розвитку ООН (ЦСР ООН), які стали основою звітності для інвесторів.

РКООН дає можливість виділити взаємопов'язані соціальні, екологічні та правові чинники, які прямо чи опосередковано впливають на проект. Крім того, вона є універсальною класифікацією, яка дає можливість оцінювати проекти різних енергетичних галузей. Наприклад, можна безпосередньо порівняти економічну та екологічну ефективність проектів CCS.

Такі терміни, як «ресурси» і «запаси» цілеспрямовано включаються в РК ООН. Ця система ґрунтується на принципах, в якій продукти проекту, пов'язаного з освоєнням ресурсів, класифікуються з використанням системи числового кодування на підставі трьох основних груп критеріїв: екологічна, соціально-економічна життєздатність (E); технічна можливість втілення (F); ступень достовірності оцінювання обсягів (G).

- Група E визначає ступінь сприятливих екологічних, соціальних та економічних умов для забезпечення працездатності проекту, зокрема облік ринкових цін і правових, юридичних, нормативних, природоохоронних і договірних умов.
- Група F визначає ступінь розробки технологій, досліджень і прийнятих зобов'язань, необхідних для реалізації проекту. Ці проекти мають діапазон від перших концептуальних досліджень до повністю проробленого діючого проекту.
- Група G визначає ступінь достовірності оцінки обсягу продукції, отриманої в результаті здійснення проекту.
- Категорії і підкатегорії є «будівельними блоками» системи і об'єднуються в «класи». РК ООН пов'язана з деякими іншими системами класифікації за допомогою так званих зв'язувальних документів, зокрема SPE-PRMS.

Система SPE-SRMS ґрунтується на міжнародній класифікації запасів вуглеводневої сировини SPE-

PRMS і насамперед має можливість оцінювати два основні критерії: ступінь геолого-технологічної впевненості у реалізації проекту та його економічну ефективність. Вона не має необхідної гнучкості, властивої РК ООН, при порівнянні різних проектів.

Так у 2017 р. Товариство інженерів нафтогазової промисловості розробило версію своєї системи управління ресурсами, адаптовану для зберігання CO₂ — Систему управління ресурсами зберігання (SPE-SRMS). Вона ґрунтується на системі SPE-PRMS і дотримується аналогічних принципів класифікації ресурсів зберігання на підставі проектів.

Ресурси зберігання класифіковано у такий спосіб:

- потенціал зберігання — обсяги для захоронення CO₂ які будуть комерційно доступні в геологічній формації в результаті реалізації проектів з освоєння ресурсів вуглеводнів;
- умовні ресурси зберігання — потенційно доступні об'єми захоронення CO₂ у відомих геологічних формаціях, де застосовувалися проекти ще не вважаються досить опрацьованими для комерційного освоєння (розвідані структури де проведено детальні геофізичні роботи, можливо пробурені поодинокі пошуково-розвідувальні свердловини, ресурси C₃);
- Невідкриті ресурси зберігання — це об'єми для захоронення і зберігання CO₂ у цільовій геологічній формації, які недостатньо вивчені та оцінені (проведено регіональні геолого-розвідувальні роботи щодо оцінювання басейну, великих структурних форм, відповідають ресурсам категорії C₃, D).

Комерційні проекти із закачування — це ті проекти, які мають підтверджену комерційну доцільність. Критерії комерційної доцільності захоронення CO₂ такі:

- екологічна складова безпечного захоронення;
- соціальна складова життєздатності проекту (не впливає на населення, згода громад);
- економічно-ефективна складова — уловлювання, транспортування, зберігання;
- технічна складова (проект знаходиться на технологічному рівні, який ґрунтується на технологіях що забезпечують ефективність проведення всіх процесів, пов'язаних зі зберіганням CO₂)

Підкласи зрілості проекту (Геологическое..., 2021) також визначаються відповідно до системи SPE-PRMS (Система..., 2018). Сукупні ресурси зберігання CO₂ поділяються на дві великі групи:

використовувані та невикористовувані ресурси зберігання.

Використовувані ресурси зберігання потенційно придатні для впровадження проєктів. Залежно від економічної доцільності доцільні ресурси називають потенціалом зберігання. Для них розроблено проєкти різних стадій: ведеться закачка, розробка затверджена, розробка обґрунтована, розробка очікується, розробка припустима.

Економічно недоцільні ресурси — це умовні ресурси зберігання. Їх розробку обґрунтовано (але з економічними обмеженнями) або розробка є не рентабельна.

Невикористовувані ресурси зберігання — це ресурси, які поки не можуть бути використані або недостатньо досліджені.

Їх поділяють на невизначені (характеристики невідомі або не підтверджені) та перспективні (потенційно цікаві, але ще не досліджені ресурси зберігання).

За ступенем вивченості об'єкти поділяються на перспективний пошуковий об'єкт і недостатньо вивчену структуру (напрямки пошуково-розвідувальних робіт).

Ця класифікація дає можливість зрозуміти, на якому етапі перебуває кожен об'єкт або ресурс з позиції його підготовки до використання для зберігання CO₂.

Збережені обсяги ресурсу також класифікують з урахуванням ступеня їх невизначеності. За оцінкою обсягу потенціалу зберігання його поділяють на доведений, імовірний та можливий, що ідентично класифікації запасів у системі PRMS. Потенціал зберігання ресурсу також може бути освоєним (проєкти, за якими здійснюється закачування і зберігання) і неосвоєним (проєкти, за якими закачування не розпочалось).

Щільність резервуарів у регіоні має бути доволі високою, як і комунікації між джерелами викидів газів та місцями зберігання.

Одним з важливих аспектів є моніторинг стратегії управління ризиками проєктів геологічного збереження CO₂. Стандартні процедури та протоколи, удосконалюються в міру впровадження нових технологій.

Водночас передбачається, що вимірювання таких параметрів, як швидкість закачування і тиск у свердловині, в яку закачується CO₂, проводяться звичайним способом.

Повторна сейсмічна розвідка зарекомендувала себе як ефективний спосіб для відстеження підземної міграції CO₂.

Корисними можуть бути нові гравіметричні та електророзвідувальні методи, а для безпосереднього виявлення витоку CO₂ — атмогеохімічні дослідження. У свердловинах, в які закачують CO₂, встановлюють датчики із сигналізаторами для забезпечення безпеки робітників і виявлення витоку вуглекислого газу. Наявність високоякісних вихідних даних підвищує надійність і роздільну здатність всіх вимірювань, що важливо для виявлення незначних витоків.

Для розвитку галузі CCS в Україні необхідно вже нині проводити науково-дослідні роботи з оцінювання якості потенційних сховищ і розробляти узгоджену методологію оцінки їх місткості. Слід підготувати та затвердити низку нормативних документів, що регламентують процес захоронення CO₂ у надрах: Правила закачування вуглекислого газу у сховище, Правила підготовки технічних проєктів поховання, Правила моніторингу витоків CO₂. Крім того, потрібно розробити механізм розподілу відповідальності за сховище діоксиду вуглецю після закінчення закачування.

Перспективи використання геологічних структур нафтогазоносних регіонів України для сховищ CO₂

В Україні виділено три нафтогазоносні регіони: Східний, Західний і Південний (Атлас ...). У структурно-тектонічному відношенні вони включають різні елементи і суттєво відрізняються один від одного. Східний нафтогазоносний регіон складає Дніпровсько-Донецька западина (ДДЗ), північно-західне закінчення Донбасу і певною мірою, власне Донбас; Західний регіон — це західне занурення Східноєвропейської платформи (Волино-Подільська монокліналь і Львівський палеозойський прогин), Західноєвропейська платформа у частині Рава-Руської зони, Передкарпатський прогин, українська частина складчастих Карпат і Закарпатський прогин; Південний регіон — південний схил Східноєвропейської платформи (Українського щита), Скіфська плита (Переддобрудзький, Криловський, Каркінітсько-Північнокримський, Північноазовський, Індоло-Кубанський, Керченсько-Таманський прогини, вали Губкіна та Азовський, Кілійсько-Зміїне підняття, Чунгульська і Нижньогірська сідловини, Крайовий уступ та Мегаантикліналь Гірського Криму).

Всі нафтогазоносні регіони мають вигідне географічно-економічне положення, яке характеризується розвиненою сіткою залізниць

і шосейних шляхів, близькістю до великих промислових центрів, розгалуженою системою газонафто- і продуктопроводів.

Станом на 01.01.2023 р. в Україні на Державному балансі корисних копалин України налічувалось 440 родовищ вуглеводнів, з яких у Східному нафтогазоносному регіоні – 264, Західному – 130, Південному – 46. Ступінь розвіданості прогнозних ресурсів становить 41%, а частка видобутих вуглеводнів від початкових прогнозних ресурсів – 24,5%.

Потенційна місткість природних резервуарів (газових і нафтових вироблених родовищ) ґрунтується на оцінюванні початкових сумарних ресурсів (накопичений видобуток, розвідані запаси категорій А + В + С₁, попередньо оцінені запаси категорії С₂, а також перспективні (категорії С₃) та прогнозні (категорії Д₂). Таким чином загальну місткість потенційних місць захоронення СО₂ для України в цілому ми оцінюємо від 4859 до 12 321 млн т СО₂.

Серед осадових нафтогазоносних басейнів України високим потенціалом для зберігання СО₂ характеризується Дніпровсько-Донецький авлакоген (ДДА). В ньому об'єднанні геологічні умови: великий обсяг колектору, витримані за площею покришки, розвинута трубопровідна система, що може бути використано для транспортування СО₂ та близьке розміщення від місць захоронення СО₂ великих промислових центрів.

Серед нафтогазоперспективних комплексів ДДЗ одним із головних для захоронення СО₂ може бути середньокам'яновугільний, складений двома формаціями: теригенно-карбонатною лагунно-шельфовою (нижньобашкирський під'ярус) і теригенною строкатобарвно-вугленосною (московський ярус і верхньобашкирський під'ярус). Родовища вуглеводнів поширені в цьому комплексі доволі рівномірно, майже в усіх тектонічних зонах ДДА на глибинах від 650 до 4800 м. Найбільш сприятливими ділянками для захоронення СО₂ є осьова, північна та південна приосьова зони, від напрямку Миргород – Полтава до складчастого Донбасу, де поширені зони розвитку покришки типу В витриманого характеру і колектори з пористістю від 8 до 20%.

На сьогодні Україна має один з самих потужних комплексів підземних газосховищ у Європі, який забезпечує закачування та відбір понад 30 млрд м³ газу за сезон. Для України в цілому, до глибини 5 км, загальну місткість потенційних місць захоронення СО₂ в геологічному середовищі

резервуарів вуглеводнів оцінено до 9322 млн т ум.п. (не враховуючи обсяг закачування СО₂ в мінералізовані води і вугільні пласти).

ВИСНОВКИ

За результатами аналізу наявного геологічного, літературного та промислово-геофізичного матеріалу визначено критерії відбору об'єктів, перспективних для ізоляції СО₂ у різновікових відкладах родовищ вуглеводнів у світі та Україні. Розглянуто роботи Програм ООН, наукових центрів та інших міжнародних організацій стосовно збереження клімату. Визначено, що широкомасштабне застосування процесу відокремлення та захоронення СО₂ залежить від технічної зрілості, вартості, загального потенціалу, поширення та передачі технологій між країнами, нормативно-правових аспектів, питань, що стосуються навколишнього середовища, а також їх сприйняття суспільством.

Найбільш технічно можливим потенціалом для захоронення великого обсягу СО₂ мають геологічне зберігання та зберігання в океані. Однак через різну геологічну будову Землі потенціал для геологічного зберігання матимуть не всі країни світу. Серед проаналізованих басейнів світу високим потенціалом для зберігання СО₂ є ДДА. В цьому регіоні поєднуються сприятливі геологічні умови, розвинута трубопровідна система та близькість до великих промислових центрів.

Виділено головні критерії для пошуку об'єктів закачування, зберігання та захоронення СО₂: достатня пористість, глибина, витриманість за площею та потужністю покришки, відсутність тектонічних розломів, екологічні та соціальні аспекти.

Згідно з аналізом актуальних питань детального оцінювання наявної наукової та соціально-економічної інформації найбільший технічно можливим потенціалом для захоронення великої кількості СО₂ є геологічне зберігання. Одна з головних причин саме такого захоронення цього газу у великих обсягах – зміна властивостей СО₂ при закачуванні в підземний резервуар. Виділено міжнародні критерії перспективних резервуарів для захоронення СО₂ в геологічні середовища та визначено геологічні вимоги до таких резервуарів.

Виконано роботи щодо систематизації, аналізу стану родовищ України, ступеня їх освоєності, геологічної будови резервуарів та покришок, які їх ізолюють, геологічного середовища, в якому є ці резервуари, здатні забезпечити велику частину даних для вирішення питань вибору резервуарів

захоронення CO₂ в геологічних формаціях України, зокрема Східного нафтогазоносного регіону. Детальний аналіз та вивчення даних щодо стану вичерпності родовищ вуглеводнів в Україні, їх геологічної будови та методик розробки значно скоротить час для розв'язування проблеми пошуку місць захоронення CO₂ в країні.

REFERENCES

Atlas of Oil and Gas Fields of Ukraine: in 6 vols. Vol. 2: Eastern Oil and Gas Region, 1998. Lviv: Ukrainian Oil and Gas Academy. (In Ukrainian).

Geologicheskoe khranenie CO₂ v stranakh Vostochnoi Evropy, Kavkaza i Tsentral'noi Azii: pervichnyi analiz potentsiala i politiki. 2021. United Nations, Geneva, UNECE. (In Russian). https://unece.org/sites/default/files/2021-04/Geologic%20CO2%20storage%20report_final_RU.pdf.

Kondrat, R. M., Seredyns'kyi, D. Yu., Kondrat, O. R., 2010. Doslidzhennia zastosuvannia vuhlekysloho hazu dlia vyluchennia zalyshkovoї nafty z obvodnennykh naftovykh pokladiv. Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch. No 2(35), Pp. 26–30. (In Russian).

Ramochnaya klassifikatsiya OON dlya iskopaemykh energetycheskikh i mineral'nykh resursov. 2009. (In Russian). https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/unfc2009/unfc2009_report_r.pdf.

Ruban, G. N., 2008. Povyshenie effektivnosti sistemy geologo-geofizicheskogo kontrolya za ekspluatatsieі podzemnykh khranilishch gaza: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. Moskva: VNIIGAZ. (In Russian).

Petroleum Resources Management System (SPE-SRMS) Petroleum Resources Management System. 2018. (In Russian). https://www.spe.org/media/filer_public/0c/83/0c835db9-501f-4ce7-97f1-a1d6bb4e3331/prmgmtsystem_v103.pdf.

Slastunov, S. V., Karashadze, G. G., Kharin, Yu. V., 2009. Model' massoperenosa dioksida ugleroda i metana v tekhnologii zakhoroneniya parnikovyykh gazov v nekonditsionnykh ugol'nykh plastakh. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. No 12. Pp. 359–366. (In Russian).

Ulavlianie i khranenie dvoukisi ugleroda. Spetsial'nyi doklad MGEIK. (In Russian). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_spm_ts_ru-1.pdf.

Bachu S., 2000. Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. Energy Conversion and Management. Vol. 41(9), Pp. 953–970.

Flett, M. A., Taggart, I. J., Lewis, J., & Gurton, R. M., 2003. Subsurface sensitivity study of geologic CO₂ sequestration in saline formations. The Second Annual Conference on Carbon Sequestration. 5–8 May. National Energy Technology Laboratory. United States Department of Energy. Alexandria, USA.

Для розвитку галузі з уловлювання та захоронення CO₂ в Україні необхідно проводити науково-дослідні роботи з оцінювання можливостей осадових басейнів для акумулювання CO₂ і якості потенційних сховищ, а також розробляти узгоджену методологію оцінювання їх місткості.

Атлас родовищ нафти і газу України: у 6 т. гол. ред. М. М. Іванюта. Львів: Центр Європи, 1998.

Геологическое хранение CO₂ в странах Восточной Европы, Kavkaza i Tsentral'noi Azii: pervichnyi analiz potentsiala i politiki. 2021. United Nations, Geneva, UNECE. 35 с. https://unece.org/sites/default/files/202104/Geologic%20CO2%20storage%20report_final_RU.pdf.

Кондрат Р. М., Серединський Д. Ю., Кондрат О. Р. Дослідження застосування вуглекислого газу для вилучення залишкової нафти з обводнених нафтових покладів. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2010. No 2 (35) с. 26–304.

Рамочная классификация ООН для ископаемых энергетических и минеральных ресурсов. 2009 [Электронный ресурс]: Электронні дані https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/unfc2009/unfc2009_report_r.pdf.

Рубан Г. Н. Повышение эффективности системы геолого-геофизического контроля за эксплуатацией подземных хранилищ газа: автореф. дис. канд. техн. наук. М.: ВНИИГАЗ, 2008. 25 с.

Система управления ресурсами углеводородов (SPE-SRMS) Petroleum Resources Management System 2018. 61 с. [Электронный ресурс]: Электронні дані https://www.spe.org/media/filer_public/0d/3e/0d3efcb5-57a8-4db2-ac94-6a1be0de61df/srms_sep2022_w_errata.pdf.

Сластунов С. В., Карашадзе Г. Г., Харин Ю. В. Модель массопереноса диоксида углерода и метана в технологии захоронения парниковых газов в некondиционных угольных пластах. Горный информационно – аналитический бюллетень. 2009. № 12. С. 359–366.

Улавливание и хранение двуокиси углерода. Специальный доклад МГЭИК. Без даты [Электронный ресурс]: Электронні дані https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_spm_ts_ru-1.pdf.

Bachu S., Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. Energy Conversion and Management. 2000. Vol. 41(9). Pp. 953–970.

Flett M. A., Taggart I. J., Lewis J., Gurton R. M. Subsurface sensitivity study of geologic CO₂ sequestration in saline formations. The Second Annual Conference on Carbon Sequestration. 5–8 May 2003. National Energy Technology Laboratory. United States Department of Energy. Alexandria, USA.

- Holloway S., & Savage, D., 1993. The potential for aquifer disposal of carbon dioxide in the UK. *Energy Conversion and Management*. Vol. 34(9–11), Pp. 925–932.
- Holloway S., Savage D. The potential for aquifer disposal of carbon dioxide in the UK. *Energy Conversion and Management*. 1993. Vol. 34(9–11). P. 925–932.
- Khan, S. A., 2010. The analysis of world projects on catching and a burial place of carbonic gas. *Georesursy*. No 4(36), 55–62.
- Khan S. A. The analysis of world projects on catching and a burial place of carbonic gas. *Георесурси* № 4(36), 2010. С. 55–62.
- Ranathunga, A. S., Ranjith, P. G., Perera, M. S., 2017. Challenges and issues for CO₂ storage in deep coal seams. In *Rock Mechanics and Engineering*. Volume 4. Wiltshire, UK.
- Ranathunga A.S, Ranjith P.G, Perera M. S. Challenges and issues for CO₂ storage in deep coal seams. In *Rock Mechanics and Engineering*. 2017. Volume 4, Wiltshire, UK:
- AAPG. 2020. Robertson Basins and Plays—Sedimentary Basins of the World. Accessed on 10 December 2020. <https://www.datapages.com/gis-map-publishing-program/gis-open-files/global-framework/cgg-sedimentary-basins-of-the-world>.
- AAPG. 2020. Accessed on X December 2020. <https://www.datapages.com/gis-map-publishing-program/gis-open-files/global-framework/cgg-sedimentary-basins-of-the-world>.
- Van der Meer, B., 1993. The conditions limiting CO₂ storage in aquifers. *Energy Conversion and Management*. Vol. 34 (9–11), Pp. 959–966.
- Van der Meer B. The conditions limiting CO₂ storage in aquifers. *Energy Conversion and Management*. 1993. Vol. 34(9–11). P. 959–966.
- Van der Meer, B., 2005. Carbon dioxide storage in natural gas reservoirs. *Oil & Gas Science and Technology—Rev. IFP*. Vol. 60 (3), Pp. 527–536.
- Van der Meer B. Carbon dioxide storage in natural gas reservoirs. *Oil & Gas Science and Technology Rev. IFP*. 2005. Vol. 60, No3. P. 527–536.
- Ward, C., Heidug, W., Bjurström, N.-H. 2018. Enhanced Oil Recovery and CO₂ Storage Potential Outside North America: An Economic Assessment. King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC), Riyadh. P. 25.
- Ward Colin, Wolfgang Heidug and Nils-Henrik Bjurstrom. Enhanced Oil Recovery and CO₂ Storage Potential Outside North America: An Economic Assessment. Report King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC), Riyadh, 2018. P. 25
- Zakkour, P., Heidug, W., 2019. Mechanism for CCUS in the Post-Paris Era. King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC), Riyadh. P. 27.
- Zakkour Paul, Wolfgang Heidug. Mechanism for CCUS in the Post-Paris Era. Report King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC). Riyadh. 2019. P. 27
- Zoback, M. D., Gorelick, S. M., 2009. Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy*. Vol. 109(26).
- Zoback Mark D., Gorelick Steven M. Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy*, 2009. vol.109. No 26.

Manuscript received October 3, 2023;
revision accepted December 6, 2023.

Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна