

## УЗАГАЛЬНЕННЯ ОСНОВНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З УЛОВЛЮВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ В РАМКАХ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ

С. В. Матківський

Акціонерне Товариство «Укргазвидобування»; 04053, м. Київ, вул. Кудрявська, 26/28,  
тел./факс (044) 2723115, e-mail: m a t k i v s k i j @ g m a i l . c o m

Об'єктом дослідження є технології уловлювання техногенного діоксиду вуглецю та шляхи його утилізації. Негативні наслідки глобального потепління, які проявляються змінами клімату, таненням льодовиків та підйомом рівня океану вимагають глобальних зусиль для зниження негативного впливу на атмосферу. Досягнути цього можливо шляхом скорочення частки викопного палива в енергетичному балансі, впровадження технологій виробництва електроенергії з поновлюваних джерел та підвищення енергоефективності виробництва. Теперішнє суспільство в повній мірі залежить від викопного палива, а перехід на альтернативні енергоефективні джерела енергії потребує великих коштів та часу, тому необхідно невідкладно приймати радикальні міри щодо сповільнення росту концентрації діоксиду вуглецю в атмосфері. Для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище енергоємні підприємства, що характеризуються високим показником промислових викидів парникового газу облаштовують технологіями уловлювання діоксиду вуглецю. Ці технології передбачають уловлювання діоксиду вуглецю в ході спалювання вугілля або газу та його транспортування до місця захоронення з наступним його зберіганням без контакту з атмосферою. Діоксид вуглецю, що виділяється з димових газів може бути використаний в комерційних цілях, як сировина для харчової та хімічної промисловості. Перспективним напрямом утилізації великих об'ємів діоксиду вуглецю є його використання в нафтогазовій галузі. Результати багаточисленних досліджень свідчать про технологічну ефективність нагнітання діоксиду вуглецю у виснажені нафтогазові родовища з метою підвищення їх вуглеводневилучення. Впровадження технологій нагнітання діоксиду вуглецю за різними технологічними схемами дозволить знизити концентрацію шкідливих викидів в атмосферу та підвищити ефективність розробки залишкових запасів вуглеводнів.

Ключові слова: глобальне потепління, декарбонізація, модернізація виробництва, технології, уловлювання діоксиду вуглецю, транспортування, нафтогазові родовища, захоронення діоксиду вуглецю, підвищення вуглеводневилучення.

*The object of the research is technologies for capturing technogenic carbon dioxide and ways of its utilization. The negative effects of global warming, which are manifested by climate change, melting glaciers, and rising ocean levels, require global efforts to reduce the negative impact on the atmosphere. This can be achieved by reducing the share of fossil fuels in the energy balance, introducing technologies for generating electricity from renewable sources, and increasing the energy efficiency of production. Today's society is fully dependent on fossil fuels, and the transition to alternative energy-efficient energy sources requires a lot of money and time, so it is necessary to take drastic measures to slow down the increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere. To reduce the negative impact on the environment, energy-intensive enterprises with a high rate of industrial greenhouse gas emissions are equipped with technologies for capturing carbon dioxide. These technologies involve capturing carbon dioxide during the combustion of coal or gas and its transportation to a disposal site, followed by its storage without contacting the atmosphere. Carbon dioxide released from flue gases can be used commercially as a raw material for the food and chemical industries. A promising area for utilizing large volumes of carbon dioxide is its use in the oil and gas industry. The results of numerous studies show the technological efficiency of carbon dioxide injection into depleted oil and gas fields to increase their hydrocarbon recovery. The introduction of carbon dioxide injection technologies based on various technological schemes will reduce the concentration of harmful emissions into the atmosphere and increase the efficiency of the development of residual hydrocarbon reserves.*

Key words: global warming, decarbonization, production modernization, technology, carbon dioxide capture, transportation, oil and gas fields, carbon dioxide storage, increased hydrocarbon recovery.

### Вступ

Розвиток людського суспільства ґрунтується на виробництві матеріальних і духовних благ, сукупність яких обумовлює сприятливі умови життєдіяльності людини. З часів проми-

слової революції і до сьогоднішніх днів вугілля, нафта та газ є основними джерелами вироблення енергії [1].

Вугілля є відносно дешевим продуктом та широко використовується для вироблення еле-

ктроенергії. Теплові електростанції характеризуються високою надійністю, з використанням яких виробляється близько 40 % електроенергії в цілому світі. Однак спалювання викопного палива призводить до шкідливих викидів димових газів в атмосферу, які характеризуються великим вмістом діоксиду вуглецю [2].

### **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій**

Одним із можливих шляхів зменшення навантаження на навколишнє середовище є скорочення частки викопного палива в процесах вироблення електроенергії та перехід на альтернативні відновлювальні джерела енергії. Високорозвинуті держави будують свою економіку на основі розвитку відновлювальної енергетики. Використання сонячних, вітрових, гідро- та електростанцій поступово витісняє традиційні способи отримання електроенергії шляхом спалювання викопного палива.

Відновлювальні джерела енергії є перспективним способом зниження рівня забруднення навколишнього середовища, а також боротьби з усіма негативними наслідками для людей та планети в цілому. Використовуючи відновлювальні джерела енергії по всьому світу, можна отримати в декілька разів більше енергії, ніж потрібно для споживання. Саме тому, в найближчій перспективі відновлювальні джерела енергії, зважаючи на їх надійність та безпечність для людства, слід розглядати як основне джерело енергій [3].

Для зниження промислових викидів діоксиду вуглецю в атмосферу необхідно зменшити споживання енергії шляхом інвестування у підвищення енергоефективності та розвиток інфраструктури. Однак цих заходів буде не достатньо, тому швидке уловлювання та надійне зберігання техногенного діоксиду вуглецю також є необхідною умовою [2].

Облаштування великих енергоємних підприємств технологіями уловлювання діоксиду вуглецю обумовлює необхідність пошуку шляхів його утилізації. Перспективним напрямом утилізації діоксиду вуглецю є його нагнітання у виснажені нафтогазові родовища з метою підвищення їх вуглеводневилучення [4-7].

Технологія нагнітання діоксиду вуглецю є достатньо відомою та використовується в світі для підвищення кінцевих коефіцієнтів вилучення нафти з виснажених нафтових родовищ (США, Канада, тощо). Впровадження даної технології на родовищах нафти і газу України потребує проведення додаткових досліджень та промислових випробувань.

### **Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Енергетична галузь України характеризується високою енергоємністю та водночас дуже низькою ефективністю. Більшість підприємств важкої промисловості, що працюють на вугіллі, застарілі та потребують модернізації. Головним завданням модернізації є зменшення навантаження на навколишнє середовище шляхом мінімізації шкідливих викидів в атмосферу та підвищення ефективності перетворення енергії.

Теперішнє суспільство в повній мірі залежить від викопного палива, а перехід на альтернативні енергоефективні джерела відновлювальної енергії потребує великих коштів та часу. Однак стан навколишнього середовища вимагає невідкладних дій щодо зниження рівня шкідливих викидів парникових газів. Досягнути цього можна шляхом уловлювання техногенного діоксиду вуглецю на підприємствах важкої промисловості, що працюють на викопному паливі з наступним його захороненням у виснажених нафтогазових родовищах.

Зважаючи на вищенаведене виникає необхідність у проведенні додаткових досліджень з нагнітання техногенного діоксиду вуглецю у виснажені родовища нафти і газу з використанням основних інструментів гідродинамічного моделювання на основі цифрових тривимірних моделей.

### **Мета та завдання досліджень**

Основною метою та завданням даної статті є формування механізмів реалізації інвестиційних проєктів з модернізації енергоємних підприємств, що працюють на викопному паливі за рахунок економічного ефекту від додаткового видобутку вуглеводнів, що отримується від реалізації технологій нагнітання (утилізації) техногенного діоксиду вуглецю у виснажені нафтогазові родовища.

### **Висвітлення основного матеріалу досліджень**

Екологічна проблема на даний момент є вкрай гострою у зв'язку з неефективним використанням природних вуглеводнів, які є основним джерелом енергії. Питання врегулювання екологічних проблем неодноразово піднімалися світовою спільнотою, усвідомлюючи важливість проблеми та можливі наслідки для людського існування.

Результатом техногенної діяльності людини є зміна клімату, що супроводжується таненням льодовиків, підняттям рівня океану, засухами, посиленням пожежної небезпеки, тощо.



Рисунок 1 – Наслідки техногенної діяльності людини

Наслідки техногенної діяльності людини наведені на рисунку 1.

Підписання Кіотського протоколу та Паризької угоди зумовило посилення кліматичних вимог в глобальному масштабі щодо зниження рівня промислових викидів в атмосферу та зменшення навантаження на навколишнє середовище. Відповідно до підписаних угод одним із перших кроків на шляху до декарбонізації енергетичних систем є швидке уловлювання діоксиду вуглецю та надійне його захоронення [8-9].

Згідно з Кіотським протоколом кожна країна-учасниця повинна створити систему для оцінювання джерел антропогенних викидів. Такі системи мають бути уніфікованими для кожної країни та представлятися в однаковому форматі. З цією метою Міжурядова група експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) розробила спеціальні методики, де пропонуються підходи до проведення інвентаризацій антропогенних емісій із поділом на категорії джерел. Для прикладу структура джерел емісії в енергетичному секторі наведена на рисунку 2.

Відповідно до структури джерел емісії в енергетичному секторі уловлювання діоксиду вуглецю може здійснюватися на теплових електростанціях, металургійних заводах, нафтогазопереробних заводах, установках з виробництва природного газу, синтетичного палива, цементних цехах та заводах з виробництва біологічного палива, тощо [10].

Враховуючи те, що близько 70 % викидів парникових газів припадає на частку викопного палива на сьогоднішній день розроблено значну кількість технологій уловлювання діоксиду вуглецю з продуктів згоряння. До основних технологій відносять: технологію уловлювання діоксиду вуглецю після спалювання, до спалювання та зі спалюванням палива, збагаченого киснем [5, 11].

Найпоширенішою технологією уловлювання парникового газу є технологія після спалювання, оскільки відокремлення діоксиду вуглецю відбувається після спалювання палива. Суть цієї технології полягає у використанні рідких розчинників, які в результаті хімічних реакцій з димовими газами відділяють діоксид вуглецю. У ролі розчинників можуть бути використані такі хімічні сполуки як аміни, аміак, тощо [12].

Принципова схема уловлювання діоксиду вуглецю після спалювання органічного палива наведена на рисунку 3.

Для уловлювання діоксиду вуглецю димові гази направляються до очисного резервуару, в якому безпосередньо контактують з рідким розчинником (водний розчин аміну). Пройшовши контактну частину абсорбера, очищений димовий газ відводиться за межі установки, а розчин насиченого аміну надходить в теплообмінник, де відбувається його нагрів. Після теплообмінника розчин аміну піддається регенерації та направляється до очисного резервуару [12].

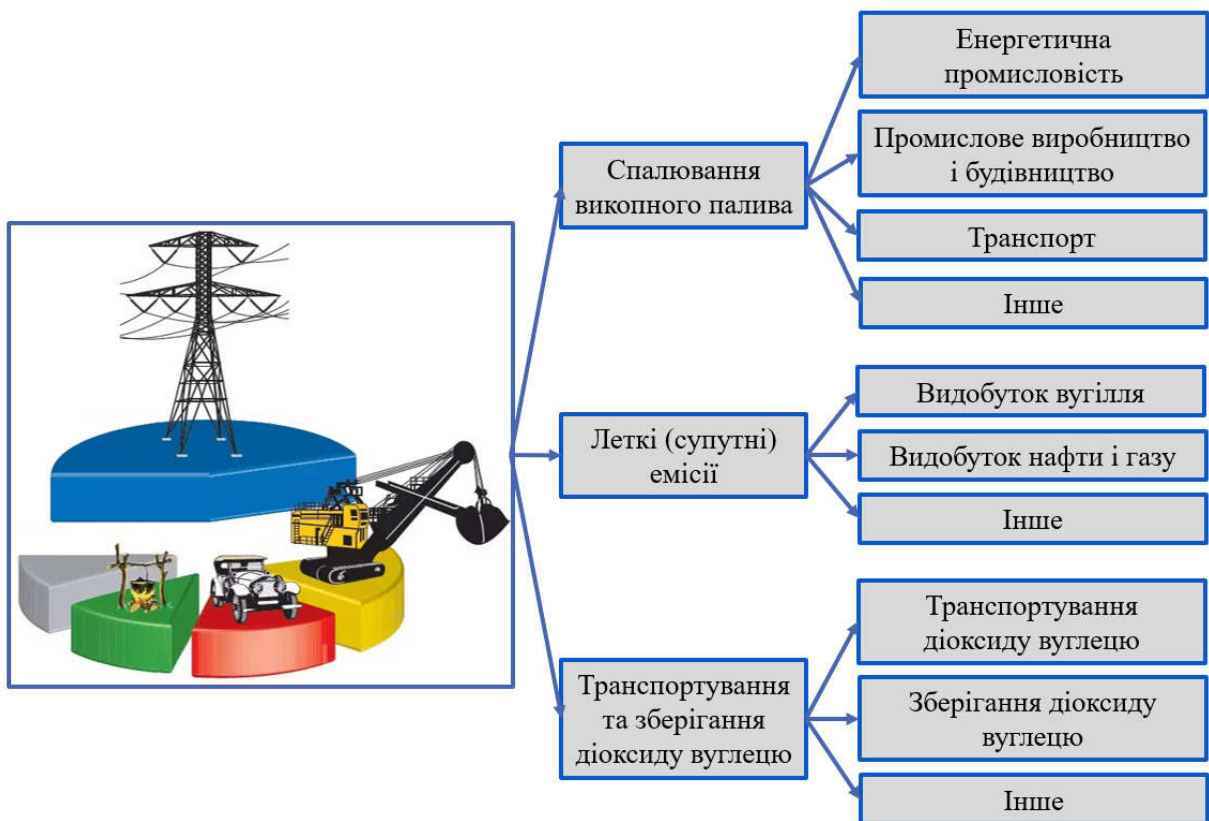


Рисунок 2 – Структура джерел емісії в енергетичному секторі

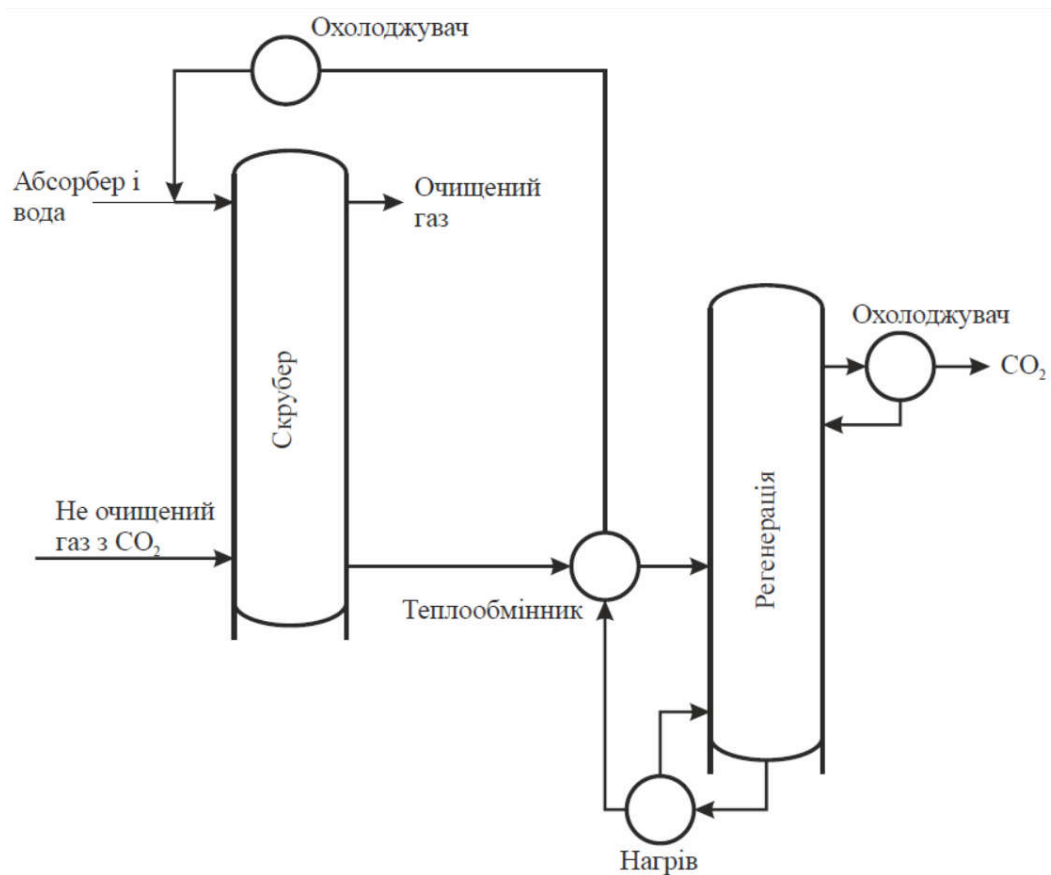


Рисунок 3 – Принципова схема уловлювання діоксиду вуглецю після спалювання органічного палива

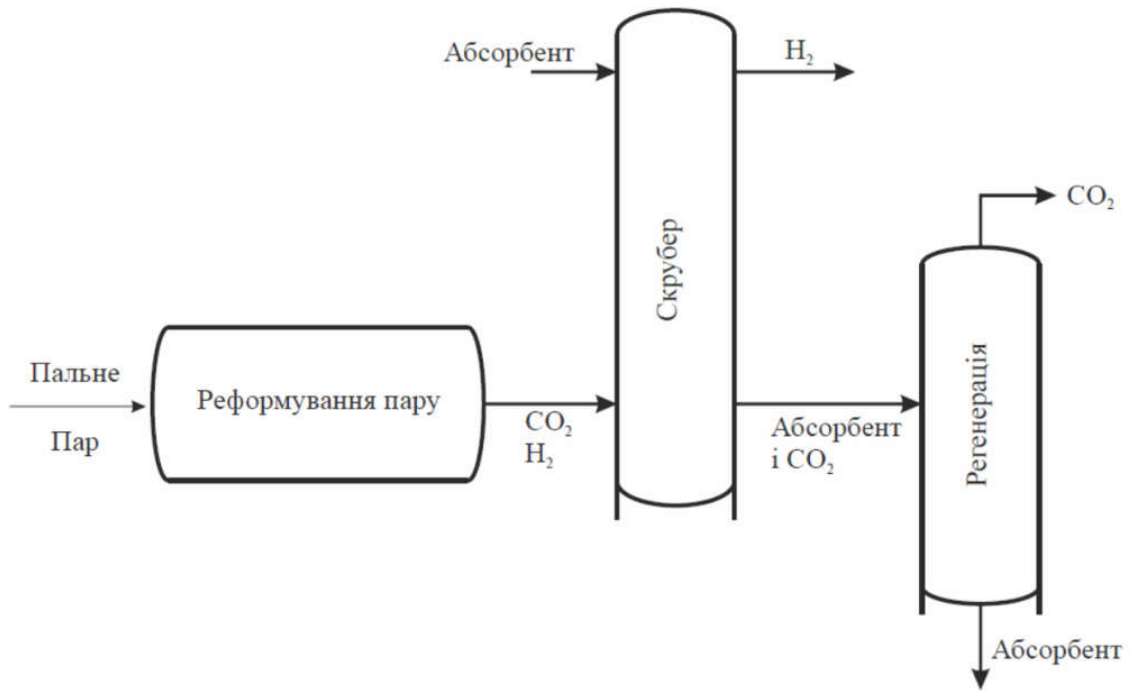


Рисунок 4 – Принципова схема уловлювання діоксиду вуглецю до спалювання органічного палива

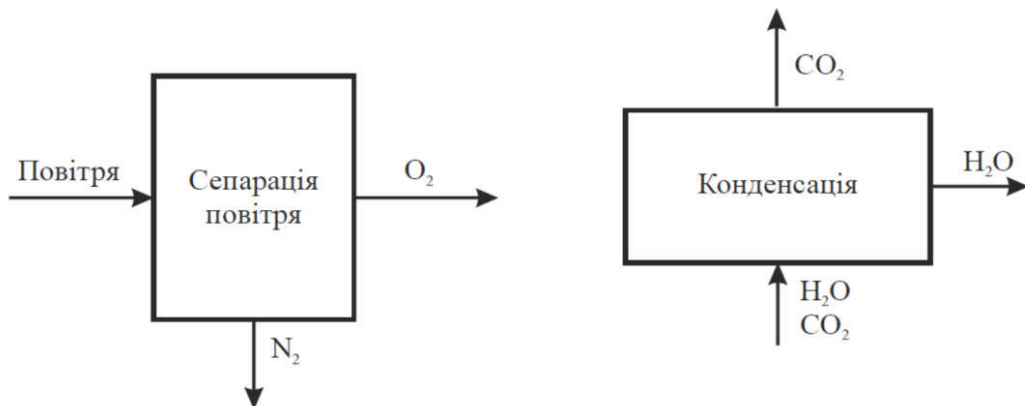


Рисунок 5 – Принципова схема уловлювання діоксиду вуглецю після спалювання збагаченого киснем органічного палива

Технологія уловлювання діоксиду вуглецю до спалювання пов'язана з перетворенням палива і застосовується у виробництві різного типу добрив та водню. З допомогою процесу газифікації можна отримати суміш водню, оксиду вуглецю та діоксиду вуглецю з викопного палива або ж біомаси. Дана технологія є набагато складнішою порівняно із технологією уловлювання після спалювання, що робить її менш привабливою з точки зору впровадження на промислових об'єктах.

Принципова схема уловлювання діоксиду вуглецю до спалювання органічного палива наведена на рисунку 4.

Однією з вискоєфективних технологій отримання діоксиду вуглецю є технологія спа-

лювання збагаченого киснем органічного палива. Згідно цієї технології в ролі окиснювача використовується кисень, а не повітря. В результаті спалювання органічного палива виробляється пара, яка служить енергією для роботи турбін та вироблення електроенергії. Суміш димових газів, діоксиду вуглецю та водяної пари рециркулюється для контролю температури та поступово охолоджуються. Після цього уловлений діоксид вуглецю висушують, стискають та транспортують до місця зберігання [11]. Однак, значні витрати на отримання кисню дещо обмежують застосування даної технології.

Принципова схема уловлювання діоксиду вуглецю після спалювання збагаченого киснем органічного палива наведена на рисунку 5.

Висока вартість промислових установок та відсутність інфраструктури зазвичай стримують застосування традиційних методів уловлювання діоксиду вуглецю з димових газів. Більш доступною та високоефективною є технологія кальцій-карбонатного циклу, яка використовує в якості сорбенту оксид кальцію, який отримують з вапняків та доломітів.

Суть технології полягає у переміщенні сорбенту між двома реакторами, в одному з яких при низькій температурі відбувається поглинання діоксиду вуглецю, а в іншому при більш високій температурі – розкладання карбонату кальцію. Такого типу технології ефективні на електростанціях з високими викидами діоксиду вуглецю на одиницю виробленої потужності. Дана технологія характеризується високою швидкістю процесу поглинання діоксиду вуглецю завдяки високій температурі проведення реакції, скороченням кількості необхідного для реакції кисню та відносною дешевизною методу.

Сучасні технології уловлювання діоксиду вуглецю після або до спалювання, призначені для застосування на великих енергоємних підприємствах та можуть уловлювати до 85-95 % діоксиду вуглецю. Для уловлювання та стискування діоксиду вуглецю витрачається на 10-40 % більше енергії, порівняно з відсутністю установок уловлювання. Технології уловлювання діоксиду вуглецю при спалюванні палива збагаченого киснем можуть забезпечити уловлювання 95-100 % діоксиду вуглецю. Враховуючи необхідність в додаткових обробках газу з метою видалення сірки і азоту, об'єми діоксиду вуглецю дещо знижуються і становлять трохи більше 90 % [10-11].

Повномасштабне впровадження технологій уловлювання діоксиду вуглецю вже розпочато високорозвинутими країнами світу. На сьогоднішній день діоксид вуглецю уловлюється на великих енергоємних підприємствах Канади та США. У Європі лідерами в напрямку декарбонізації енергетичних систем виступають такі країни як Нідерланди, Великобританія, Німеччина та Норвегія.

Метою технологій уловлювання діоксиду вуглецю є створення концентрованого потоку неуглеводневого газу високого тиску, який потрібно транспортувати до місця його захоронення [1].

До основних шляхів захоронення техногенного діоксиду вуглецю відносять: виснажені нафтогазові поклади; для підвищення вуглеводневилучення; водоносні горизонти; вугільні пласти, що не розробляються; для підвищення видобутку вугільного метану, тощо [13-14].

Шляхи утилізації техногенного діоксиду вуглецю наведено на рисунку 6.

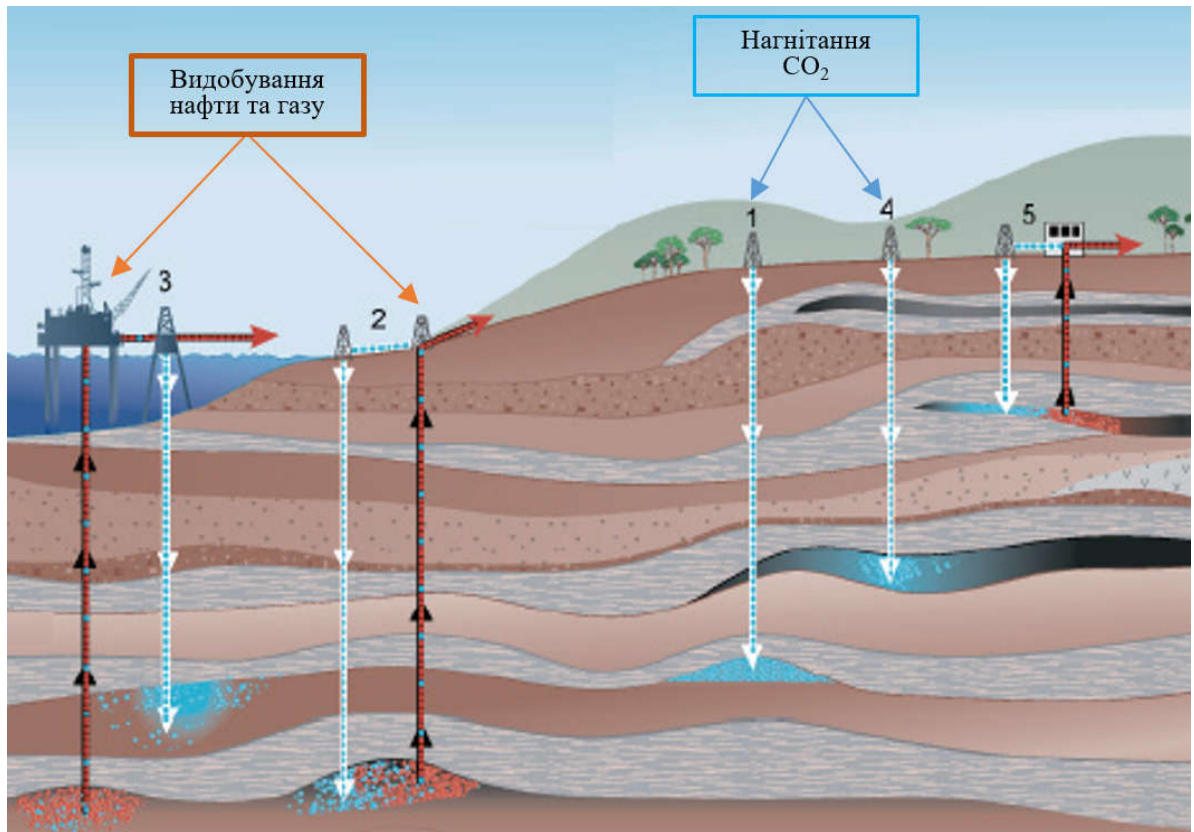
Норвежські дослідники розробили технологію запомповування діоксиду вуглецю в підземні пласти під морським дном Північного моря. Дана технологія дозволяє щорічно утилізувати мільйони тон діоксиду вуглецю. Такі об'єми діоксиду вуглецю в основному отримуються не за рахунок спалювання органічного палива, а за рахунок його видобутку. Природний газ родовища Слейпнір (Норвегія) містить 9 % діоксиду вуглецю, що значно перевищує допустимі норми. Зазвичай виділений діоксид вуглецю випускали в атмосферу. Однак, введення штрафів за шкідливі викиди діоксиду вуглецю зумовили необхідність його уловлюванні та утилізації [13].

На сьогоднішній день розроблена технологія нагнітання діоксиду вуглецю в пласти кам'яного вугілля. Зважаючи на те, що в пластах, які залягають на великих глибинах знаходяться значні об'єми метану, видобуток вугілля за таких умов може бути дуже небезпечним. Саме тому перед початком видобутку кам'яного вугілля в пласти нагнітається діоксид вуглецю з метою витіснення метану, що дозволяє отримати додатковий економічний ефект від такого роду проектів [15-16].

Одним із шляхів утилізації діоксиду вуглецю є підземні резервуари пластової води. Наявність водних ресурсів, які є непридатними для пиття можуть вирішити всю проблему утилізації діоксиду вуглецю [15]. При нагнітанні діоксиду вуглецю в океан на великі глибини (понад 3600 м) у впадинах дна утворюються холодні озера, на поверхні яких у зв'язку з низькою температурою, утворюється гідрат діоксиду вуглецю у вигляді шару льоду. Незважаючи на безкінечний потенціал океану щодо захоронення діоксиду вуглецю, до сьогодні не встановлені негативні сторони такого впливу людини на глибоководні мікроорганізми [14].

Перспективним напрямом утилізації техногенного діоксиду вуглецю є його використання в нафтогазовій промисловості для підвищення вуглеводневилучення виснажених родовищ. На основі аналізу результатів світового досвіду розробки нафтогазових родовищ встановлено високу технологічну ефективність використання діоксиду вуглецю в якості агенту нагнітання [5, 17].

Ефективність використання діоксиду вуглецю обумовлена високою його розчинністю в нафті і пластовій воді порівняно з іншими газами. При розчиненні діоксиду вуглецю в нафті збільшується її об'єм, що в свою чергу призво-



1 – виснажені нафтогазові поклади; 2 – використання для підвищення вуглеводневилучення;  
3 – водоносні горизонти; 4 – вугільні пласти, що не розробляються;  
5 – використання для підвищення видобутку вугільного метану

Рисунок 6 – Шляхи утилізації техногенного діоксиду вуглецю

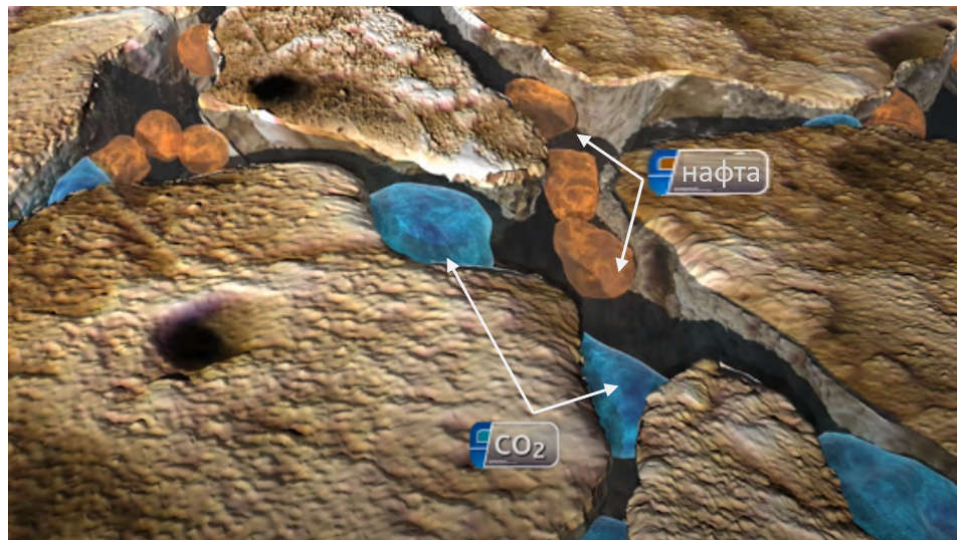


Рисунок 7 – Механізм витіснення залишкових запасів нафти

дить до витіснення залишкової нерухомої нафти до видобувних свердловин.

Механізм витіснення залишкових запасів нафти наведено на рисунку 7.

Впровадження технології нагнітання діоксиду вуглецю в продуктивні поклади призводить до зниження міжфазового натягу на межі

вуглеводневий флюїд-вода, покращенні змочуваності породи при розчиненні у вуглеводневому флюїді та воді та забезпеченні переходу нафти з плівкового стану в крапельний. Нагнітання діоксиду вуглецю на межі початкового нафтогазоводяного контакту підвищує в'язкість пластової води [18].



Рисунок 8 – Наслідки корозії промислових трубопроводів

Результати проведених досліджень з використанням цифрових тривимірних моделей, що наведені в роботах [19-21] свідчать про ефективність використання діоксиду вуглецю для регулювання процесу обводнення продуктивних покладів та видобувних свердловин. За результатами проведених досліджень встановлено, що у випадку нагнітання діоксиду вуглецю в поклад на початковому газоводяному контакті створюється гідродинамічний та фільтраційний бар'єри на шляху руху пластової води. Завдяки впровадженню технології нагнітання діоксиду вуглецю в продуктивні поклади, що розробляються в умовах прояву активного водонапірного режиму приплив пластової води стає більш контрольованим, що обумовлює значно вищі кінцеві коефіцієнти вуглеводневилучення порівняно з розробкою на виснаження.

До основних переваг впровадження технології нагнітання діоксиду вуглецю в продуктивні поклади можна віднести його здатність збільшувати рухомість нафти та знижувати при йому рухомість пластової води. При високому ступені розширення нафти частина адсорбційного шару нафти в порах звільняється, в'язкість під впливом розчиненого газу знижується і нафта стає рухомою.

Впровадження технологій уловлювання діоксиду вуглецю зумовлює необхідність пошуку шляхів його транспортування до місця захоронення. Транспортування діоксиду вуглецю здійснюється трубопроводами та є досконалою ринковою технологією починаючи з 70-х років [5].

Висока технологічна ефективність використання діоксиду вуглецю в якості агента нагнітання з метою підвищення вуглеводневилучення сприяла створенню розвиненої мережі трубопроводів в США, Канаді та Угорщині [22-24].

У США спеціальними трубопроводами довшиною близько 3000 км щорічно транспортується більше 40 млн т діоксиду вуглецю, в основному для підвищення вуглеводневилучення нафтових родовищ Техасу. Для транспортування діоксиду вуглецю споруджуються компресорні станції, які встановлюються на початку трубопроводу, а у випадку значних відстаней облаштовуються також проміжні компресорні станції. Ключовими факторами при проектуванні компресорних станцій є: швидкість потоку, тиск всмоктування та нагнітання, теплоємність газу і продуктивність компресорів [5].

При транспортуванні діоксиду вуглецю виникають деякі ускладнення пов'язані із корозією обладнання. Корозія виникає у зв'язку з наявністю в потоці діоксиду вуглецю вологи. При взаємодії діоксиду вуглецю з водою утворюється карбонатна кислота, яка спричиняє агресивне корозійне середовище. При взаємодії поверхні промислового обладнання з агресивним середовищем відбувається її пошкодження, що виражається в утворенні та розвитку корозійних уражень.

Наслідки корозії промислових трубопроводів зображено на рисунку 8.

Для забезпечення тривалої експлуатації трубопроводів, що використовуються для транспортування діоксиду вуглецю необхідно виготовляти їх з корозійностійкого сплаву. Вартість таких матеріалів в кілька разів перевищує вартість марганцево-вуглецевих видів сталей [25-26].

Перед подачею діоксиду вуглецю в трубопровід здійснюється ретельне його осушення. Процес підготовки діоксиду вуглецю є довготривалим, який включає в себе декілька циклів стискання та охолодження з метою відділення вологи. Тиск, температура та вміст вологи по-



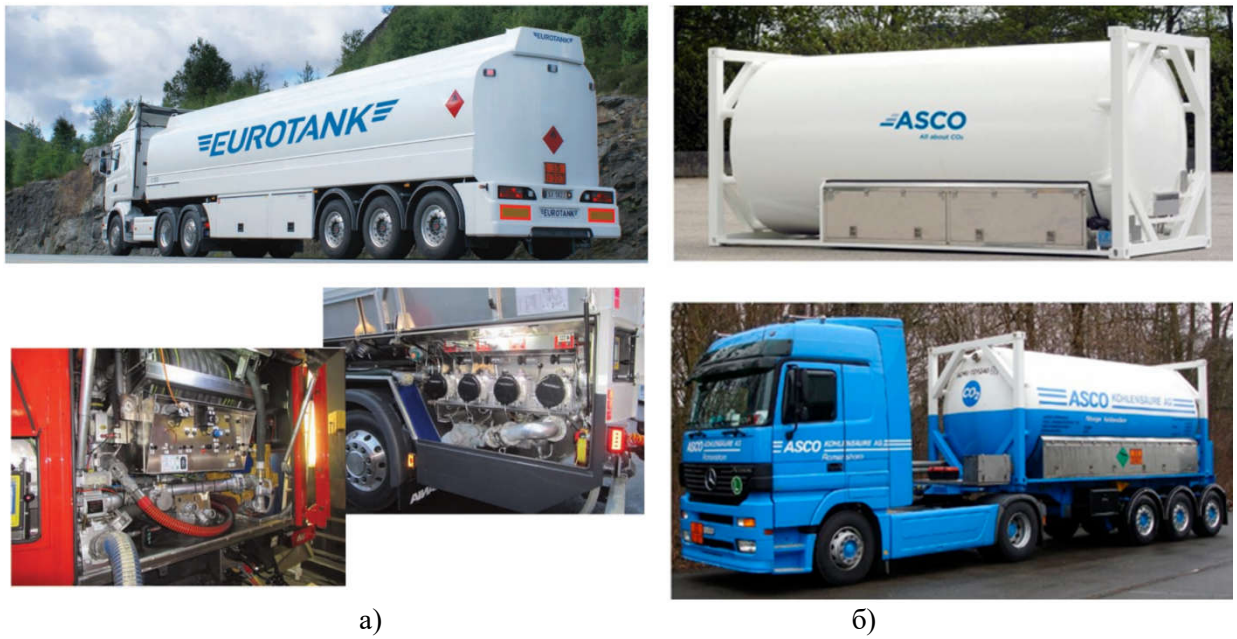


Рисунок 9 – Транспортувальні цистерни, які використовуються для перевезення діоксиду вуглецю компанії Eurotank Oy (а) та компанії ASCO (б)

винні бути адаптованими до виду транспортування і вимогам до зберігання [27].

Використання трубопроводів для транспортування діоксиду вуглецю дозволяє забезпечити безперервну його подачу від установки уловлювання до місця нагнітання за умови наявності надійного джерела парникового газу. Всі наявні трубопроводи, що використовуються для транспортування діоксиду вуглецю, експлуатуються під високим тиском при термобаричних умовах, за яких діоксид вуглецю поводить себе як газ, однак має густину рідини [1].

Транспортування діоксиду вуглецю можна здійснювати також за допомогою авто-, залізничного транспорту, морських суден, тощо. Використання автотранспорту для перевезення діоксиду вуглецю є перспективною технологією.

Компанія Eurotank Oy є виробником ізолюваних автоцистерн для перевезення діоксиду вуглецю. В якості матеріалу для виготовлення цистерн для перевезень діоксиду вуглецю використовується нова сталь типу дуплекс, що обумовлює легкість та високу надійність конструкції. Всі шви на цистерні зварені плазмою, згладжені та відполіровані. Такі цистерни витримують великі навантаження, мають великий термін служби та дуже легко очищаються [28]. Автоцистерни компанії Eurotank Oy для перевезення діоксиду вуглецю зображено на рисунку 9а.

Компанія ASCO виготовляє транспортувальні (знімні) резервуари різних розмірів для перевезення діоксиду вуглецю. Дані резервуари

можна встановити на будь-яку вантажівку або причіп жорсткого плоского типу. Переносні цистерни є економічною альтернативою звичайним автоцистернам, оскільки оператор може використовувати транспортний засіб для виконання інших службових завдань. Резервуар є автономним блоком, який встановлюється на шасі вантажного автомобіля та може бути легко підняти чи відключений у разі необхідності. Спеціально розроблена конструкція переносних цистерн для перевезення діоксиду вуглецю, так і напівпричепів дуже зручне в управлінні. У відсіку техніки, що замикається, розміщені насос і двигун, регулюючі клапани, манометри та трубопроводи [29].

Транспортувальні цистерни компанія ASCO для перевезення діоксиду вуглецю зображено на рисунку 9б.

Однак використання авто- та залізничного транспорту може виявитися економічно не рентабельним порівняно із трубопроводами та суднами у випадку необхідності транспортування значних об'ємів діоксиду вуглецю. Дані технології можуть бути реалізовані у випадку перевезення дуже малих обсягів і навряд чи підходять для використання для реалізації проектів у великих масштабах.

Транспортування діоксиду вуглецю може здійснюватися із використанням морських суден, однак індустрія морського транспортування є обмеженою та вимірюється кількома невеликими суднами. Переважна більшість із цих суден належать норвезькому підприємству Yara.



Рисунок 10 – Морське судно «Yara gas III»



Рисунок 11 – Морське судно «Coral Carbonic»

Перше морське судно «Yara gas III» призначено для транспортування діоксиду вуглецю для хімічної промисловості споруджено в 1975 році з вантажопідйомністю 2645 тонн. Протягом 1977 року на гамбурзькій верфі JJ Sietas Schiffswerft споруджено ще два морські судна під назвами «Yara gas I» та «Yara gas II» з вантажопідйомністю 2060 та 1964 тонн, відповідно. Морське судно «Yara gas III» зображено на рисунку 10.

У 2005 році нідерландською компанією Bodewes Shipyard та польською компанією Marine Projects введено в експлуатацію ще два судна під назвами «Yara Embla» та «Yara».

Вантажопідйомність цих суден становила по 3480 тонн.

Однак на сьогоднішній день в світі існує тільки один газозов, споруджений у 1999 році виключно для транспортування техногенного діоксиду вуглецю з об'єктів уловлювання до місця його захоронення. Дане судно належить компанії Anthony Veder та носить назву «Coral Carbonic». Морське судно «Coral Carbonic» зображено на рисунку 11.

Транспортування діоксиду вуглецю морськими суднами може бути більш вигідним варіантом у випадку необхідності перевезення значних його об'ємів. Тому при потребі масштаби використання даної технології транспортування

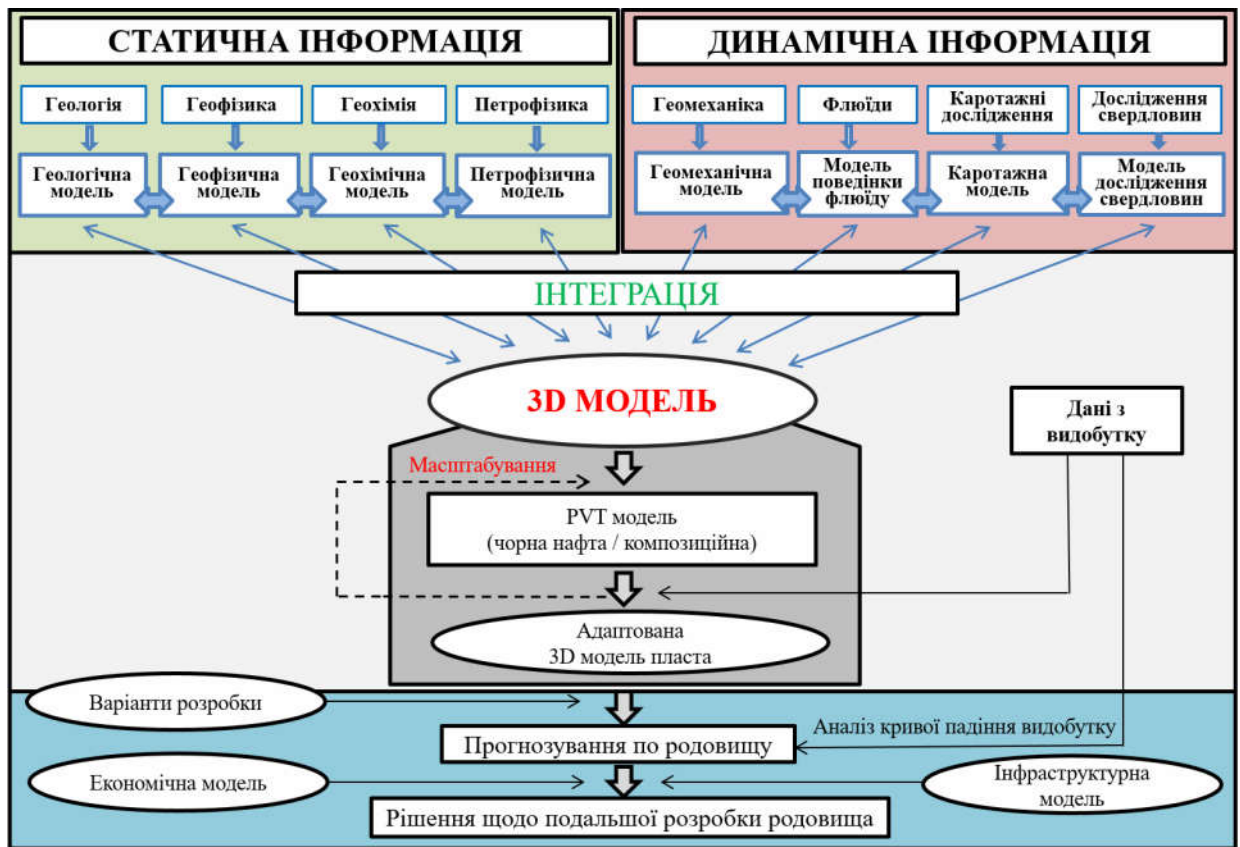


Рисунок 12 – Схема інтеграції геолого-промислової інформації в програмні комплекси

діоксиду вуглецю можуть бути збільшені до розміру великих перевізників [30].

В майбутньому використання морських суден для транспортування техногенного діоксиду вуглецю може стати привабливою перспективою для модернізації великих енергоємних підприємств шляхом обладнання їх технологіями уловлювання діоксиду вуглецю. Особливо ефективним такий вид транспортування може бути у випадку розташування джерела діоксиду вуглецю поблизу морських берегів та значної віддаленості об'єкту в який планується здійснювати процес його нагнітання.

Дослідження з нагнітання техногенного діоксиду вуглецю у виснажені нафтогазові родовища необхідно здійснювати на основі постійно діючих геолого-технологічних моделей. Адже саме цифрова тривимірна модель призначена для вирішення основних завдань розробки родовищ з метою найбільш повного вилучення запасів вуглеводнів [31-35].

Інтеграція всієї наявної геолого-промислової інформації в програмні комплекси для створення об'ємної моделі родовища дає можливість систематизувати, проаналізувати та обробити наявні дані, що в подальшому вирішує питання розв'язку системи рівнянь з метою отримання бажаного результату [32].

Схема інтеграції геолого-промислової інформації в програмні комплекси наведена на рисунку 12.

Моделювання процесів розробки нафтогазових родовищ вуглеводнів дає можливість набратися корисного досвіду в застосуванні складних методик для прогнозування видобутку вуглеводнів з таких родовищ та дозволяє встановити, що саме необхідно зробити для стабілізації видобутку природного газу в останні роки завершального етапу розробки. Стратегія подальших робіт може включати буріння нових свердловин для залучення в розробку мікро- та макрозащемленого газу, удосконалення способу експлуатації свердловин та оптимізацію умов їх експлуатації [36-40].

У випадку реалізації технології нагнітання діоксиду вуглецю у виснажені нафтогазові поклади з метою підвищення їх вуглеводневилучення необхідно здійснювати постійний моніторинг та контроль за просуванням фронту діоксиду вуглецю та станом навколишнього середовища в зоні проведення робіт.

Варто зазначити, що діоксид вуглецю чинить негативний вплив на атмосферу та всі живі організми, тому вкрай важливим завданням при такого роду проєктах є забезпечення утримання діоксиду вуглецю в надрах землі протя-

гом тисяч мільйонів років та недопущення його витоку на поверхню [1].

Причинами витоку діоксиду вуглецю на поверхню може бути як і діяльність людини, так природні фактори. Основними шляхами є свердловини, оскільки саме вони забезпечують прямий зв'язок між поверхнею та місцем захоронення. Свердловини, які використовуються в нафтогазовій галузі для видобування природних вуглеводнів, зазвичай побудовані з штучних матеріалів, які мають властивість руйнуватися під впливом високих тисків, значних навантажень, агресивного корозійного середовища, тощо.

Враховуючи вищенаведене причини витоку діоксиду вуглецю наступні:

- негерметичність цементних мостів на вибої свердловин;
- дефекти обсадних та експлуатаційних колон, які обумовлені її корозією;
- негерметичність обсадних та експлуатаційних колон;
- неякісне і неповне цементування обсадних та експлуатаційних колон.

В ході реалізації проектів з утилізації техногенного діоксиду вуглецю у виснажених нафтогазових родовищах необхідно облаштовувати свердловини спеціальним обладнанням, яке дозволить здійснювати моніторинг та контролювати рівень концентрації діоксиду вуглецю. Ефективними в цьому випадку буде використання високочутливих геохімічних та геофізичних методів контролю.

Що стосується природних шляхів витоку техногенного діоксиду вуглецю, то потенційними шляхами можуть бути тектонічні порушення, розломи, які не є екранами. Прорив діоксиду вуглецю також може відбутися через систему тріщин в порово-тріщинуватому колекторі.

Родовища вуглеводнів зазвичай є неоднорідними та характеризуються мінливістю фільтраційно-ємнісних властивостей як за товщиною, так і за площею, що значно ускладнює проведення ефективного контролю за міграцією неуглеводневого газу. В рамках реалізації такого роду проектів рекомендується проведення повторної сейсмічної розвідки для відстеження підземної міграції діоксиду вуглецю. Корисними можуть також бути такі методи, як гравітаційні і електричні вимірювання. Для безпосереднього виявлення витоку діоксиду вуглецю необхідно регулярно проводити відбір проб ґрунтових вод та ґрунту.

Для виявлення неконтрольованих викидів діоксиду вуглецю можуть застосовуватися методи, які використовуються на рівні поверхні. В рамках всіх існуючих проектів промислового значення і експериментальних проектів необхідно розробляти програми по випробуванню цих та інших методів моніторингу. З огляду на довгостроковий характер зберігання діоксиду вуглецю, може знадобитися проведення моніторингу місця зберігання протягом тривалих періодів часу.

### **Висновки**

Техногенна діяльність людини призводить до збільшення викидів парникових газів та, як результат, негативного впливу на навколишнє середовище. Одним із можливих способів зниження показників промислових викидів парникових газів є впровадження на підприємствах важкої промисловості технологій уловлювання діоксиду вуглецю з наступним їх захороненням у підземних резервуарах штучного або природного походження.

Перспективним шляхом утилізації техногенного діоксиду вуглецю є його використання в нафтогазовій галузі для підвищення вуглеводневилучення виснажених родовищ. Слід зазначити, що в даному випадку діоксид вуглецю виступає в ролі корисного продукту, завдяки якому можна підвищити кінцеві коефіцієнти вилучення вуглеводнів в умовах гострого дефіциту вуглеводневої сировини.

Світовий досвід застосування діоксиду вуглецю налічує майже 60 років, а технологія нагнітання діоксиду вуглецю відноситься до числа найбільш ефективних методів третинного видобутку вуглеводнів та використовується в усьому світі. Впровадження технології нагнітання діоксиду вуглецю зазвичай не потребує значних витрат, оскільки на більшості родовищах вже впроваджувались первинні та вторинні методи видобутку вуглеводнів. Отже, створена інфраструктура під ці методи може бути використана для реалізації технологій нагнітання діоксиду вуглецю.

Дослідження ефективності впровадження технологій нагнітання діоксиду вуглецю в продуктивні поклади необхідно здійснювати на основі постійно діючих геолого-технологічних моделей. Використання цифрового моделювання дозволить оптимізувати систему розробки родовищ та забезпечити максимальні коефіцієнти вуглеводневилучення.

Література

1. Кіт Уїрріскі. Уловлювання та зберігання вуглецю: Українські перспективи для промисловості та забезпечення енергетичної безпеки. *Міжнародне екологічне об'єднання «Біллона»*. 2013. Осло. Норвегія. С. 48.
2. Кузовкин В.В. Моделирование процессов выбросов CO<sub>2</sub> и захоронения углерода при неэнергетическом использовании топлива. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2001. №1. С. 34-38.
3. Кудря С.А. Стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні. *Вісн. НАН України*. 2015. №12. С.19-26.
4. SPE-77347-MS. Enhanced Gas Recovery by Carbon Dioxide Sequestration in Depleted Gas Reservoirs. D.D. Mamora, J.G. Seo. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, September, 2002. P. 1-9. <https://doi.org/10.2118/77347-MS>
5. 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. №2(35). С.26-30. <https://rrngr.nung.edu.ua/index.php/rrngr/article/view/537>
6. Кондрат Р.М., Дорошенко В.М., Кондрат О.Р. Особливості завершальної стадії розробки родовищ нафти і газу. *Нафтогазова енергетика*. 2010. №1. С.17-21. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/1303>
7. Рассохин Г.В. Завершающая стадия разработки газовых и газоконденсатных месторождений. М.: *Недра*. 1997. 184 с.
8. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (дата звернення: 22.04.2022).
9. Paris\_agreement. URL: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement\\_publication.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf) (дата звернення: 22.04.2022).
10. Joris Koornneef, Andrea Ramirez, Toon van Harmelen, Arjan van Horssen, Wim Turkenburg, Andre Faaij. The impact of CO<sub>2</sub> capture in the power and heat sector on the emission of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, particulate matter, volatile organic compounds and NH<sub>3</sub> in the European Union. *Atmospheric Environment*, 2010. 44(11), Pp. 1369-1385. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.022>
11. Ахмедов Р.Б. Автономное энергосбережение нефтяных месторождений с попутным производством CO<sub>2</sub> с целью повышения нефтеотдачи и улучшения экологии. *Нефтяное хозяйство*. 1998. №9. С. 46-48.
12. Производство оборудования для нефтегазовой отрасли. URL: <https://gazsurf.com/ru/gazopererabotka/oborudovanie> (дата звернення: 10.04.2022).
13. Хан С.А. Анализ мировых проектов по захоронению углекислого газа. *Георесурсы*. 2010. №4(36). С. 55-62
14. Улавливание и хранение двуокиси углерода. Специальный доклад МГЭИК. URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_spm\\_ts\\_ru-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_spm_ts_ru-1.pdf) (дата звернення: 11.05.2022).
15. Переверзева С.А., Коносовский П.К., Тудвачев А.В., Хархордин И.Л. Захоронение промышленных выбросов углекислого газа в геологические структуры. *Вестник Санкт-Петербургского университета*. 2014. №1(7). С. 5-21.
16. Сластунов С.В., Карашадзе Г.Г., Харин Ю.В. Модель массопереноса диоксида углерода и метана в технологии захоронения парниковых газов в некондиционных угольных пластах. *Горный информационно – аналитический бюллетень*. 2009. №12. С. 359-366.
17. Matkivskiy S., Kondrat O. The influence of nitrogen injection duration at the initial gas-water contact on the gas recovery factor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Kharkiv. № 1(6 (109)), Pp. 77–84. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224244>
18. Балинт В., Бан А., Долешан Ш. Применение углекислого газа в добыче нефти. М.: *Недра*. 1977. 240 с.
19. Kondrat O., Matkivskiy S. Research of the influence of the pattern arrangement of injection wells on the gas recovery factor when injecting carbon dioxide into reservoir. *Technology and system of power supply*. 2020. Kharkiv. №5/1 (55). С. 12-17. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.215074>
20. Matkivskiy S. Effects of the rate of natural gas production on the recovery factor during carbon dioxide injection at the initial gaswater contact. *Technology and system of power supply*. 2021. Kharkiv. №1/3 (57). Pp. 6-11. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.225603>
21. Matkivskiy S., Kondrat O., Burachok O. Investigation of the influence of the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) injection rate on the activity of the water pressure system during gas condensate fields development. *Global Trends, Challenges and Horizons*. Dnipro. 2020. P. 1-10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123001011>
22. SPE-59327-MS. CO<sub>2</sub> Injection in the Weyburn Field of Canada: Optimization of Enhanced Oil Recovery and Greenhouse Gas Storage

- With Horizontal Wells. Qamar M. Malik, M.R. Islam. *SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*, Tulsa, Oklahoma, April, 2000. P. 25-33. <https://doi.org/10.2118/00-09-01>
23. PETSOC-2003-109. CO2 Flooding in Jofre Viking Pool. K. Pyo, N. Damian-Diaz, M. Powell, J. Van Nieuwkerk. *Canadian International Petroleum Conference*, Calgary, Alberta, June, 2003. P. 1-30. <https://doi.org/10.2118/2003-109>
24. SPE-22362-MS. Review of the 30 Years' Experience of the CO2 Imported Oil Recovery Projects in Hungary. S. Doleschall, A. Szittar, G. Udvardi. *International Meeting on Petroleum Engineering*, Beijing, China, March, 1992. <https://doi.org/10.2118/22362-MS>
25. Poberezhny L., Hrytsanchuk A., Hrytsuliak G., Poberezhna L., Kosmii M. Influence of hydrate formation and wall shear stress on the corrosion rate of industrial pipeline materials. *Koroze a Ochrana Materialu*. 2018. Vol. 62(4). P. 121-128. <https://doi.org/10.2478/kom-2018-0017>
26. NACE Standard RP0775-2005. Item No. 21017. Preparation and Installation of Corrosion Coupons and Interpretation of Test Data in Oilfield Operations. URL: [https://webstore.ansi.org/preview-pages/NACE/preview\\_NACE+Standard+RP0775-2005.pdf](https://webstore.ansi.org/preview-pages/NACE/preview_NACE+Standard+RP0775-2005.pdf) (дата звернення 15.06.2022)
27. Det Norske Veritas. Recommended Practice Dnv-Rp-J202. Design And Operation Of CO2 Pipelines. 2010. Pp 1-42. URL: <https://www.ucl.ac.uk/cclp/pdf/RP-J202.pdf> (дата звернення 15.06.2022)
28. Профессинальное производство автоцистерн Eurotank. URL: <http://eurotank.fi/wp-content/uploads/2019/08/Ven%C3%A4j%C3%A4-2019-Reis.pdf> (дата звернення 15.06.2022)
29. Europe's largest stock of used iso tankcontainers. URL: <https://pdf.directindustry.it/pdf-en/asco-carbon-dioxide/20-iso-tank-container/38377-966167.html> (дата звернення 15.06.2022)
30. Судна для перевезення діоксиду вуглецю. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Судна\\_для\\_перевезення\\_діоксиду\\_вуглецю](https://uk.wikipedia.org/wiki/Судна_для_перевезення_діоксиду_вуглецю) (дата звернення 15.06.2022)
31. Матківський С.В. Удосконалення технологій розробки родовищ природних газів за водонапірного режиму: дис. доктора філософії. Івано-Франківськ, 2021. 156 с.
32. Жданов С.А., Максимов М.М., Хавкин А.Я., Рыбичкая Л.П., Цыбульская О.Т., Гогоненков Г.Н., Евстифеев В.И., Величкина Н.Ф., Юдин В.А. Проектирование разработки нефтяных месторождений с использованием постоянно действующих геолого-технологических моделей. *Нефтяное хозяйство*. 1997. № 3. С. 43-47.
33. Матківський С.В. Теоретико-методологічні особливості побудови постійно діючих геолого-технологічних моделей родовищ вуглеводнів. *Мінеральні ресурси України*. Київ. 2020 №.4. С. 39-44. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.4.39-44>
34. Alessandro Romi, Oleksandr Burachok, Mariana Laura Nistor, Charidimos Spyrou, Yerlan Seilov, Omon Djuraev, Serhii Matkivskiy, Denys Grytsai, Olena Goryacheva, Roman Soyma. Advantage of Stochastic Facies Distribution Modeling for History Matching of Multi-stacked Highly-heterogeneous Field of Dnieper-Donetsk Basin. *Petroleum Geostatistics*. Florence. Italy. 2019. C.1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902188>
35. L.P. Dake. Fundamentals of Reservoir engineering. Elsevier, *Seventeenth Impression*. 1998. 443 p.
36. Matkivskiy S., Burachok O. Impact of Reservoir Heterogeneity on the Control of Water Encroachment into Gas-Condensate Reservoirs during CO<sub>2</sub> Injection. *Management Systems in Production Engineering*. 2022. Vol. 30. Issue 1. Pp 62-68. <https://doi.org/10.2478/mspe-2022-0008>
37. Matkivskiy S. Increasing hydrocarbon recovery of Hadiach field by means of CO2 injection as a part of the decarbonization process of the energy sector in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*. Dnipro. 2022. Volume 16. Issue 1. Pp. 114-120. <https://doi.org/10.33271/mining16.01.114>
38. Kondrat O., Matkivskiy S. Research of the influence of the pattern arrangement of injection wells on the gas recovery factor when injecting carbon dioxide into reservoir. *Technology and system of power supply*. Kharkiv. 2020. №5/1 (55). С. 12-17. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.215074>
39. Kryvulya S., Matkivskiy S., Kondrat O., Bikman Y. Approval of the technology of carbon dioxide injection into the v-16 water driven reservoir of the Hadiach field of the water pressure mode (Ukraine) under the conditions of the water pressure mode. *Technology and system of power supply*. Kharkiv. 2020. №6/1 (56). С. 13-18. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.217780>
40. Burachok O., Kondrat O., Matkivskiy S. Investigation of the efficiency of gas condensate reservoirs waterflooding at different stages of development. *Global Trends, Challenges and Horizons*. Dnipro. 2020. P. 1-11. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123001010>

References

1. Kit Uiriski. Ulovyuvannya ta zberihannya vuhletsyu: Ukrayins'ki perspektyvy dlya promyslovosti ta zabezpechennya enerhetychnoyi bezpeky. *Mizhnarodne ekolohichne ob"yednannya «Billona»*. 2013. Oslo. Norvehiya. S. 48.
2. Kuzovkin V.V. Modelirovaniye protsessov vybrosov SO<sub>2</sub> i zakhoroneniya ughlerodapri neenergeticheskom ispol'zovanii topliva. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*. 2001. №1. S. 34-38.
3. Kudrya S.A. Stan ta perspektyvy rozvytku vidnovlyuvanoyi enerhetyky v Ukrayini. *Visn. NAN Ukrayiny*. 2015. №12. S.19-26.
4. SPE-77347-MS. Enhanced Gas Recovery by Carbon Dioxide Sequestration in Depleted Gas Reservoirs. D.D. Mamora, J.G. Seo. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, September, 2002. P. 1-9.. <https://doi.org/10.2118/77347-MS>
5. Kondrat R.M., Seredyns'kyy D.YU., Kondrat O.R. Doslidzhennya zastosuvannya vuhlekysloho hazu dlya vyluchennya zalyshkovoyi nafty z obvodnykh naftovykh pokladiv. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2010. №2(35). S.26-30. <https://rrngr.nung.edu.ua/index.php/rrngr/article/view/537>
6. Kondrat R.M., Doroshenko V.M., Kondrat O.R. Osoblyvosti zavershal'noyi stadiyi rozrobky rodovyshch nafty i hazu. *Naftohazova enerhetyka*. 2010. №1. S.17-21. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/1303>
7. Rassokhin G.V. Zavershayushchaya stadiya razrobotki gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy. M.: *Nedra*. 1997. 184 s.
8. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (дата звернення: 22.04.2022).
9. Paris\_agreement. URL: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement\\_publication.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf) (дата звернення: 22.04.2022).
10. Joris Koornneef, Andrea Ramirez, Toon van Harmelen, Arjan van Horssen, Wim Turkenburg, Andre Faaij. The impact of CO<sub>2</sub> capture in the power and heat sector on the emission of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, particulate matter, volatile organic compounds and NH<sub>3</sub> in the European Union. *Atmospheric Environment*, 2010. 44(11), P. 1369-1385. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.022>
11. Akhmedov R.B. Avtonomnoye energosberezheniye neftyanykh mestorozhdeniy s poputnym proizvodstvom SO<sub>2</sub> s tsel'yu povysheniya nefteotdachi i uluchsheniya ekologii. *Neftyanoye khozyaystvo*. 1998. №9. S. 46-48.
12. Proizvodstvo oborudovaniya dlya neftegazovoy otrasli. URL: <https://gazsurf.com/ru/gazopererabotka/oborudovanie> (дата звернення: 10.04.2022).
13. Khan S.A. Analiz mirovykh proyektov po zakhoroneniyu uglekislogo gaza. *Georesursy*. 2010. №4(36). S. 55-62
14. Ulavlivaniye i khraneniye dvoukisi ughleroda. Spetsial'nyy doklad MGEIK. URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_spm\\_ts\\_ru-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_spm_ts_ru-1.pdf) (дата звернення: 11.05.2022).
15. Pereverzeva S.A., Konosavskiy P.K., Tudvachev A.V., Kharkhordin I.L. Zakhoroneniye promyshlennykh vybrosov uglekislogo gaza v geologicheskiye struktury. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*. 2014. №1(7). S. 5-21.
16. Slastunov S.V., Karashadze G.G., Kharin YU.V. Model' massoperenosa dioksida ughleroda i metana v tekhnologii zakhoroneniya parnikovyykh gazov v nekonditsionnykh ughol'nykh plastakh. *Gornyy informatsionno – analiticheskyy byulleten'*. 2009. №12. C. 359-366.
17. Matkivskiy S., Kondrat O. The influence of nitrogen injection duration at the initial gas-water contact on the gas recovery factor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Kharkiv. № 1(6 (109), Pp. 77–84. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224244>
18. Balint V., Ban A., Doleshan SH. Prime-neniye uglekislogo gaza v dobyche nefi. M.: *Nedra*. 1977. 240 s.
19. Kondrat O., Matkivskiy S. Research of the influence of the pattern arrangement of injection wells on the gas recovery factor when injecting carbon dioxide into reservoir. *Technology and system of power supply*. 2020. Kharkiv. №5/1 (55). C. 12-17. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.215074>
20. Matkivskiy S. Effects of the rate of natural gas production on the recovery factor during carbon dioxide injection at the initial gaswater contact. *Technology and system of power supply*. 2021. Kharkiv. №1/3 (57). Pp. 6-11. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.225603>
21. Matkivskiy S., Kondrat O., Burachok O. Investigation of the influence of the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) injection rate on the activity of the water pressure system during gas condensate fields development. *Global Trends, Challenges and Horizons*. Dnipro. 2020. P. 1-10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123001011>

22. SPE-59327-MS. CO<sub>2</sub> Injection in the Weyburn Field of Canada: Optimization of Enhanced Oil Recovery and Greenhouse Gas Storage With Horizontal Wells. Qamar M. Malik, M.R. Islam. *SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*, Tulsa, Oklahoma, April, 2000. P. 25-33. <https://doi.org/10.2118/00-09-01>
23. PETSOC-2003-109. CO<sub>2</sub> Flooding in Joffre Viking Pool. K. Pyo, N. Damian-Diaz, M. Powell, J. Van Nieuwkerk. *Canadian International Petroleum Conference*, Calgary, Alberta, June, 2003. P. 1-30. <https://doi.org/10.2118/2003-109>
24. SPE-22362-MS. Review of the 30 Years' Experience of the CO<sub>2</sub> Imported Oil Recovery Projects in Hungary. S. Doleschall, A. Szittar, G. Udvardi. *International Meeting on Petroleum Engineering*, Beijing, China, March, 1992. <https://doi.org/10.2118/22362-MS>
25. Poberezhny L., Hrytsanchuk A., Hrytsuliak G., Poberezhna L., Kosmii M. Influence of hydrate formation and wall shear stress on the corrosion rate of industrial pipeline materials. *Koroze a Ochrana Materialu*. 2018. Vol. 62(4). P. 121-128. <https://doi.org/10.2478/kom-2018-0017>
26. NACE Standard RP0775-2005. Item No. 21017. Preparation and Installation of Corrosion Coupons and Interpretation of Test Data in Oilfield Operations. URL: [https://webstore.ansi.org/preview-pages/NACE/preview\\_NACE+Standard+RP0775-2005.pdf](https://webstore.ansi.org/preview-pages/NACE/preview_NACE+Standard+RP0775-2005.pdf) (дата звернення 15.06.2022)
27. Det Norske Veritas. Recommended Practice Dnv-Rp-J202. Design And Operation Of CO<sub>2</sub> Pipelines. 2010. Pp 1-42. URL: <https://www.ucl.ac.uk/cclp/pdf/RP-J202.pdf> (дата звернення 15.06.2022)
28. Professional'noye proizvodstvo avtotsistem Eurotank. URL: <http://eurotank.fi/wp-content/uploads/2019/08/Ven%C3%A4j%C3%A4-2019-Reis.pdf> (дата звернення 15.06.2022)
29. Europe's largest stock of used iso tankcontainers. URL: <https://pdf.directindustry.it/pdf-en/asco-carbon-dioxide/20-iso-tank-container/38377-966167.html> (дата звернення 15.06.2022)
30. Sudna dlya perevezennya dioksydu vuhletsyu. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Судна\\_для\\_перевезення\\_діоксиду\\_вуглецю](https://uk.wikipedia.org/wiki/Судна_для_перевезення_діоксиду_вуглецю) (дата звернення 15.06.2022)
31. Matkivskiyi S.V. Udoskonalennya tekhnolohiy rozrobky rodovyshch pryrodnykh haziv za vodonapirnoho rezhymu: dys. doktora filosofiyi. Ivano-Frankivsk, 2021. 156 s.
32. Zhdanov S.A., Maksimov M.M., Khavkin A.YA., Rybitskaya L.P., Tsybul'skaya OT., Gogonenkov G.N., Yevstifeyev V.I., Velichkina N.F., Yudin V.A. Proyektirovaniye razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy s ispol'zovaniyem postoyanno deystvuyushchikh geologo-tekhnologicheskikh modeley. *Neftyanoye khozyaystvo*. 1997. No 3. P. 43-47.
33. Matkivskiyi S.V. Teoretyko-metodolohichni osoblyvosti pobudovy postiyno diyuchykh heoloho-tekhnolohichnykh modeley rodovyshch vuhlevodniv. *Mineral'ni resursy Ukrayiny*. Kyiv, 2020. No 4. P. 39-44. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.4.39-44>
34. Alessandro Romi, Oleksandr Burachok, Mariana Laura Nistor, Charidimos Spyrou, Yerlan Seilov, Omon Djuraev, Serhii Matkivskiyi, Denys Grytsai, Olena Goryacheva, Roman Soyma. Advantage of Stochastic Facies Distribution Modeling for History Matching of Multi-stacked Highly-heterogeneous Field of Dnieper-Donetsk Basin. *Petroleum Geostatistics. Florence. Italy*. 2019. C.1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902188>
35. L.P. Dake. Fundamentals of Reservoir engineering. *Elsevier, Seventeenth Impression*. 1998. 443 p.
36. Matkivskiyi S., Burachok O. Impact of Reservoir Heterogeneity on the Control of Water Encroachment into Gas-Condensate Reservoirs during CO<sub>2</sub> Injection. *Management Systems in Production Engineering*. 2022. Vol. 30. Issue 1. Pp 62-68. <https://doi.org/10.2478/mspe-2022-0008>
37. Matkivskiyi S. Increasing hydrocarbon recovery of Hadiach field by means of CO<sub>2</sub> injection as a part of the decarbonization process of the energy sector in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits. Dnipro*. 2022. Volume 16. Issue 1. Pp. 114-120. <https://doi.org/10.33271/mining16.01.114>
38. Kondrat O., Matkivskiyi S. Research of the influence of the pattern arrangement of injection wells on the gas recovery factor when injecting carbon dioxide into reservoir. *Technology and system of power supply*. Kharkiv. 2020. №5/1 (55). C. 12-17. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.215074>
39. Kryvulya S., Matkivskiyi S., Kondrat O., Bikman Y. Approval of the technology of carbon dioxide injection into the V-16 water driven reservoir of the Hadiach field of the water pressure mode (Ukraine) under the conditions of the water pressure mode. *Technology and system of power supply*. Kharkiv. 2020. №6/1 (56). C. 13-18. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.217780>
40. Burachok O., Kondrat O., Matkivskiyi S. Investigation of the efficiency of gas condensate reservoirs waterflooding at different stages of development. *Global Trends, Challenges and Horizons*. Dnipro. 2020. P. 1-11. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123001010>