

© П.Б. Саїк¹, В.С. Фальштинський¹¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

УТИЛІЗАЦІЯ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ПРИ СВЕРДЛОВИННІЙ ПІДЗЕМНІЙ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

© P. Saik¹, V. Falshtynskyi¹¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

UTILIZATION OF CARBON DIOXIDE DURING BOREHOLE UNDERGROUND COAL GASIFICATION

Мета. Формування інноваційного підходу щодо утилізації діоксиду вуглецю при свердловинній підземній газифікації вугілля в умовах ДП «Львіввугілля».

Методика досліджень. Визначення параметрів порожнини розшарування в гірському масиві при газифікації вугільного пласта ґрунтувалось на основі проведення аналітичних досліджень. Основою даних досліджень слугував метод розрахунку напружено-деформованого стану гірських порід, реалізований у програмному забезпеченні “GeoDenamics Lite”. Застосування цього методу передбачає отримання геометричних і фізичних параметрів епюр навантажень для характерних породних шарів від вугільного пласта до земної поверхні. Вихідними даними для досліджень слугують гірничо-геологічні умови залягання вугільного пласта і технологічні параметри підземного газогенератора.

Результати дослідження. Аналіз геометричних і фізичних параметрів навантажень на породні шари підтверджує розширення зон аномального тиску в гірському масиві. Встановлено, що зміни цих параметрів відбуваються від самого пласта до денної поверхні як у напрямку до масиву, так і в бік вигазованого простору, у міру посування вогневого вибою. Такі динамічні зміни в структурі порід покрівлі сприяють формуванню порожнин розшарування, які можна використовувати як локалізації для ефективного захоронення вуглекислого газу.

Наукова новизна. Встановлено залежності зміни розмірів порожнин розшарування порочної товщі у покрівлі підземного газогенератора від швидкості посування вогневого вибою. Врахування даної залежності дозволяє спрогнозувати ступінь утилізації вуглекислого газу у техногенно створених порожнинах.

Практичне значення. Для умов шахти «Червоноградська» визначено параметри порожнин розшарування у гірському масиві на рівні пластів $n7^H$, $n7$ і $n7^6$ при газифікації вугільного пласта $n7^H$, що в подальшому дозволяє оцінити об’єми утилізації діоксиду вуглецю.

Ключові слова: підземна газифікація вугілля, діоксид вуглецю, гірський масив, вугільний пласт, порожнини розшарування.

Вступ. Свердловинна підземна газифікація вугілля – це контрольована технологія перетворення вугілля в підземних умовах у горючий (CH_4 , CO , H_2) та баластний генераторні гази (CO_2 , O_2 , N_2) [1, 2]. Потрібно зазначити, що для розширення і вдосконалення технології необхідно розглядати технологічні та технічні рішення, спрямовані не тільки на отримання висококалорійних горючих газів, а й на утилізацію баластних газів. Оскільки діоксид вуглецю (CO_2) є значним баластним газом і забруднювачем атмосфери, розширення та вдосконалення заходів щодо його керування та утилізації є критично важливим. При цьому,

враховуючи сучасні тенденції щодо збереження клімату, утилізація CO₂ набуває дедалі більшої важливості як інструмент досягнення глобальних цілей у скороченні вуглецевих викидів і боротьби з глобальним потеплінням [3–5]. Тому при впровадженні технології підземної газифікації вкрай важливим є її орієнтація на зниження та утилізацію вуглецевих викидів, що обумовлено Паризькою угодою, яка є важливим інструментарієм у глобальних зусиллях по боротьбі з кліматичними змінами. Водночас, необхідно зазначити, що вугілля, незважаючи на глобальні тенденції до зменшення викидів парникових газів і переходу до відновлюваних джерел енергії, на найближчу перспективу все ще залишається стабільним джерелом отримання енергії, особливо в регіонах, де альтернативні джерела або інфраструктура для їх використання недостатньо розвинені. Для багатьох країн вугілля є основою для генерації енергії через його доступність і великі запаси, що забезпечують енергетичну незалежність. Це особливо важливо для країн, які не мають значних запасів нафти чи газу. Тож розвиток і впровадження чистих вугільних технологій дають змогу зменшити вплив вугільної енергетики на довкілля.

Виділення невирішених проблем.

Впровадження технології підземної газифікації дає змогу ефективно проводити утилізацію діоксиду вуглецю у двох напрямках. Перший спрямований на утилізацію діоксиду вуглецю у складі дуттьової суміші [6, 7]. Інший напрям утилізації вуглецю передбачає його захоронення шляхом закачування в порожнини гірського масиву навколо підземного газогенератора. Даний спосіб досить добре зарекомендував при закачуванні CO₂ у виснажені нафтогазові поклади [8]. За першим способом проведено низку досліджень, що обґрунтовують параметри утилізації діоксиду вуглецю залежно від отриманого якісного складу горючих генераторних газів із подальшим зазначенням кількісних параметрів його утилізації. То для другого способу необхідно визначити раціональні місця закачування діоксиду вуглецю в гірський масив навколо підземного газогенератора. У рамках розширення та удосконалення технологій свердловинної підземної газифікації вугілля, особливу увагу необхідно приділити зменшенню викидів діоксиду вуглецю, який є одним із баластних газів. На прикладі газифікації пласта n_7^H шахти «Червоноградська» ДП «Львіввугілля» авторами роботи розглянуто впровадження інноваційного підходу, що передбачає визначення раціональних місць для закачування CO₂ у гірський масив навколо підземного газогенератора. Також необхідно зазначити, що протікання геомеханічних процесів у породній товщі, де проводять газифікацію вугільного пласта, потребують комплексної та якісної оцінки. На сьогодні існуючі методи розрахунку напружено-деформованого стану порід, не враховують особливості будови породного масиву та технологічні аспекти ведення робіт під час газифікації вугілля. Більшість методів розрахунку притаманна технологіям механічної руйнації гірського масиву і розв'язує окремі прикладні задачі з визначення параметрів конвергенції бічних порід, навантаження на механізоване кріплення, кроку посадки покрівлі тощо.

Отже, **метою даної роботи** є формування інноваційного підходу щодо утилізації діоксиду вуглецю при свердловинній підземній газифікації вугілля шахти

«Червоноградська» ДП «Львіввугілля». Для вирішення поставленої мети авторами роботи було розглянуто такі взаємопов'язані завдання:

- досліджено гірничо-геологічні умови залягання вугільних пластів шахти «Червоноградська» ДП «Львіввугілля»;
- проведено вибір методів дослідження і сформовано вихідні дані;
- досліджено геомеханічні процеси у гірському масиві навколо підземного газогенератора;
- обґрунтовано параметри порожнин розшарування у покрівлі підземного газогенератора для захоронення діоксиду вуглецю.

Методика проведення досліджень.

Характеристика об'єкта дослідження.

Об'єктом дослідження слугує гірський масив, що вміщує вугільні пласти n_9 , n_8^e , n_8 , n_7^e , n_7 та n_7^h пологого, близького до горизонтального з незначним нахилом на захід залягання. Кути падіння не перевищують 2–3°. Для прикладу авторами роботи наведено характеристику залягання вугільних пластів у межах шахтного поля шахти «Червоноградська». Шахта «Червоноградська» є одним із структурних підрозділів ДП «Львіввугілля». В геологічному відношенні шахтне поле розташоване в північній частині Межирічанського родовища Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну [9–11].

Характерним для вугільних пластів є невитриманість структури і потужності до неробочої, збільшення зольності до некондиційної. До найбільш витриманих за площею і потужністю відносять пласти n_8^e і n_7^e . Самим верхнім пластом на шахті є пласт n_9 «Тонкий-І», він має робочу потужність від 0,6 до 1,0 м, в середньому 0,75 м. Здебільшого пласт має дві вугільні пачки, розділені прошарком аргіліту, потужністю 0,1–0,15 м. Пласт n_8^e «Тонкий ІІІ» – залягає нижче пласта n_9 на 22–30 м. Виймальна потужність пласта змінюється від 0,6 до 1,38 м і в середньому на південному крилі становить 1,20–1,25 м, на північному – 0,9 м. Пласт має поширення і робочу потужність по всій площі шахтного поля і лише в північно-східній частині шахтного поля він некондиційний за зольністю. У більшості випадків пласт n_8^e двопачкової будови. Породний прошарок потужністю від 0,05 до 0,3 м.

Пласт n_8 «Межирічанський» залягає нижче пласта n_8^e на 11–13 м. Загальна робоча потужність становить 0,60–1,45 м. Він поширений майже на всій площі шахтного поля, за винятком невеликої ділянки на північному сході. У північній частині шахтного поля пласт має просту однопачкову будову. У більшості будова пласта складна: нижня гумусова пачка вугілля, із середньою потужністю 0,56 м, прошарком аргіліту потужністю 0,10–0,40 м, відділяється від верхньої високозольної пачки сапропеліту потужністю 0,40–0,90 м.

Пласт n_7^e «Західно-Бузький» розташований на 12–17 м нижче пласта n_8 , з кондиційною потужністю 0,70–0,90 м, поширений здебільшого в південній частині шахтного поля. У північній частині пласт зменшується до неробочого прошарку з потужністю 0,10–0,35 м або ж повністю фаціально заміщується. Будова пласта також змінна. На півдні в більшості простої однопачкової будови. У північному напрямку будова пласта ускладнюється і він розщеплюється на дві,

рідше 3–5 дрібних вугільних пачки, що призводить до значного забруднення вугілля глинистим матеріалом.

Пласт n_7 «Супутник» – найнижчий промисловий пласт на шахтному полі, він залягає на 4–9 м нижче пласта n_7^6 . Характеризується непостійністю потужності та будови. На значній площі в північній частині шахтного поля пласт відсутній. Промислове значення пласт має в південній частині шахтного поля, де з робочою потужністю 0,60–1,0 м поширений на значній площі. При цьому він характеризується складною будовою і, як правило, складається з 3–5 вугільних пачок, найбільш витриманою з яких є верхня. У південно-західній частині шахтного поля відзначено просту будову пласта.

Пласт n_7^H «Сокальський» є найнижчим пластом в басейні, характеризується невитриманістю по площі і на полі шахти «Червоноградська» є повністю розмитий. На шахті «Лісова» цей пласт характеризується потужністю від 1,3 до 1,63 м, а на шахті «Великомостівська» його потужність змінюється від 1,25 до 1,45 м. Балансові запаси пласта n_7^H , здебільшого, відпрацьовано. Залишилася незначна кількість запасів на окремих ділянках південного і північного крила, і біля виробок головних напрямків. Покрівля – аргіліт, подошва – алевроліт. Глибина залягання пласта коливається від 423 м у східній частині шахтного поля і до 482 м у західній частині шахтного поля.

Отже, для проведення подальших досліджень авторами роботи на основі аналізу гірничо-геологічних умов залягання вугільних пластів, було відтворено усереднену стратиграфічну колонку, яка характеризує умови залягання всіх пластів у межах шахтних полів ДП «Львіввугілля». Такий підхід є доцільним оскільки кожному структурному підрозділі даного підприємства в межах шахтних полів є своє як спільні, так і відмінні риси щодо залягання вугільних пластів.

Методи проведення досліджень

Поставлену задачу з дослідження геомеханічних процесів у гірському масиві та формування порожнин розшарування в покрівлі підземного газогенератора розв'язували шляхом створення фізичної та математичної моделі, що враховує виникнення техногенної тріщинуватості породного масиву під дією тиску та дії високих температур з урахуванням гірничо-геологічних умов залягання вугільного пласта, який газифікується, і конструктивних особливостей підземного газогенератора. Для визначення геомеханічних параметрів розшарувань породного масиву на ділянці підземного газогенератора було застосовано метод розрахунку напружено-деформованого стану порід, алгоритм якого закладено в програмному забезпеченні “GeoDynamics Lite”.

Основними показниками для виконання аналітичних досліджень є гірничо-геологічні дані стратиграфічного перерізу свердловин і технологічні параметри ведення процесу підземної газифікації вугілля. Породо-вугільну товщу навколо підземного газогенератора поділяють на породні шари згідно з літологічною різницею з нумерацією шарів від вугільного пласта, який газифікується, до денної поверхні. Виконання розрахунку параметрів розшарування породо-вугільної товщі відбувається у два етапи. На першому етапі досліджень визначаються геометричні параметри епюр навантажень ($a, d_0, f_1, f_2, l_{np}, l_p$) для характерних породних шарів від вугільного пласта, що газифікується, до поверхні. Граничними

умовами в цьому випадку є величини вільних опускань породного шару, за яких над вигазованим простором газогенератора спостерігається відсутність реакції, а на опорну зону тиску передається маса від подробленого породного масиву. Згідно з розрахунком, визначають граничний проліт породних шарів, при цьому максимальні опускання відповідають заданим, а геометричні параметри відповідають встановленим параметрам.

При підземній газифікації вугілля породи безпосередньої покрівлі над вогневым вибоєм підземного газогенератора знаходяться під впливом високих температур. Величина температури газифікації вугільного пласта змінюється по довжині реакційного каналу. Максимум температур у 1100–1300 °С спостерігається на межі переходу окислювальної зони у відновлювальну. Тому породи над вогневым вибоєм піддаються різним термонавантаженням. Така сама ситуація спостерігається у вигазованому просторі [12, 13].

У низці робіт, присвячених пружним властивостям гірських порід під час впливу високих температур, на лабораторних і стендових дослідженнях встановлено зміну густини гірських порід під впливом високотемпературного прогріву [14–16]. У результаті досліджень встановлено збільшення об'єму порід на 5–28% від початкового. Внаслідок термодинамічних навантажень, під час впливу на породи покрівлі високих температур, модуль пружності E порід буде змінюватися за лінійним законом. У подальших розрахунках напружено-деформованого стану нижньої породної пачки безпосередньої покрівлі слід враховувати зміни модуля пружності під дією температур. Коефіцієнт пружності змінюватиметься з урахуванням коефіцієнта температурного впливу $k_t = 1,05–1,28$.

Під час визначення фізичних параметрів епюр навантажень розрахунок ведеться від поверхні до вугільного пласта, що газифікується. При цьому граничні умови обумовлюються максимальними величинами опускань породних шарів. Для спрощення завдання у подробленому гірському масиві виділяються породні шари, в основі яких закладено більш тверді «жорсткі» шари, що впливають на параметри зсуву. Далі визначаються параметри розподілу реакцій і нормальних навантажень у пачці породних шарів і обчислюються коефіцієнти (B_1, B_2, B_3), які залежать від параметрів епюр навантажень. Стан порід визначається за головними напруженнями (G_1G_2) і за критерієм опору порід на одновісний стиск (SPR). Умови руйнування породи покрівлі від згинального моменту в породному шарі виникають напруження на відрив перпендикулярно нашаруванню. Згідно з прийнятою фізичною моделлю та розрахунковою схемою, визначаються напруження в різних перерізах породного шару, поперечні сили Q_x та згинальний момент M_x . За деформаціями порід через горизонтальні переміщення N_x , визначається утворення вертикальних тріщин і опускання породних шарів y_x подробленого гірського масиву [17].

У програмному забезпеченні передбачено блок, що здійснює перевірку породних шарів на розшарування. Дотичні та відривні напруження в породних шарах, спричинені поперечними силами Q , згинальним моментом і власною вагою порід, є критеріями перевірки. Розшарування породного шару відбуватиметься за умов: якщо міцність порід на відрив перпендикулярна нашаруванню ($G_{від.} > R_{від.}$), або міцність порід на сколювання паралельна нашаруванню ($\tau_{зг.} > R_{ск.}$). Розрахунком у заданих перерізах встановлюються місця розшарування порід, потужність пачки,

що відшаровується, і кількість породних шарів після розшарування [18]. При визначенні областей і параметрів формування порожнин розшарування у надвугільній товщі під час газифікації вугільного пласта, для розрахунків напружено-деформованого стану породо-вугільного масиву, використовували усереднені дані стратиграфічного перерізу в умовах ДП «Львіввугілля». Породо-вугільний масив поділяється на шари за літологічною різницею та потужністю. За відсутності порід-мостів великої потужності поділ на породні шари здійснюють від вугільного пласта (що газифікується) до денної поверхні, за наявності в товщі порід-мостів – від пласта до жорсткого шару. Підготовлені вихідні дані для виконання аналітичних досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Дані для аналітичних досліджень формування областей та параметрів розшарування порід під час газифікації вугільного пласта n_7^H

№ шарів	H , м	h , м	$h_{ш.}$, м	Тип порід	Дані загального призначення
1	410	406	4	2	$\gamma = 1,29 \text{ т/м}^3$; $m = 1,4 \text{ м}$; $V = 0,5; 1,0; 1,5$; $2,0 \text{ м/добу}$; $\alpha = 0,09$; $L = 15,28 \text{ м}$; $T = 56 - 180 - 285 \text{ діб}$; Граничні опускання покрівлі $Y_0 = 1,01 \text{ мм}$; $d_2 = 1257$; $K_2 = 1,6 \cdot 10^6 \text{ т/м}^2$; $d_3 = 746$; $K_3 = 1,49 \cdot 10^6 \text{ т/м}^2$; Вологість порід $W = 24\%$; $\nabla = 0,7$; Кількість жорстких шарів – 4 (№ – 3; 5; 8; 10).
2	406	398	8	1	
3	398	391	7	3	
4	391	386	5	2	
5	386	376	10	1	
6	376	346	30	3	
7	346	291	55	2	
8	291	244	47	1	
9	244	163	83	3	
10	163	88	75	2	
11	88	0	88	3	

де № шару – порядковий номер породного шару, що формує породну товщу знизу до денної поверхні над підземним газогенератором; H і h – відстані від поверхні до підшви та покрівлі, м; $h_{ш.}$ – потужність шару, м; γ – середня густина породних шарів, т/м^3 ; m – потужність пласта, що газифікується, м; V – швидкість посування вогневого вибою, м/добу; α – кут падіння пласта в радіанах; LL – відстань від перерізу до межі вогневого вибою, м; T – час, що минув від моменту ведення робіт із газифікації пласта, діб; Y_0 – граничні опускання покрівлі, мм; d_2 , K_2 , d_3 , K_3 – модуль деформацій для кожної літологічної різниці, т/м^2 ; W – вологість порід, %; Δ – коефіцієнт тертя; № – кількість «жорстких» породних шарів, що зумовлюють процес зміщення в породному масиві, шт.

Схему підготовки вихідних даних, прийняту за основу відповідно до стратиграфічного перерізу породної товщі експериментальної ділянки шахтного поля наведено на рис. 1.

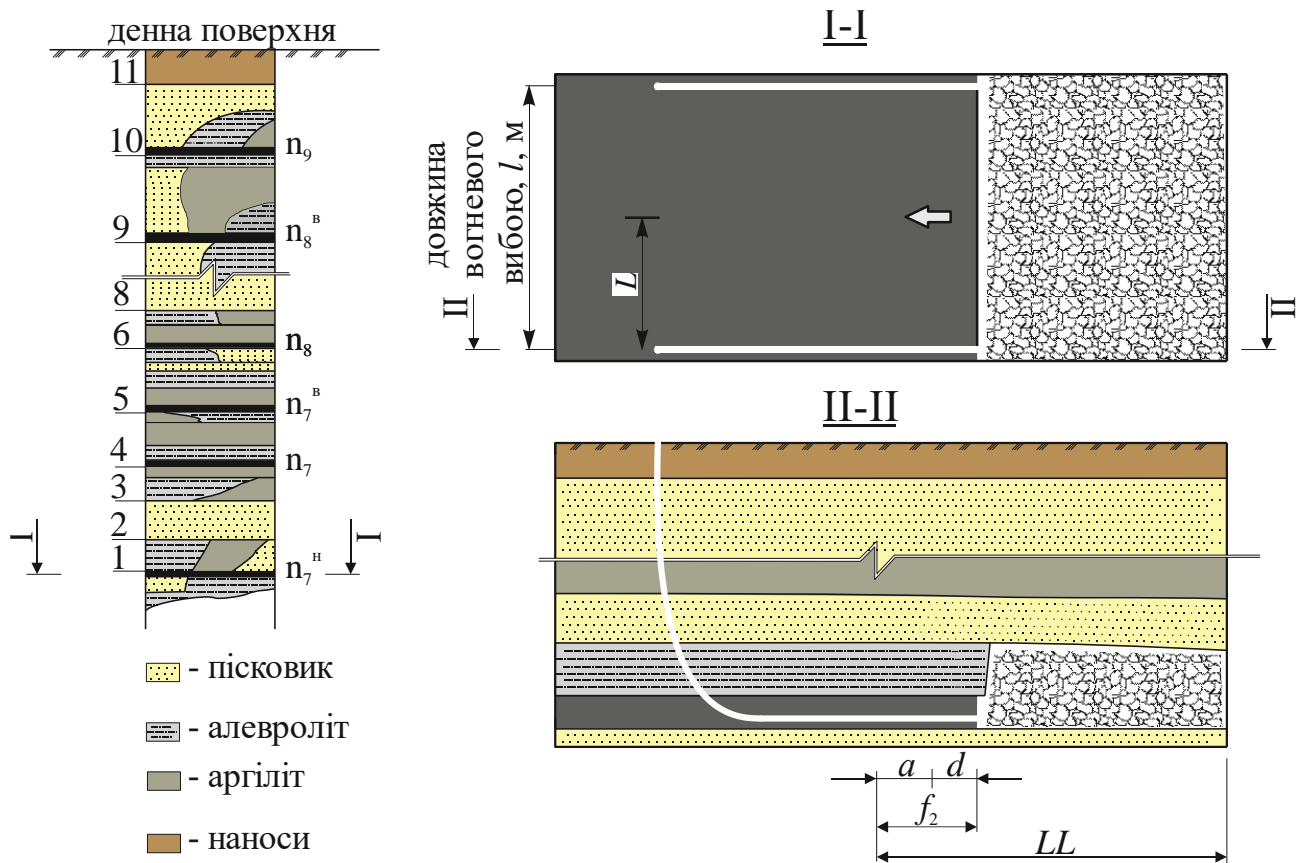


Рис. 1. Схема підготовки вихідних даних для проведення аналітичних досліджень формування областей і параметрів порожнин розшарування в породному масиві під час газифікації вугільного пласта n_7^H за стратиграфічним перерізом

Результати досліджень. На основі проведеного розрахунку в середовищі “GeoDenamics Lite” встановлено геометричні та фізичні параметри епюр навантажень на шари порід покрівлі з урахуванням гірничо-геологічних умов і технологічних параметрів газифікації вугільного пласта n_7^H шахти «Червоноградська». Розподіл навантажень на шари порід над газогенератором під час газифікації вугільного пласта n_7^H наведено на рис. 2.

Аналізуючи геометричні та фізичні параметри навантажень на шари порід, слід відзначити факт розширення зон аномального тиску в гірському масиві, що вміщує пласт n_7^H . Характер зміни зазначених параметрів відбувається від пласта до денної поверхні по нормалі як у бік масиву, так і в бік виробленого простору в міру просування очисного вибою. При вигазовуванні вугільного пласта n_7^H із середньою швидкістю посування вогневого вибою 1,5 м/добу, опорна зона тиску на рівні пласта n_7 формується на відстані $l = 2,2$ м від вибою газогенератора до межі формування порожнини розшарування над вигазованим простором підземного газогенератора в породо-вугільній товщі (рис. 2).

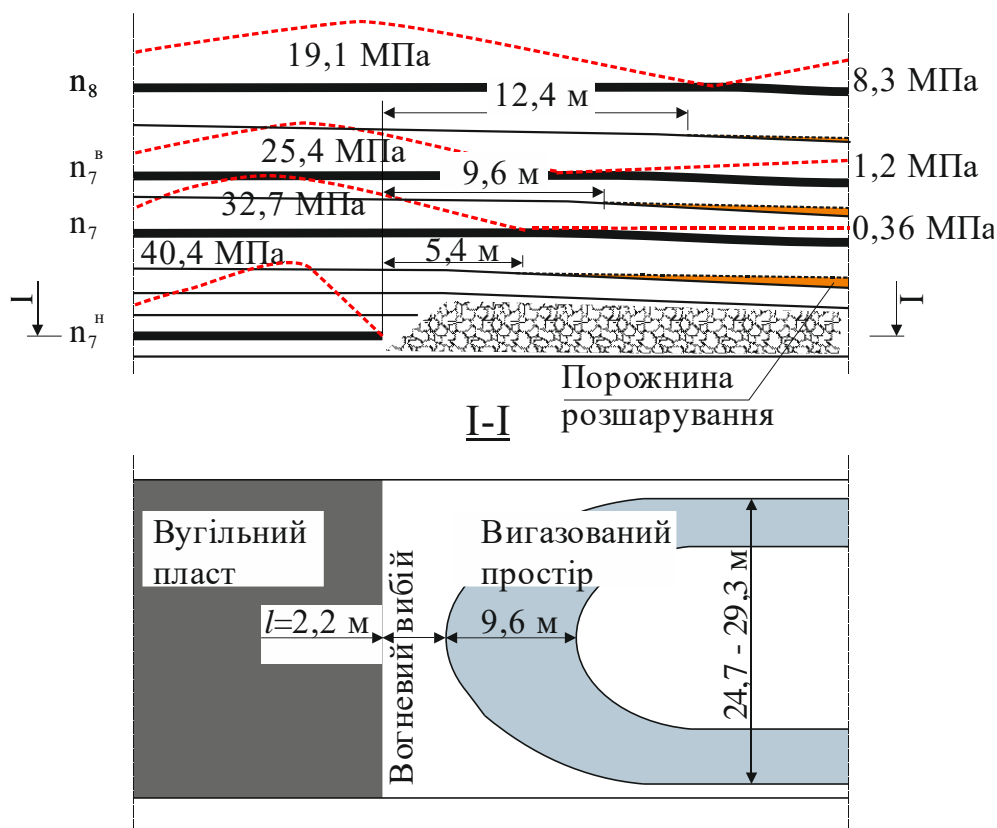


Рис. 2. Розподіл навантажень на шари порід над газогенератором під час газифікації вугільного пласта n_7^H експериментальної ділянки шахти «Червоноградська»

Аналізуючи дані рис. 2, необхідно зазначити, що порожнини розшарування над вигазованим простором газогенератора в міру посування вогневого вибою формуються на відстані 5,4–6,8 м від пласта n_7^H по нормалі, 9,6–11,5 м на рівні пласта n_7 , пласта n_7^B – 12,4–12,8 м по нормалі до поверхні.

У табл. 2 наведено дані щодо зміни об’ємів порожнин розшарування породої товщі від швидкості посування вогневого вибою на рівні вугільних пластів n_7 , n_7^B і n_8 за довжини реакційного каналу 30 м.

Таблиця 2

Параметри порожнин розшарування при газифікації вугільного пласта n_7^H

Довжина вогневого вибою, м	Швидкість посування вогневого вибою, м/добу											
	0,5			1,0			1,5			2,0		
	h_{\max} , мм	$V_p \max$, м ³	$V_p \min$, м ³	h_{\max} , мм	$V_p \max$, м ³	$V_p \min$, м ³	h_{\max} , мм	$V_p \max$, м ³	$V_p \min$, м ³	h_{\max} , мм	$V_p \max$, м ³	$V_p \min$, м ³
30	Параметри порожнини розшарування на рівні пласта n_7^H											
	972	987	710	995	942	686	1004	845	586	1039	784	487
	Параметри порожнини розшарування на рівні пласта n_7											
	826	928	506	898	817	483	895	722	512	921	686	404
Параметри порожнини розшарування на рівні пласта n_7^B												
602	780	392	776	694	378	788	612	458	858	579	351	

Порожнина розшарування найбільшої висоти формується на рівні пласта n_7^H між породним «жорстким» шаром 3 і шаром 2 – основною покрівлею вугільного пласта n_7^H , що розробляється (див. рис. 2). Виникнення порожнини в цих умовах пов'язане з різницею в міцності порід гірського масиву, потужністю порідних шарів, слабкими зонами зчеплення шарів породи з вугільним пластом, близькістю робіт із газифікації пласта та швидкістю посування вогневого вибою, що обумовлює різницю у швидкостях зсуву порідних шарів.

Відповідно до наведених даних (див. табл. 2) розміри максимальних порожнин розшарування порід покрівлі підземного газогенератора характеризуються логарифмічними залежностями наведеними на рис. 3.

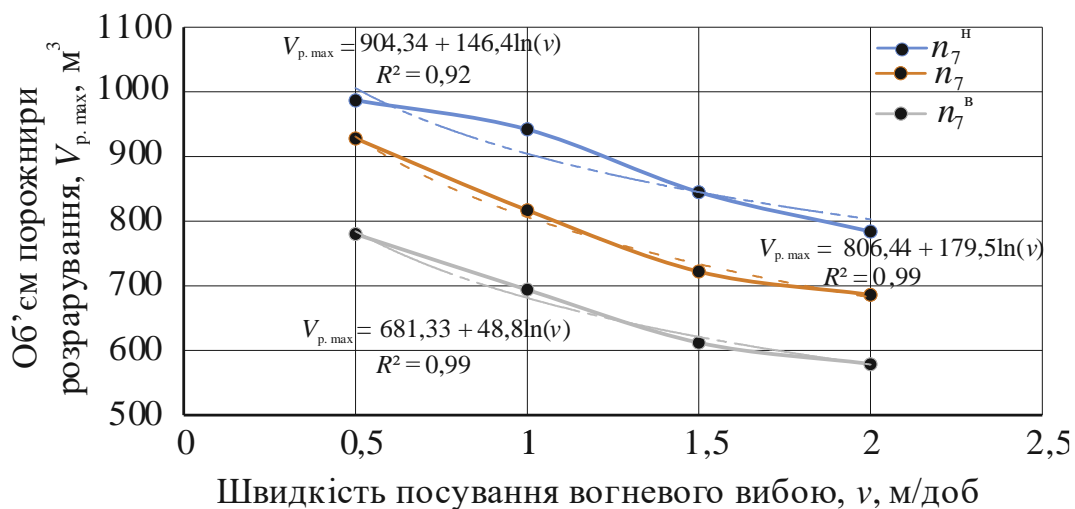


Рис. 3. Залежності зміни порожнин розшарування від швидкості посування вогневого вибою

На основі аналізу наведених даних на рис. 3, зазначено, що показник апроксимації для залежності зміни порожнини розшарування на рівні пласта n_7^H становить 0,92, а на рівні пластів n_7 та n_7^B – 0,99. Такий характер зазначеної залежності обумовлюється різкою зміною гірничо-геологічних умов, а саме із заляганням потужного шару пісковику у покрівлі пласта n_7^H .

Динаміка формування виробленого простору підземного газогенератора визначає швидкість і параметри утворення порожнин розшарування. Так, при посуванні вогневого вибою газогенератора збільшуються параметри виробленого простору, що призводить до закриття порожнин розшарування. Після закінчення робіт із газифікації вугільного пласта n_7^H за довжини стовпа газифікації 500 м висота порожнини на рівні пласта n_7 не перевищує в середньому $h_{n.p.} = 235$ мм, а об'єм порожнини у середньому становитиме $V_{n.p.} = 876$ м³. Залежно від технологічних параметрів газифікації вугільного пласта параметри порожнин розшарування породо-вугільного масиву над підземним газогенератором змінюються за лінійною залежністю в діапазонах: висота порожнин $h_{n.p.} = 210$ – 274 мм, об'єм порожнин $V_{n.p.} = 487$ – 902 м³. Збільшення швидкості посування вогневого вибою газогенератора призводить до зростання висоти розшарування порожнини над

вигазованим простором, а ширина її зменшується під впливом зсуву меж опорної зони в бік виробленого простору.

Таким чином, зазначені дослідження є підґрунтям для подальшого детального аналізу й оцінки можливостей з утилізації діоксиду вуглецю на базі технології свердловинної підземної газифікації вугілля, де порожнини, що утворюються внаслідок розшарування гірського масиву, розглядаються як потенційні місця для безпечного захоронення вуглекислого газу.

Висновки. Процес свердловинної підземної газифікації вугілля з супутньою утилізацією CO₂ є актуальним через свій потенціал зменшення викидів парникових газів і підвищення енергетичної ефективності технологій газифікації та утилізації. На сьогодні ці технології відповідають сучасним екологічним вимогам і стандартам, що робить їхній розвиток важливим для економічного прогресу та збереження навколишнього середовища.

За результатами проведених досліджень оцінено геомеханічну ситуацію гірського масиву навколо підземного газогенератора зі встановленням відповідних геометричних і фізичних параметрів навантажень на шари гірського масиву. Встановлено залежності зміни об'ємів порожнин розшарування породної товщі від швидкості посування вогневого вибою на рівні вугільних пластів n_7^H , n_7 і n_7^6 , що можуть бути потенційними місцями для безпечного захоронення вуглекислого газу. Визначено, що об'єм порожнини розшарування гірського масиву зменшується зі збільшенням швидкості просування вогневого вибою. Наприклад, за швидкості посування вогневого вибою у 2 м/добу максимальний об'єм порожнини розшарування на рівні пласта n_7 становить 921 м³, що на 21% менше порівняно зі швидкістю посування у 0,5 м/добу.

Вдячність. Представлені результати отримано в рамках виконання науково-дослідної роботи ГП-516 «Науково-практичні засади технології газифікації низькосортного вугілля» (проект №0123U101757) за підтримки Міністерства освіти і науки України.

Перелік посилань

1. Zhen, D. O. N. G., Yanpeng, C. H. E. N., Lingfeng, K. O. N. G., Feng, W. A. N. G., Hao, C. H. E. N., Junjie, X. U. E., ... & Xinggang, W. A. N. G. (2024). Underground coal gasification: Overview of field tests and suggestions for industrialization. *Coal Geology & Exploration*, 52(2), 180–196.
2. Saik, P., Lozynskyi, V., Anisimov, O., Akimov, O., Kozhantov, A., & Mamaykin, O. (2023). Managing the process of underground coal gasification. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 25–30. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/025>
3. Abbasi, K. R., Zhang, Q., Alotaibi, B. S., Abuhussain, M. A., & Alvarado, R. (2024). Toward sustainable development goals 7 and 13: A comprehensive policy framework to combat climate change. *Environmental Impact Assessment Review*, 105, 107415. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107415>
4. Aldy, J. E., & Halem, Z. (2022). The Evolving Role of Greenhouse Gas Emission Offsets in Combating Climate Change. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4203782>
5. Viazovyyk, V., Pochynok, V., & Shynkarenko, D. (2021). Classification of carbon dioxide utilization technologies in the conditions of a closed cycle economy. *Вісник Черкаського Державного Технологічного Університету*, 82–107. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.227052>

6. Chen, H., Qin, Y., Chen, Y., Dong, Z., Xue, J., Chen, S., Zhang, M., & Zhao, Y. (2023). Quantitative Evaluation of Underground Coal Gasification Based on a CO₂ Gasification Agent. *Energies*, 16(19), 6993. <https://doi.org/10.3390/en16196993>
7. Duan, T.-H., Lu, C.-P., Xiong, S., Fu, Z.-B., & Chen, Y.-Z. (2016). Pyrolysis and gasification modelling of underground coal gasification and the optimisation of CO₂ as a gasification agent. *Fuel*, 183, 557–567. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.118>
8. Матківський, С.В. (2022). Узагальнення основних досліджень з уловлювання та зберігання діоксиду вуглецю в рамках декарбонізації енергетичного сектору України. *Oil and Gas Power Engineering*, 2(38), 35–50. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2\(38\)-35-50](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2(38)-35-50)
9. Lozynskiy, V., Dychkovskiy, R., Saik, P., & Falshtynskiy, V. (2018). Coal Seam Gasification in Faulting Zones (Heat and Mass Balance Study). *Solid State Phenomena*, (277), 66–79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.66>
10. Dychkovskiy, R.O., Lozynskiy, V.H., Saik, P.B., Petlovanyi, M.V., Malanchuk, Ye.Z., & Malanchuk, Z.R. (2018). Modeling of the disjunctive geological fault influence on the exploitation wells stability during underground coal gasification. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(4), 1183–1197. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.01.012>
11. Lozynskiy, V.H. (2015). Metodyka vyznachennia dotsilnosti zastosuvannya tekhnolohii sverdlovyynnoi pidzemnoi hazyfikatsii vuhillia na osnovi rozrakhunku koefitsiienta ekonomichnoi efektyvnosti. *Zbirnyk naukovykh prats NHU*, (48), 52–61.
12. Falshtynskiy, V., Saik, P., Dychkovskiy, R., Lozynskiy, V., & Demydov, M. (2022). Aspects for implementing the cumulative energy systems during underground coal gasification. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 69, 94–104. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.094>
13. Su, F., Zhang, T., Wu, J., Deng, Q., Hamanaka, A., Yu, Y., Dai, M., He, X., & Yang, J. (2022). Energy recovery evaluation and temperature field research of underground coal gasification under different oxygen concentrations. *Fuel*, 329, 125389. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125389>
14. Qin, Y., Xu, N., Chen, W., & Wu, L. (2023). Experimental Study on the Effect of High Temperature on the Physical and Mechanical Properties of Sandstone with Different Bedding Angles. *Applied Sciences*, 13(24), 13199. <https://doi.org/10.3390/app132413199>
15. Guo, J., Lei, Y., Yang, Y., Cheng, P., Wang, Z., & Wu, S. (2023). Effects of High Temperature Treatments on Strength and Failure Behavior of Sandstone under Dynamic Impact Loads. *Sustainability*, 15(1), 794. <https://doi.org/10.3390/su15010794>
16. Дичковський, Р. О., Табаченко, М. М., & Фальштинський, В. С. (2015). Зміни гірського масиву при фізико-хімічних геотехнологіях газифікації вугілля. НГУ. <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/146927>
17. Shavarskiy, I., Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., Akimov, O., Sala, D., & Buketov, V. (2022). Management of the longwall face advance on the stress-strain state of rock mass. *Mining of Mineral Deposits*, 16(3), 78–85. <https://doi.org/10.33271/mining16.03.078>
18. Savostianov, O.V. (2016). *Metody prohnozu heomekhanichnykh protsesiv dlia vyboru tekhnolohichnykh parametriv vidpratsiuvannya polohykh plastiv*. Dnipro, Ukraina: NMU.

ABSTRACT

Purpose. To develop an innovative approach for carbon dioxide utilization during the borehole underground gasification of coal at the SE “Lvivvuhillia”.

Methods. The determination of stratification cavity parameters in the rock mass during underground coal gasification was based on analytical studies. These studies employed the method of stress-strain state calculation of rock layers implemented in the “GeoDynamics Lite” software. This method involves obtaining geometric and physical distribution parameters for characteristic rock layers from the coal seam to the surface. Input data for the research included data on the geological and mining conditions of coal seams and the technological parameters of the mining operations.

Findings. Analysis of the rock layers' geometric and physical load parameters confirmed the expansion of abnormal pressure zones in the rock mass. It was established that these parameters change from the coal seam to the surface, both toward the rock mass and in the direction of the gasified cavity as the combustion face advances. These dynamic changes in the roof structure promote the formation of stratification cavities, which can be used as localized sites for efficient carbon dioxide sequestration.

Originality. The dependencies of changes in the dimensions of stratification cavities in the rocks of roof above an underground gasifier on the rate of combustible face advance have been established. Taking this dependency into account allows for predicting the degree of carbon dioxide utilization in technologically created cavities.

Practical implications. For the Chervonohrad mine, the parameters of stratification cavities within the rock mass at seams n_7^n , n_7 and n_7^v levels during the gasification of seam n_7^n were determined. These findings allow for the assessment of carbon dioxide utilization volumes in the future.

Keywords: *underground coal gasification, carbon dioxide, rock mass, coal seam, stratification cavities.*