

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИГАЗОВАНОГО ПРОСТОРУ ПІДЗЕМНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

P. Saik¹ <https://orcid.org/0000-0001-7758-1083>¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

JUSTIFICATION OF GOAF PARAMETERS IN AN UNDERGROUND GASIFIER

Мета роботи полягає у встановленні залежностей формування та зміни площі вигазованого простору підземного газогенератора в просторі й часі залежно від тривалості процесу газифікації та потужності вугільного пласта.

Методика досліджень полягала на лабораторному моделюванні процесу підземної газифікації вугілля з відтворенням посування фронту вогневого вибою та деформацій порід покрівлі підземного газогенератора. У процесі досліджень визначали швидкість переміщення вогневого вибою, параметри опускання порід покрівлі за допомогою реперних датчиків, а також склад і концентрацію генераторного газу. Геометричні параметри вигазованого простору встановлювали шляхом графічної візуалізації його контурів у різні моменти часу з подальшим розрахунком площі методом трапецій.

Результати дослідження. Встановлено залежності площі вигазованого простору підземного газогенератора в часі залежно від тривалості процесу газифікації та потужності вугільного пласта. Запропоновано методику розрахунку площі вигазованого простору підземного газогенератора. Показано, що динаміка росту вигазованого простору має нелінійний, переважно експоненціальний характер і визначається швидкістю посування вогневого вибою за зонами хімічних реакцій. Виявлено взаємозв'язок між розширенням вигазованого простору та тиском подачі дуттьової суміші на стабільність процесу газифікації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у встановленні залежностей зміни площі вигазованого простору підземного газогенератора залежно від тривалості процесу газифікації та потужності вугільного пласта з урахуванням просторового розподілу зон хімічних реакцій. Вперше показано, що формування вигазованого простору має неоднорідний характер і визначається різною інтенсивністю зон хімічних реакцій, що змінюються вздовж реакційного каналу підземного газогенератора.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для прогнозування параметрів вигазованого простору підземного газогенератора для керування процесом підземної газифікації вугілля. Встановлені залежності можуть бути застосовані для обґрунтування режимів подачі дуттьових сумішей, підвищення стабільності роботи підземного газогенератора та зменшення ризиків неконтрольованого обвалення порід. Отримані результати доцільно використовувати при розробці технологічних схем і математичних моделей підземної газифікації в реальних гірничо-геологічних умовах.

Ключові слова: підземна газифікація, підземний газогенератор, вигазований простір, вугільний пласт.

Вступ. Підземна газифікація вугілля є перспективною технологією, що забезпечує перетворення твердого палива безпосередньо в надрах землі з одночасним зменшенням негативного впливу на довкілля та підвищенням ефективності використання ресурсів. Ефективність, стабільність і безпека цього процесу значною мірою визначаються параметрами підземного газогенератора, у межах якого протікають складні взаємопов'язані теплові, фізико-хімічні та газодинамічні процеси в гірському масиві. Однією з основних характеристик роботи підземного газогенератора є процес формування вигазованого простору, що безпосередньо впливає на інтенсивність реакцій газифікації, умови тепло- і масообміну та фільтраційні характеристики гірського масиву [1, 2]. При цьому динаміка вигазованого простору має нелінійний характер і зумовлюється сукупною дією гірничо-геологічних умов, фізико-хімічних властивостей вугілля, складу дуттьових сумішей, режимів подачі реагентів та термодинамічних параметрів процесу [3–5].

Сьогодні незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених підземній газифікації вугілля, питання системного дослідження динаміки вигазованого простору залишаються недостатньо вивченими. Більшість наявних підходів зосереджуються на окремих аспектах процесу, а саме на узагальнених характеристиках росту вигазованого простору [6, 7], без формування єдиної методичної основи аналізу їх часової взаємодії та збільшення залежно від зон хімічних реакцій у підземному газогенераторі [8, 9]. Так, у роботі [10] обґрунтовано параметри формування порожнин розшарування в породах покрівлі при підземній газифікації вугілля та встановлено їх залежність від довжини реакційного каналу. При цьому у зазначеному підході не враховано просторове розташування зон хімічних реакцій уздовж реакційного каналу, що обмежує можливості комплексного аналізу динаміки вигазованого простору. В роботі [11] встановлено закономірності формування вигазованого простору підземного газогенератора під час газифікації вугілля через вертикальні свердловини. У той же час наведені параметри вигазованого простору характеризують переважно завершальну стадію процесу, а саме затухання гірничих робіт з газифікації, що обмежує можливості аналізу його на активній стадії процесу. Авторами роботи [12] доведено, що параметри вигазованого простору (форма, розміри та просторове положення активних зон) тісно пов'язані з режимами керування процесом газифікації. Це обґрунтовує необхідність прогнозування геометрії вигазованого простору на основі температурних і технологічних параметрів як передумови для підвищення керованості та енергоефективності підземного газогенератора.

У зв'язку з цим актуальним науково-практичним завданням є дослідження динаміки вигазованого простору підземного газогенератора, що забезпечують комплексний підхід до аналізу змін його параметрів у часі та створюють передумови для підвищення керованості й прогнозованості процесу підземної газифікації.

Метою роботи встановлення залежностей формування та зміни площі вигазованого простору підземного газогенератора в просторі й часі залежно від тривалості процесу газифікації та потужності вугільного пласта.

Вирішення поставленої мети передбачало розв'язання наступних завдань:

1. Запропонувати методику розрахунку площі вигазованого простору підземного газогенератора.

2. Встановити залежності зміни вигазованого простору підземного газогенератора від тривалості процесу газифікації та потужності вугільного пласта.

Методика проведення досліджень. Розміри вигазованого простору підземного газогенератора визначаються швидкістю просування вогневого вибою, яка є змінною величиною та залежить від зон протікання хімічних реакцій. У ході дослідження процесу підземної газифікації вугілля було визначено параметри переміщення вогневого вибою залежно від тривалості газифікації, параметри опускання порід покрівлі підземного газогенератора, а також концентрацію горючих газів (CO , H_2 , CH_4) у генераторному газі.

Параметри опускання встановлювалися на основі вимірювань переміщень закладених реперних датчиків, розміщених у змодельованій безпосередній покрівлі підземного газогенератора у лабораторних умовах. Застосування зазначених датчиків забезпечило можливість точного відстеження деформацій порід та аналізу накопичених лабораторних даних у режимі реального часу. Відповідно до отриманих даних щодо максимальних значень опускань порід покрівлі за визначений часовий інтервал проводилась детальна графічна візуалізація вигазованого простору, що відображала динаміку зміни фронту просування вогневого вибою. Це дозволяє визначити зони можливого обвалення порід для оцінки структурних змін покрівлі підземного газогенератора в режимі реального часу. На рис. 1 наведено приклад схеми, що характеризує просування фронту вогневого вибою та процес формування вигазованого простору.

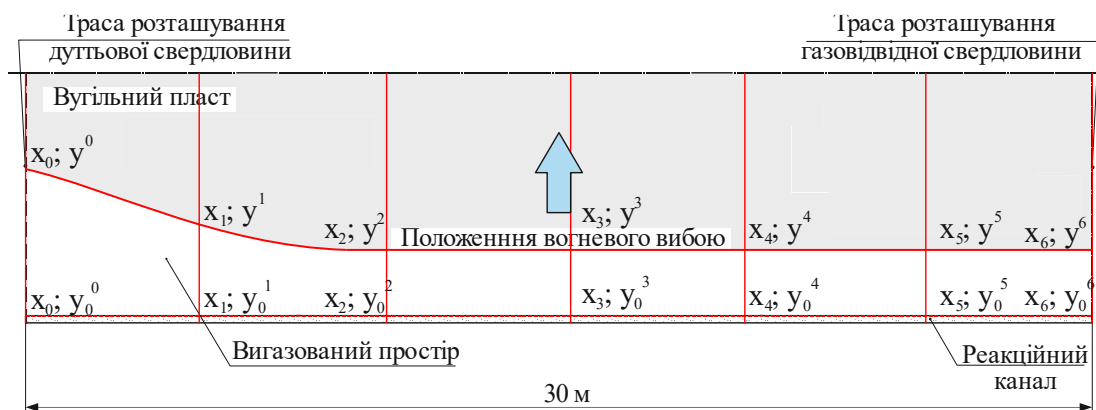


Рис. 1. Принципова схема просування фронту вогневого вибою та формування вигазованого простору

Відповідно до отриманих даних (див. рис. 1) щодо положення вогневого вибою ($x_0, y^0; \dots; x_6, y^6$) та положення реакційного каналу ($x_0, y_0^0; \dots; x_6, y_0^6$) визначається площа вигазованого простору підземного газогенератора та обвалених порід. У процесі підземної газифікації вугілля в межах вигазованого простору доцільно виокремлювати три основні зони, кожна з яких характеризується як спільними, так і відмінними властивостями, що визначають особливості перебігу процесу газифікації. Перша зона – зона вогневого вибою (S_v), що формується

безпосередньо біля вогневого вибою і розповсюджується в сторону вигазованого простору. Зона залежить від швидкості посування вибою та кроку обвалення порід. Вона є найбільш активною та критичною для контролю процесу газифікації, оскільки саме тут проходять основні хімічні реакції перетворення вугілля на генераторний газ. Друга зона – зона обвалення порід ($S_{об}$), яка охоплює області, де породи стають нестабільними і можуть обвалюватися, потенційно змінюючи геометрію газогенератора. Третя зона – величина вигазованого простору ΣS , що охоплює весь об'єм, де відбувається процес газифікації вугілля. Для оптимізації параметрів подачі дуттєвої суміші важливими є знання про величину зони S_g , що визначається за формулою:

$$S_g = \Sigma S - S_{об}, \text{ м}^2$$

Границями зміни ΣS є положення вогневого вибою, його довжина та положення реакційного каналу. Розглядаючи дані параметри в системі координат, маємо: x – місця розташування реперних датчиків за довжиною вогневого вибою (30 м, крок 5 м); y – положення вогневого вибою за стовпом газифікації, що змінюється з часом та залежить від зони хімічних реакцій за довжиною вогневого вибою; y_0 – положення реакційного каналу. Відповідно до зазначених координат площу вигазованого простору можна визначити шляхом застосування методу трапецій. Для прикладу наведемо визначення площі зони (ΣS).

Площа між координатами $(x_0; y^0)$ та $(x_1; y^1)$:

$$S_{x_0-x_1} = \frac{(y^0 + y^1)(x_1 - x_0)}{2}, \text{ м}^2;$$

- площа між координатами $(x_1; y^1)$ та $(x_2; y^2)$:

$$S_{x_1-x_2} = \frac{(y^1 + y^2)(x_2 - x_1)}{2}, \text{ м}^2;$$

....., м^2 ;

- площа між координатами $(x_5; y^5)$ та $(x_6; y^6)$:

$$S_{x_5-x_6} = \frac{(y^5 + y^6)(x_6 - x_5)}{2}, \text{ м}^2.$$

$$\Sigma S = S_{x_0-x_1} + S_{x_1-x_2} + \dots + S_{x_5-x_6}, \text{ м}^2.$$

Параметри зони $S_{об}$ визначаються за аналогічною схемою розрахунку.

Основна частина. Відповідно до отриманих даних, за кожною серією досліджень було не тільки проведено графічну візуалізацію зміни фронту посування вогневого вибою, а й детально проаналізовано параметри формування вигазованого простору в часі. Це стосувалось вивчення динаміки змін температури, тиску та концентрації газів на різних етапах газифікації. Загалом було побудовано 216 графічних представлень динаміки процесу, що дають змогу за допомогою методу трапецій точно визначати площу вигазованого простору від часу обвалення порід покрівлі. Аналізуючи секційні перерізи вигазованого простору визначаються тим

самим точні його параметри. Аналіз наведених даних (див. рис. 2а) вказує, що на 6 год газифікації площа вигазованого простору становить $12,6 \text{ м}^2$ з урахуванням площі реакційного каналу $18,6 \text{ м}^2$. Швидкість посування вогневого вибою – $0,07 \text{ м/год}$. Вогневий вибій прямолінійної форми $l_{\text{ок.з.}} = 9,0 \text{ м}$. Тиск подачі дуття – $0,4 \text{ МПа}$. Концентрація горючих газів – $37,92\%$.

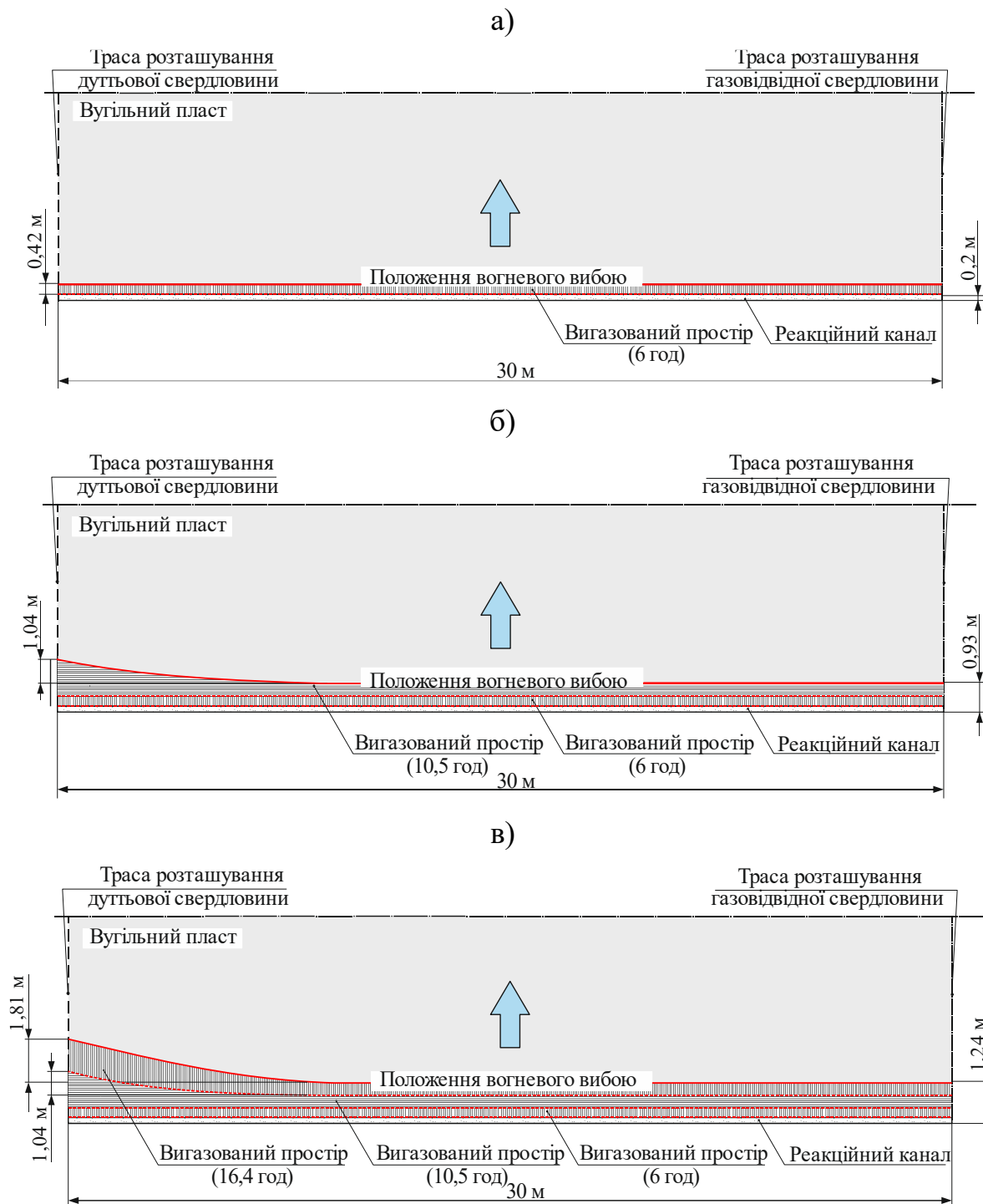


Рис. 2. Схема посування фронту вогневого вибою: потужність вугільного пласта $m = 1,2 \text{ м}$, тиск подачі дуття $P = 0,46 \text{ МПа}$: а – тривалість газифікації $t = 6,0 \text{ год}$; б – тривалість газифікації $t = 10,5 \text{ год}$; в – тривалість газифікації $t = 16,4 \text{ год}$

У процесі подальшої газифікації вугільного пласта спостерігається прискорення посування фронту вогневого вибою в окиснювальній зоні. (див. рис. 2, б). На 10,5 години газифікації було зафіксовано зниження концентрації горючих газів до 37,2 %, у зв'язку з чим прийнято рішення підвищити тиск подачі дуттьової суміші. За середнього значення тиску 0,45 МПа на 12,0 години газифікації концентрація горючих газів зросла до 38,45 %, що свідчить про активну взаємодію між компонентами дуттьової суміші та площиною вугільного пласта. Підвищення тиску зумовлює інтенсифікацію міжфазного контакту, що сприяє активізації термохімічних реакцій газифікації.

За цих умов площа вигазованого простору становить 32,45 м². При газифікації вугільного пласта потужністю 1,0 м підвищення тиску дуттьової суміші розпочиналося на 9,0 години процесу, для пласта потужністю 0,8 м на 6,8 години, а для 0,6 м на 5,8 години. Відповідні площі вигазованого простору становили 31,2 м², 32,1 м² та 34,2 м².

Слід зазначити, що протягом усього процесу газифікації, який тривав 16,4 год (див. рис. 2, в), площа вигазованого простору зросла, забезпечивши сумарний приріст 7,5 м². При цьому зростання відбувалося за стабільного тиску подачі дуття на рівні 0,45 МПа, що свідчить про високу ефективність процесу газифікації за заданих умов. На 19,8 год газифікації концентрація горючих газів почала знижуватися і склала 37,5%. Тому почали підвищувати тиск подачі дуття до 0,57 МПа. Площа вигазованого простору склала 53,0 м². При газифікації пласта потужністю 1,0 м підвищувати тиск подачі дуття розпочали на 16,9 год, при 0,8 м – 14,2 год, 0,6 м – 11,2 год. Площа вигазованого простору відповідно – 52,5 м², 53,4 м² та 51,5 м². Усереднені значення тиску подачі дуттьової суміші були на рівні 0,57 МПа. З подальшим ростом вигазованого простору до 60,4 м² на 23,7 год (рис. 3). Тиск подачі дуття склав 0,67 МПа. Водночас було зафіксовано опускання порід покрівлі зі сторони дуттьової свердловини.

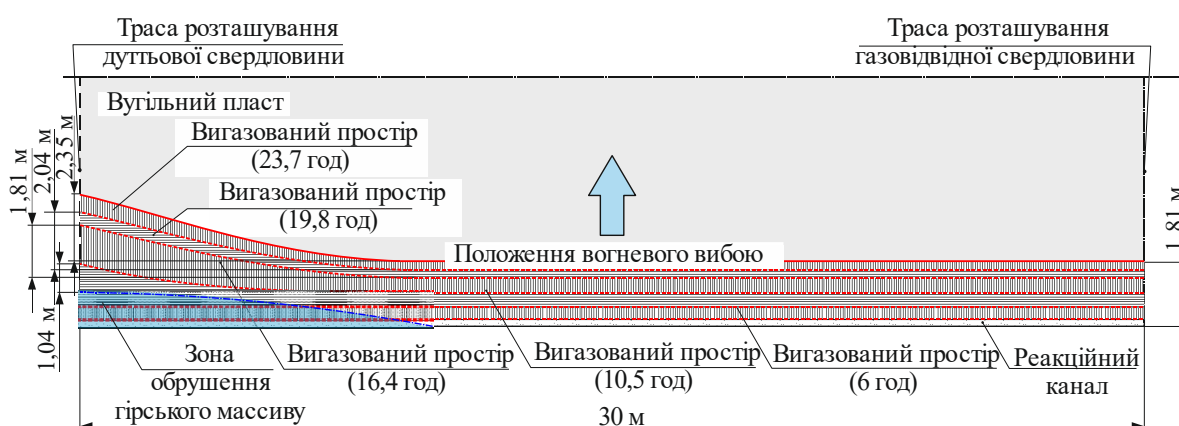


Рис. 3. Схема посування фронту вогневого вибою: потужність вугільного пласта $m = 1,2$ м, тиск подачі дуття $P = 0,64$ МПа, тривалість газифікації $t = 23,7$ год

Тиск у 0,67 МПа подавали упродовж 5,5 год. Середня концентрація горючих газів склала 39 %. Дослідження з визначення концентрації складових продуктів

горіння показали, що в генераторному газі складовим компонентом є CO_2 . Концентрація CO є залишком первинної реакції CO , яка утворюється в окислювальній зоні. За вторинної реакції CO утворюватиметься у відновлювальній зоні за участю діоксиду вуглецю та вуглецю при температурі стінок каналу газогенератора $800 - 1200$ °С. Безперечним є те, що кількість CO зростає по довжині каналу. Після чого було зафіксовано опускання в різних точках покрівлі пласта, що зображено на рис. 4.

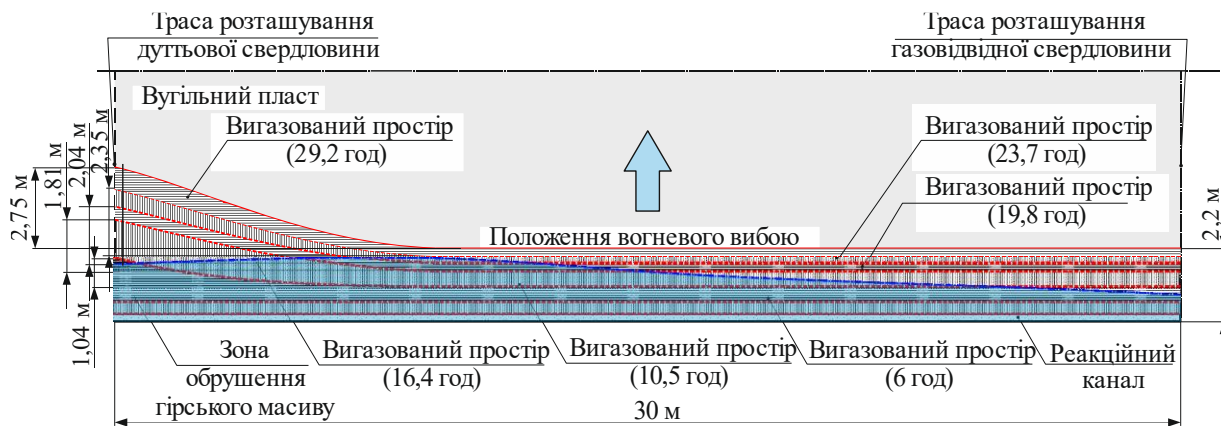


Рис. 4. Схема посування фронту вогневого вибою: потужність вугільного пласта $m = 1,2$ м; тиск подачі дуття $P = 0,44$ МПа; тривалість газифікації $t = 29,2$ год

Аналіз наведених даних на рис. 4 вказує на зменшення площі вигозованого простору, що пов'язано з обваленням порід покрівлі з певним кроком за довжиною вогневого вибою. Обвалення порід відбувається нерівномірно. У відновлювальній зоні крок обвалення змінюється від 1,23 до 1,37 м. В окислювальній зоні крок обвалення становить від 1,4 до 2,75 м. Нерівномірність кроків обвалення, насамперед, є результатом впливу температури на гірський масив. У процесі газифікації вугільних пластів із потужністю від 0,6 до 1,0 м, параметри кроку обвалення порід виявляються подібними. Це свідчить про те, що температура має вирішальний вплив на механізми обвалення порід. Встановлена величина кроку відповідає параметрам, які були раніше визначені в дослідженнях [13, 14].

Після обвалення порід під час досліджень було прийнято рішення про зменшення тиску подачі дуття до значень у 0,4 МПа. За подальшої газифікації через 11,2 год було зареєстровано зменшення концентрації газів до 36,8%, а при підвищенні тиску до 0,47 МПа концентрація газів почала підвищуватися. Така ж ситуація зареєстрована за газифікації пластів потужністю від 0,6 до 1,0 м. За кожним етапом дослідження було зареєстровано чотири кроки підвищення тиску подачі дуття від зміни розмірів вигозованого простору від тривалості процесу газифікації. На рис. 5 наведено дані щодо зміни площі вигозованого простору (S) від тривалості процесу газифікації (t) та потужності вугільного пласта (m).

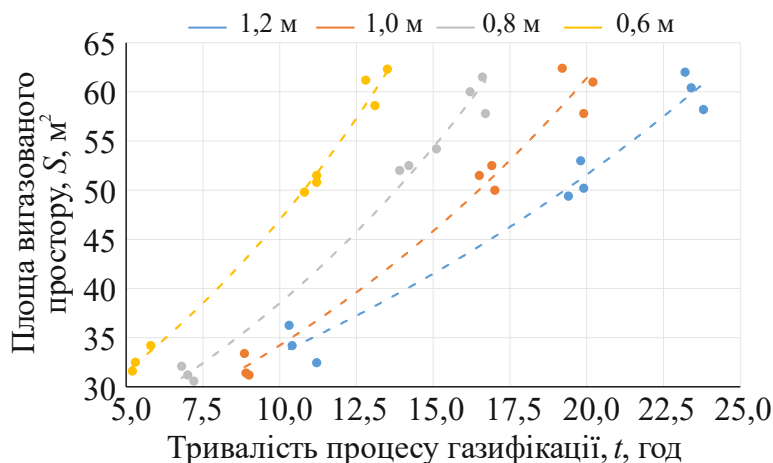


Рис. 5. Залежності зміни площі вигазованого простору від тривалості процесу газифікації та потужності вугільного пласта

Аналіз наведених даних на рис. 5 свідчить про експоненціальне зростання площі вигазованого простору від тривалості процесу газифікації:

- при $m = 1,2$ м $S = 21,6 \exp(0,04t)$, м²;
- при $m = 1,0$ м $S = 19,1 \exp(0,06t)$, м²;
- при $m = 0,8$ м $S = 19,3 \exp(0,07t)$, м²;
- при $m = 0,6$ м $S = 21,2 \exp(0,08t)$, м².

Встановлені залежності дозволяють прогнозувати параметри розширення вигазованого простору за тривалістю газифікації та забезпечувати кероване регулювання режимів підземної газифікації вугілля з підвищенням стабільності й ефективності процесу.

Висновки. Проведений аналіз свідчить щодо процесу підземної газифікації вугілля свідчить, що динаміка формування вигазованого простору є одним із визначальних чинників ефективності та стабільності процесу. Нелінійний характер зміни його параметрів, зумовлений взаємодією гірничо-геологічних, фізико-хімічних і газодинамічних факторів, обґрунтовує необхідність комплексного та системного підходу до їх дослідження. Тому розробка методичних засад обґрунтування вигазованого простору підземного газогенератора з урахуванням тривалості газифікації та зон хімічних реакцій створює наукове підґрунтя для підвищення керованості процесу, оптимізації режимів роботи підземного газогенератора та забезпечення прогнозних показників процесу.

Установлено, що формування та розширення вигазованого простору під час підземної газифікації вугілля має чітко виражений динамічний характер і визначається тривалістю процесу, тиском подачі дуттєвої суміші та потужністю вугільного пласта. Зростання площі вигазованого простору від часу газифікації носить експоненціальний характер, що підтверджує можливість прогнозування його геометричних параметрів і керування процесом шляхом регулювання технологічних режимів.

Доведено, що стабілізація та коригування тиску подачі дуття є ключовим фактором інтенсифікації процесу газифікації, оскільки забезпечує активізацію термохімічних реакцій, підвищення концентрації горючих газів і рівномірне просування фронту вогневого вибою. Водночас встановлено закономірності обвалення порід покрівлі, зумовлені температурним впливом, що дозволяє враховувати крок обвалення при прогнозуванні геомеханічної стійкості та подальшому керуванні вигазованим простором.

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

Перелік посилань

1. Perkins, G. (2018). Underground coal gasification – Part I: Field demonstrations and process performance. *Progress in Energy and Combustion Science*, 67, 158–187. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.02.004>
2. Saik, P., Lozynskiy, 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. Bhutto, A. W., Bazmi, A. A., & Zahedi, G. (2013). Underground coal gasification: From fundamentals to applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(1), 189–214. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.09.004>
4. Zhao, Y., Dong, Z., Chen, Y., Chen, H., Chen, S., Zhang, M., Xue, J., Wang, X., & Jiao, L. (2023). Physical Simulation Test of Underground Coal Gasification Cavity Evolution in the Horizontal Segment of U-Shaped Well. *Energies*, 16(8), 3452. <https://doi.org/10.3390/en16083452>
5. Lozynskiy, V. (2023). Critical review of methods for intensifying the gas generation process in the reaction channel during underground coal gasification (UCG). *Mining of Mineral Deposits*, 17(3), 67–85. <https://doi.org/10.33271/mining17.03.067>
6. Fang, H., Liu, Y., Ge, T., Zheng, T., Yu, Y., Liu, D., Ding, J., & Li, L. (2022). A Review of Research on Cavity Growth in the Context of Underground Coal Gasification. *Energies*, 15(23), 9252. <https://doi.org/10.3390/en15239252>
7. Фальштинський, В.С., Дичковський, Р.О., Станьчик, К., Свядровські, Є., & Лозинський, В.Г. (2011). Обґрунтування технологічних схем експериментального шахтного газогенератора. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, (3), 34–38.
8. Khan, M., Mmbaga, J., Shirazi, A., Trivedi, J., Liu, Q., & Gupta, R. (2015). Modelling Underground Coal Gasification – A Review. *Energies*, 8(11), 12603–12668. <https://doi.org/10.3390/en81112331>
9. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Saik, P., Lozynskiy, V., Sala, D., Hankus, Ł., Magdziarczyk, M., & Smoliński, A. (2025). Control of contour evolution, burn rate variation, and reaction channel formation in coal gasification. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93611-3>
10. Falshtynskiy, V., Lozynskiy, V., Saik, P., Dychkovskiy, R., & Tabachenko, M. (2016). Substantiating parameters of stratification cavities formation in the roof rocks during underground coal gasification. *Mining of Mineral Deposits*, 10(1), 16–24. <https://doi.org/10.15407/mining10.01.016>
11. Саїк, П.Б., & Янкін, Д.В. (2025). До питання раціонального планування гірничих робіт при підземній газифікації вугілля. *Збірник наукових праць НГУ*, (80), 81–92. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.081>
12. Laciak, M., Kačur, J., & Durdán, M. (2022). Modeling and Control of Energy Conversion during Underground Coal Gasification Process. *Energies*, 15(7), 2494. <https://doi.org/10.3390/en15072494>
13. Kadirov, V.R., Nurboboev, Y.T., Umirzoqov, A.A., & Muhammadiyev Elbek (2022). Rock displacement at underground coal gasification. *International Journal on Human Computing Studies*, 1(4), 72–82.
14. Дичковський, Р.О. (2015). Встановлення кроку посадки порід при свердловинній підземній газифікації вугілля. *Науковий вісник НГУ*, (6), 30–36.

ABSTRACT

Purpose. To establish relationships governing the formation and spatio-temporal evolution of the gasification goaf area in an underground gasifier as a function of gasification duration and coal seam thickness.

The research methodology was based on laboratory-scale physical modeling of underground coal gasification, reproducing the advance of the combustion face and the deformation behavior of the gasifier roof strata. During the experiments, the propagation rate of the combustion face, roof subsidence parameters measured using reference sensors, and the composition and concentration of producer gas were determined. The geometric parameters of the gasified cavity were obtained by visualizing cavity outlines at different time instants and calculating areas using the trapezoidal rule.

Findings. Time-dependent relationships for the gasified cavity area were established as a function of gasification duration and coal seam thickness. A procedure for calculating the gasified cavity area of an underground gasifier is proposed. It is shown that the cavity growth dynamics are nonlinear and predominantly exponential, governed by the rate of advance of the combustion face across the chemical reaction zones. A relationship was identified between cavity expansion and the injection pressure of the blast mixture with respect to the stability of the gasification process.

Results. Time-dependent relationships for the gasified cavity area were established as a function of gasification duration and coal seam thickness. A procedure for calculating the gasified cavity area of an underground gasifier is proposed. It is shown that the cavity growth dynamics are nonlinear and predominantly exponential, governed by the rate of advance of the combustion face across the chemical reaction zones. A relationship was identified between cavity expansion and the injection pressure of the blast mixture with respect to the stability of the gasification process.

Scientific novelty lies in establishing the dependencies of changes in the gasified cavity area of an underground gasifier on gasification duration and coal seam thickness, while accounting for the spatial distribution of chemical reaction zones that evolve along the reaction channel.

Practical significance lies in the applicability of the obtained relationships for predicting gasified cavity parameters and controlling the underground coal gasification process. The established dependencies can be used to justify blast-mixture injection regimes, improve the operational stability of the underground gasifier, and reduce the risk of uncontrolled roof collapse. The results are recommended for use in developing process flow schemes and mathematical models of underground coal gasification under real mining and geological conditions.

Keywords: *underground coal gasification, underground gasifier, gasification goaf, coal seam.*

дата першого надходження статті до видання	01.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	03.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025