https://doi.org/10.33271/pcgt.23.01

Research of geomechanical processes in the rock mass during the gasification of coal

Volodymyr Falshtynskyi[1], *Roman* Dychkovskyi[1*], *Vasyl* Lozynskyi[1], *Pavlo* Saik[1]

[1]*Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine*

[*]Corresponding author: dychkovskyi.r.o@nmu.one

Abstract. In the article it is provided the technical and technological aspects of the thin seam coals gasification. The gasification of thin coal seams presents a complex interplay of geomechanical processes within the surrounding rock mass. This research delves into the intricate dynamics governing such processes to provide insights crucial for efficient and safe gasification operations. Employing advanced analytical techniques, including numerical modeling and laboratory experiments, this study scrutinizes the behavior of the rock mass under gasification-induced stress and temperature changes. By examining factors such as rock deformation, fracturing patterns, and gas permeability variations, the research aims to elucidate the underlying mechanisms shaping the geomechanical response during coal seam gasification. The findings not only contribute to the fundamental understanding of rock behavior in gasification environments but also offer practical implications for optimizing gas extraction techniques and ensuring the integrity of surrounding geological formations.

Keywords: *coal; thin seams; borehole mining; gasification; economical aspects*

Дослідження геомеханічних процесів у породному масиві під час газифікації тонких вугільних пластів

Володимир Фальштинський[1], *Роман* Дичковський[1*], *Василь* Лозинський[1], *Павло* Саїк[1]

[1]*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна*

[*]Відповідальний автор: dychkovskyi.r.o@nmu.one

Анотація. У статті наведено техніко-технологічні параметри газифікації тонкого пластового вугілля. Газифікація тонких вугільних пластин включає складну взаємодію геомеханічних процесів у навколишньому породному масиві. Це дослідження розглядає витончену динаміку, що визначає такі процеси, для надання важливих уваги ефективної та безпечної роботи з газифікацією. Використовуючи передові аналітичні техніки, включаючи числове моделювання та лабораторні експерименти, це дослідження досліджує поведінку породного масиву під впливом стресу та змін температури, що виникають при газифікації. Аналізуючи такі фактори, як деформація породи, патерни розривів та зміни проникності газу, дослідження спрямоване на виявлення основних механізмів, які формують геомеханічну відповідь під час газифікації вугільного пласта. Отримані результати не лише сприяють фундаментальному розумінню поведінки порід у газифікаційних середовищах, але й мають практичне значення для оптимізації технік видобутку газу та забезпечення цілісності навколишніх геологічних формувань.

Ключові слова: *вугілля; тонкі пласти; бурові свердловини; газифікація; економічні аспекти*

1. Вступ

Дослідження геомеханічних процесів у породному масиві під час газифікації тонких вугільних пластів має на меті розкриття складної взаємодії між газифікаційним процесом та фізичними властивостями навколишнього гірського середовища.

Дослідження спрямоване на вивчення динаміки деформації гірських порід, утворення тріщин та змін проникності газів у результаті впливу газифікаційних процесів [1-4]. Отримані результати можуть бути важливими для оптимізації технологій видобутку газу з вугільних пластів та забезпечення безпеки та стійкості гірського середовища під час експлуатації [5-9].

З метою дослідження НДС стану порід шаруватого масиву встановлювались параметри епюр навантажень від підробленої породної товщі у залежності від геологічних умов, технологічних та часових факторів. Як граничні умови приймаються параметри максимальних опускань породних пластів [1, 10, 11].

Для дослідження прийнять гірничо-геологічні умови однієї із шахт компанії ДТЕК. У цих умовах, потужність тонкого вугільного пласта С5 на експериментальній ділянці 2А складає m = 0,84 м. Безпосередня покрівля пласта представлена піщанистим сланцем, потужністю Н = 3,8 м яка ділиться на дві пачки, нижня пачка потужністю h_H =1,8 м та верхня потужністю h_B = 2 м. Стан породних пачок покрівлі, що залягають безпосередньо над вугільним пластом, при газифікації, залежить від навантажень основної покрівлі, термонапружень, потужності золоостатку, наявності в породах пачки порід схильних до спучування і параметрів НДС стану порід безпосередньої покрівлі.

Розроблене програмне «GeoDenamics Lite». забезпечення досліджень в умовах СПГВ дозволяє визначити поперечні сили (Q), момент (M), нахил поперечних перерізів породних шарів (θ) і їх опускання (Y). Параметри температур процесу газифікації вугілля пласта змінюються по довженні реакційного каналу підземного газогенератора. Проведеними дослідженнями встановлено нерівномірні зміни у щільності порід покрівлі над реакційним каналом газогенератора під впливом високих температур при вигазовуванні вугільного пласта вплив, спостерігається збільшення об'єму порід у діапазоні 2 – 6 %, при цьому модуль пружності змінюється у діапазоні 5-18 % [12, 13].

У аналітичних дослідженнях НДС стану прогрітих порід покрівлі, враховувались зміни модуля пружності E_T і коефіцієнта лінійного розширення β_t під впливом високих температур процесу газифікації вугільного пласта. Коефіцієнт пружності змінюється з урахуванням коефіцієнту температурного впливу КТ у діапазоні 1,1-1,5 [14, 15].

3. Методика проведення досліджень

Мета цього дослідження полягає у проведенні експериментальних досліджень для визначення оптимальних параметрів для свердловинної підземної газифікації в тонких вугільних шарах. Загальний підхід до досліджень включав послідовне виконання шахтних експериментів, що передбачало формування масиву розплавлених порід під впливом високих температур [16-19]. Кожен етап досліджень включав: вивчення інженерно-геологічних умов шахтних полів та вибір ділянок для досліджень; розроблення технологічних схем газифікації вугілля та створення відповідного експериментального обладнання; вибір засобів для термохімічної деструкції вуглепородного масиву; встановлення методів контролю та вимірювання параметрів процесу газифікації; підсумок та аналіз результатів експериментів з метою розробки рекомендацій для створення технології та обладнання для впровадження виробничих рішень на промисловому рівні [20-22].

Первинними причинами руйнування породних шарів являються нормальні навантаження, сили тертя, момент згину і дотичні напруження від поперечних сил. Стан порід визначався головними напруженнями SPR та критеріями спротиву порід на одновісне стискання R_{cm}, умови руйнування порід відповідають умовам: $SPR > R_{cm}$ и $\tau_{max} > R_{cm}$. Поперечні сили над серединою підземного газогенератора відсутні, нормальні навантаження незначні, а стан порід масиву залежить від згинального моменту який викликає напруження по напластуванню λG_{cm}, λG_p та перпендикулярно йому G_{cm}, G_p. За рахунок власної ваги та згинального моменту у породному шарі виникають напруження

на відрив перпендикулярно напластуванню. Згідно прийнятої фізичної та математичної моделі НДС порід покрівлі визначаються напруження у різних перерізах породних шарів, поперечних сил Q_x та згинального моменту M_x. Виникнення вертикальних тріщин визначається деформаціями порід, через горизонтальні переміщення N_x розрахованих для двох сумісних перерізів за виразом:

$$N_x = 1{,}2 \cdot \frac{L^2}{K_T h_{сл} \cdot f(k)} \cdot \left(B_{1k} \cdot sin\frac{\pi}{L}x + \frac{B_{2k}}{4} \cdot sin\frac{2\pi}{L}x\right);$$

$$\xi = \frac{(N_2 - N_1)}{(x_2 - x_1)} \cdot 1000.$$

Опускання породного шару покрівлі Y_x визначаються за виразом:

$$Y_x = 0{,}4 \cdot \frac{L_3}{K_T h_{сл}^3 \cdot F(k)} \cdot [B_{1k} \cdot (cos\frac{\pi}{L}x - 1) + \frac{B_{2k}}{8} \cdot (cos\frac{2\pi}{L}x - 1).$$

Натурними замірами встановлено, що при деформаціях порід ε > 5 мм/м спостерігається виникнення вертикальних тріщин у породних шарах гірського масиву [1, 23, 24].

4. Результати та обговорення

Опускання породних шарів безпосередньої покрівлі з урахуванням геомеханічних процесів і впливу високих температур по довжині реакційного каналу підземного газогенератора у характерному перерізі шару у 1,2 м від вогневого вибою, представлено на рис 1.

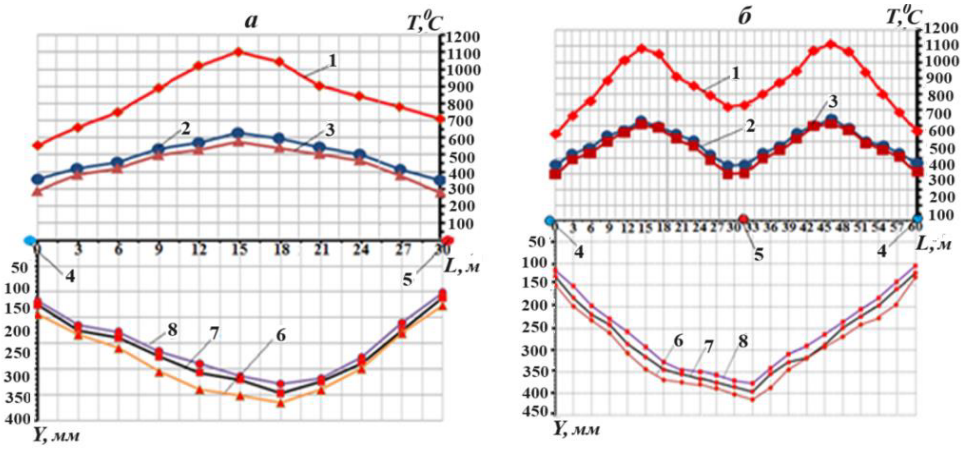

Рисунок 1. Опускання породних шарів безпосередньої покрівлі з урахуванням геомеханічних процесів і впливу високих температур по довжині реакційного каналу підземного газогенератора у характерному перерізі шару у 1,2 м від вогневого вибою: 1- розповсюдження температур по довженні реакційного каналу газогенератора, 2- параметри температурного поля в породах нижньої пачки безпосередньої покрівлі, при швидкості посування вогневого вибою 0,5 м/доб, 3- параметри температурного поля в порода безпосередньої покрівлі при швидкості посування вибою 2 м/доб, 4 - дуттьова горизонтальна свердловина, 5- газовідвідна горизонтальна свердловина, 6, 7, 8 - опускання нижньої пачки порід покрівлі при швидкості посування вогневого вибою, відповідно 0,5; 1; 2 м/доб

Аналізуючи результати досліджень представлених на рис. 1, слід констатувати, що при збільшені швидкості посування вогневого вибою опорна зона, яка виникає попереду вибою газогенератора при згині породних шарів безпосередньої покрівлі, зменшується у

діапазоні 11,9 – 7,8 м максимальні навантаження зростають у діапазоні 11,34 – 14,3 МПа, при довженні реакційного каналу 30 м, горизонтальні переміщення шарів порід незначні з зміщенням до вибою [25]. При довжині каналу підземного газогенератора 60 м, з зростанням швидкості посування вибою геометричні параметри опорної зони зменшуються у діапазоні 20,9 – 18,4 м, максимальні навантаження зростають у діапазоні 18,4 -21,9 МПа. За таких умов деформації в породах покрівлі при довжині каналу 60 м, складуть 3,8 – 7,2 мм/м і 2,6 - 6,5 мм/м при довжині каналу 30 м, що призводить до формування техногенної тріщинуватості породних шарів над реакційним каналом (рис. 2).

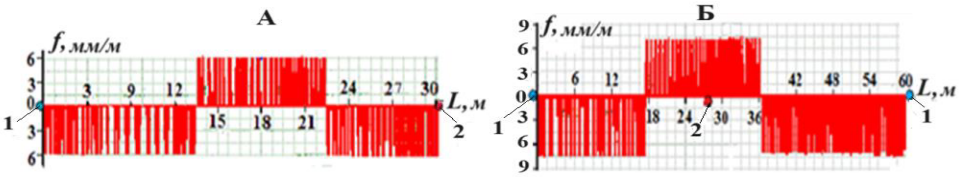

Рисунок 2 Формування вертикальної тріщинуватості в породах нижньої пачки безпосередньої покрівлі по довжині реакційного каналу підземного газогенератора: А – при довжині реакційного каналу L = 30 м, Б – при довжині реакційного каналу L = 60м: 1 - дуттьова горизонтальна свердловина, 2 - газовідвідна горизонтальна свердловина

Утворення тріщин в породах безпосередньої покрівлі під час вигазовування вугільного пласта переважно зумовлене гірським тиском. Цей фактор виявляє величезний вплив на структуру та стійкість порід. Окрім того, нерівномірне розподілення термонапружень є ще однією важливою причиною утворення тріщин. В результаті цих процесів, породи можуть демонструвати значні зміни у своїй фізичній структурі [26].

Породи основної покрівлі, в порівнянні з безпосередньою покрівлею, демонструють меншу схильність до тріщинуватості. Це може бути пов'язане з меншою чутливістю цих порід до температурних змін. Оскільки термонапруження в цих породах може бути незначним або відсутнім, їхня стійкість не настільки піддатлива змінам в середовищі. Тим не менш, дослідження вказують на важливість врахування температурного поля для повного розуміння процесів, які відбуваються в породах основної покрівлі [25, 27-29].

Зокрема, при потужності основної покрівлі 5,6 м, спостерігається значний модуль деформації порід. Це свідчить про те, що навантаження, що діють на ці породи, можуть бути значно вищими, ніж вони здатні витримати. Враховуючи це, важливо узяти до уваги не лише структуру порід, а й особливості їхнього навантаження під час проведення будь-яких гірничих операцій. Такий аналіз дозволить ефективніше управляти ризиками та забезпечити безпеку робочого середовища.

При згаданій потужності основної покрівлі 5,6 м, модуль деформації порід покрівлі у масиві буде E_0 = 1,81.104 МПа, над вигазованним простором підземного газогенератора E_h = 0,79.104 МПа. Результати досліджень критичних опускань, переміщень і деформацій основної покрівлі у характерних перерізах від вогневого вибою у вироблений простір газогенератора, представлені на рис. 3.

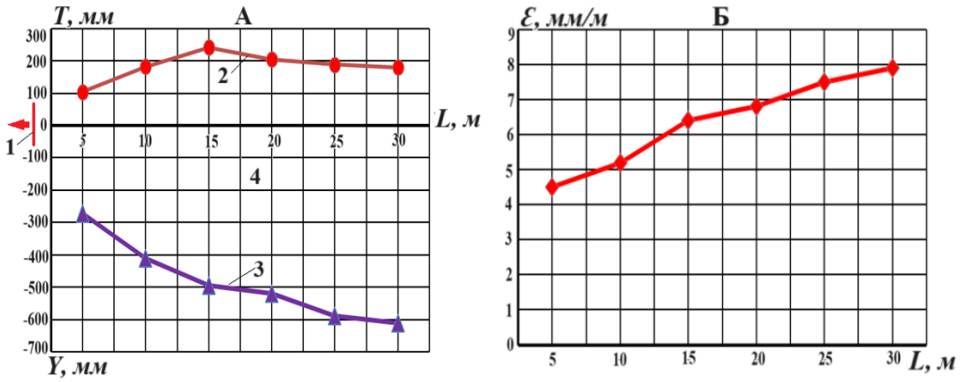

Рисунок 3. Результати досліджень: А - критичних опускань, переміщень; 1 – посування вогневого вибою, 2 – горизонтальні переміщення порід покрівлі, 3 – опускання породних шарів покрівлі, 4 – вигазованний простір підземного газогенератора і Б - деформацій основної покрівлі у характерних перерізах основної покрівлі

Критичні умови виникають у випадку коли навантаження з боку вищелижачих породних шарів розповсюджуються до геометричної точки перегину. Опускання порід над вогневим вибієм при довженні реакційного каналу 30 м становить 172 мм, у 5 м від вибію ця величина становить 284 мм. Під дією згину у характерних перерізах, породи основної покрівлі зазнають напружень, які впливають на міцності властивості породних шарів. Совокупність цих факторів призводить до виникнення в породах покрівлі критичних деформацій у діапазоні 4,63 – 7,8 мм/м. Напруження, що виникають при згині у шарах порід основної покрівлі у характерних перерізах представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Напруження перерізах, які виникають у породних шарах основної покрівлі при згині.

Розташування перерізу, м	Q, поперечні сили, МПа	M, згинальний момент, МПа	Згинальні напруження, МПа			
			$G_{ст}$	$G_{р}$	$G_{відр.}$	τ_{max}
22,5	30,6	356	1,1	0,07	0,01	2,3
29,5	35,2	729	3,4	0,12	0,04	1,8

Руйнування основної покрівлі спостерігається по напластуванню, тому що супротив порід на сколювання складе 3,1 МПа, на стиск 4,6 МПа та на відрив 0,12 МПа. Згідно параметрів критичних деформацій (рис. 3) в породних шарах покрівлі буде спостерігається активне формування вертикальної тріщинуватості, обвалення порід відсутні. Обвалення порід основної покрівлі можливо при виникненні у характерних перерізах породних шарів при згині пластичного шарніру при сумарних напружень не менше 7,9 МПа. Параметри напружень у характерних перерізах породних шарів покрівлі, згідно аналітичних досліджень встановлять 3,4 МПа. Породні шари основної покрівлі в таких умовах будуть плавно опускатися з виникненням техногенної тріщинуватості з інтенсивністю у діапазоні 5 – 9 тр. на 1 п.м. Розшарування породної товщі основної покрівлі спостерігається на три шари, потужністю 1,5; 1,8 и 2,3 м.

Нижні пачки порід безпосередньої підошви пласта С5, складаються з глинистого сланцю, який під дією температур спучується, тому що у елементному складі порід

спостерігаються хімічні компоненти: SiO_2 – 59,2 %, Al_2O_3/SiO_2 – 0,19 і С – 1,07. Коефіцієнт спучування Ксп порід підошви в таких умовах буде знаходитися у діапазоні 1,18 - 1,47 у залежності від фізико-механічних, техногенних властивостей порід та нерівномірності прогріву, порід безпосередньої підошви пласта.

Параметри переміщень та напружень в породах безпосередньої підошви вигазовуємого вугільного пласта C_5 представлені на рис. 4.

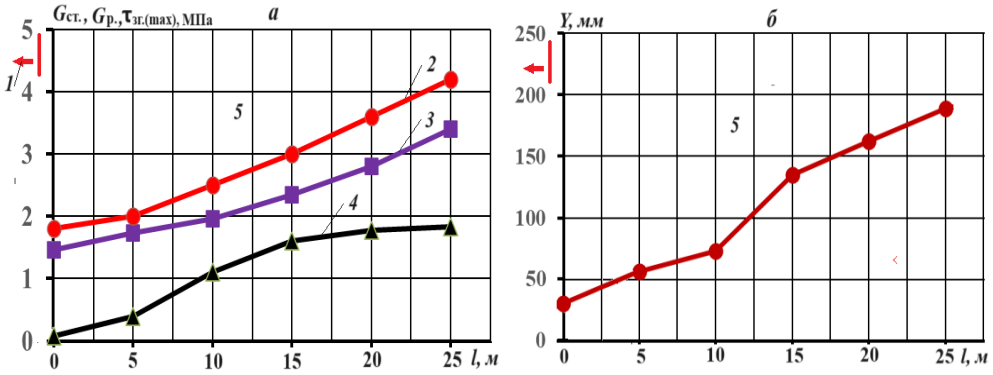

Рисунок 4 Параметри напружень а та переміщень б в породах безпосередньої підошви вигазовуємого вугільного пласта C_5: 1 – напрямок посування вогневого вибою газогенератора, 2 – $G_{ст}$ стискаючі напруження, 3 - Gp розривні напруження, 4 - $\tau_{(max)}$ дотичні напруження, 5 – вигазований простір газогенератора

Під дією геомеханічних та термодинамічних факторів на породи безпосередньої підошви максимальне переміщення шарів підошви досягне 196,7 мм при довженні реакційного каналу 30 м та 227,4 мм при довжині каналу 60 м, з урахуванням потужності золошлаків у діапазоні 7,5 - 12,4 мм, підняття підошви в умовах газифікації складе 21 - 28 % потужності вугільного пласта, що газифікується.

5. Висновки

Аналізуючи результати дослідження слід констатувати плавне опускання породних шарів безпосередньої покрівлі з порушенням щільності на спучені породи підошви і золошлаки, що призводить до зменшення деформацій породного масиву навколо газогенератора у діапазоні 16 – 22%. При зменшені швидкості посування вогневого вибою підземного газогенератора до 0,5 м/доб або зупинки, а також при збільшені довжини реакційного каналу, буде спостерігається обвалення порід нижньої пачки безпосередньої покрівлі у реакційний канал. Це явище пов'язане з змінами параметрів опорної зони та збільшенням довжини півпрольоту породних шарів покрівлі над поземним газогенератором. У зоні переходу, яка має розміри у діапазоні 1,8 - 3,8 м і знаходиться між окислювальною і відновлювальною зонами при довжині реакційного каналу 30 м будуть спостерігатися значні впливи термічних навантажень у породах нижньої пачки на глибину 12 – 20 см, що зведе до переходу порід у пластичний стан з втратою щільності і збільшенням об'єму. При віддалені від вогневого вибою у вигазованний простір газогенератора породи на цій дільниці плавно опускаються на спуч енні породи підошви. в (рис. 1, 3 А, 5).

Природна тріщинуватість порід пов'язана з формуванням породо-вугільного масиву, техногенна тріщинуватість формується при підготовки підземного газогенератора та газифікації вугільного пласта. При досліджені НДС порід покрівлі в умовах вигазовувані вугілля тонкого пласта, деформації порід складають 5-7,9 мм/м, що призводить до

інтенсивного зростання техногенної тріщинуватості породних шарів у активних зонах реакційного каналу. Це пов'язано з нерівномірним розподілом гірського тиску і термічних напружень по довжині вогневого вибію, що призводить до втрати достатньої герметичності підземного газогенератора (рис. 2, 3).

Acknowledgements

Представлені результати отримано у рамках виконання науково-дослідної роботи ГП-516 «Науково-практичні засади технології газифікації низькосортного вугілля» (№ держреєстрації 0123U101757), що фінансується Міністерством освіти і науки України.

References

1. Savostianov, O.V. (2016). Methods of forecasting geomechanical processes for the selection of technological parameters for developing shallow layers. NTU NGU, 216.
2. Dychkovskyi, R., Shavarskyi, I., Saik, P., Lozynskyi, V., Falshtynskyi, V., & Cabana, E. (2020). Research into stress-strain state of the rock mass condition in the process of the operation of double-unit longwalls. *Mining of Mineral Deposits*, 14(2), 85–94. https://doi.org/10.33271/mining14.02.085
3. Falshtynskyy, V., Dychkovskyy, R., Lozynskyy V., & Saik. P. (2012). New method for justification the technological parameters of coal gasification in the test setting. (2012). *Geomechanical Processes during Underground Mining*, 211–218. https://doi.org/10.1201/b13157-36
4. Dychkovskyi, R. O., Lozynskyi, V. H., Saik, P. B., Petlovanyi, M. V., Malanchuk, Y. Z., & R. Malanchuk, Z. (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
5. Choi, S. O., Lee, B. J., & Shin, H. S. (2006). Geological and geotechnical investigation on in situ stress regime around the Yangsan Fault Zone in Korea. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3–4), 243. https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.021
6. Liu, B., Meng, W., Zhao, Z., Lin, T., & Zhang, J. (2023). Coupled thermal-hydro-mechanical modeling on characteristics of excavation damage zone around deep tunnels crossing a major fault. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 134, 105008. https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105008
7. Yindeesap, P., Ngaopitakkul, A., & Leelajindakrairerk, M. (2015). Study of Characteristics of Fault in Overhead and Underground Cable Distribution System Using Experimental Test Bench. *Proceedings of The 3rd International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2015*. https://doi.org/10.12792/icisip2015.065
8. Falshtyns'Kyy, V., Dychkovs'Kyy, R., Lozyns'Kyy, V., & Saik, P. (2013). Justification of the gasification channel length in underground gas generator. *Mining of Mineral Deposits*, 125–132. https://doi.org/10.1201/b16354-22
9. Blinderman, M. S. (1996). Pressure drop in underground gas generator in gasification of coal bed. *Fuel and Energy Abstracts*, 37(3), 182. https://doi.org/10.1016/0140-6701(96)88535-3
10. Tsvetkova, M. (2022). Underground research laboratory (URL) for geological disposal of radioactive waste and possibility for construction in Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society*, 83(3), 275–278. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2022.83.3.275
11. Falshtynskyi, V., Saik, P., Lozynskyi, V., Dychkovskyi, R., & Petlovanyi, M. (2018). Innovative aspects of underground coal gasification technology in mine conditions. *Mining of Mineral Deposits*, 12(2), 68–75. https://doi.org/10.15407/mining12.02.068
12. Falshtynskyi, V. S., Dychkovskyi, R. O., Lozynskyi, V. G., & Saik, P. B. (2021). Determination of the Technological Parameters of Borehole Underground Coal Gasification for Thin Coal Seams. *Journal of Sustainable Mining*, 12(3). https://doi.org/10.46873/2300-3960.1296
13. Xin, L., Wang, Z., Wang, G., Nie, W., Zhou, G., Cheng, W., & Xie, J. (2017). Technological aspects for underground coal gasification in steeply inclined thin coal seams at Zhongliangshan coal mine in China. *Fuel*, 191, 486–494. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.102
14. Lozynskyi, V., Dichkovskiy, R., Saik, P., & Falshtynskyi, 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

15. Falshtynskyi, V., Lozynskyi, V., Saik, P., Dychkovskyi, 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
16. Lucas, J. (1975). Design optimization in underground coal systems. Section 1. Structural parameters of coal measure rocks. Section 2. Longwall mining system strata simulator. Section 3. Design criteria for underground roof-truss support systems. Interim report, April--June 1975. *Office of Scientific and Technical Information (OSTI)*. https://doi.org/10.2172/5129731
17. Bruggink, P. R., & Davis, B. E. (1981). Underground Coal Gasification Product Quality Parameters. *All Days*. https://doi.org/10.2118/10188-ms
18. Falshtynskyi, V., Dychkovskyi, R., Saik P., & Lozynskyi, V. (2014). Some aspects of technological processes control of an in-situ gasifier during coal seam gasification. Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining, 121–124. https://doi.org/10.1201/b17547-20
19. Bazaluk, O., Lozynskyi, V., Falshtynskyi, V., Saik, P., Dychkovskyi, R., & Cabana, E. (2021). Experimental Studies of the Effect of Design and Technological Solutions on the Intensification of an Underground Coal Gasification Process. Energies, 14(14), 4369. https://doi.org/10.3390/en14144369
20. Dychkovskyi, R., Falshtynskyi, V., Ruskykh, V., Cabana, E., & Kosobokov, O. (2018). A modern vision of simulation modelling in mining and near mining activity. E3S Web of Conferences, 60, 00014. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000014
21. Lemke, F., & Müller, J.-A. (2003). Self-Organising Data Mining. Systems Analysis Modelling Simulation, 43(2), 231–240. https://doi.org/10.1080/02329290309367
22. Everett, J. E., Howard, T. J., & Jupp, K. (2010). Simulation modelling of grade variability for iron ore mining, crushing, stockpiling and ship loading operations. Mining Technology, 119(1), 22–30. https://doi.org/10.1179/037178410x12633834652411
23. Cabana, E., Falshtynskyi, V., Saik, P., Lozynskyi, V., & Dychkovskyi, R. (2018). A concept to use energy of air flows of technogenic area of mining enterprises. *E3S Web of Conferences*, 60, 00004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000004
24. Saik, P., Falshtynskyi, V., Lozynskyi, V., Dychkovskyi, R., Berdnyk, M., & Cabana, E. (2023). Substantiating the operating parameters for an underground gas generator as a basic segment of the mining energy-chemical complex. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1156(1), 012021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012021
25. Buzylo, V., Bondarenko, V., Dychkovskiy, R., & Falshtynskiy, V. (2007). Parameters of Injection Fill Above an Underground Gas Generator. Technical, Technological and Economical Aspects of *Thin-Seams Coal Mining, International Mining Forum*, 2007, 89–95. https://doi.org/10.1201/noe0415436700.ch11
26. Pivnyak, G., Dychkovskyi, R., Falshtynskyi, V., & Cabana, E. C. (2017). Energy Efficiency and Economic Aspects of Mining Wastes Utilization within the Closed Cycle of Underground Gas Generator. *Advanced Engineering Forum*, 25, 1–10. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/aef.25.1
27. Duda, J. (1978). Basic estimated capital investment and operating costs for underground bituminous coal mines utilizing a continuous mining system. [Effect of mine size and DCF]. *Office of Scientific and Technical Information (OSTI)*. https://doi.org/10.2172/6421799
28. Luft, S., & Skrzek, T. (2018). Effect of the exhaust gas recirculation ratio and the energy share of the gaseous fuel on basic operating parameters and exhaust emissions in a dual-fuel compression ignition engine operating on natural gas. 2018 XI International Science-Technical Conference Automotive Safety. https://doi.org/10.1109/autosafe.2018.8373351
29. Ang, Z. Y. A., Woo, W. L., & Mesbahi, E. (2017). Prediction and analysis of energy generation from thermoelectric energy generator with operating environmental parameters. 2017 International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA). https://doi.org/10.1109/icgea.2017.7925459