

С.В. Сахно, к.т.н., доц.

І.Г. Сахно, д.т.н., проф.

В.О. Назаренко, д.т.н., доц.

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»

С.І. Башинський, к.т.н., доц.

А.В. Панасюк, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Вплив термомеханічних напружень на зміну ширини запобіжного цілика при підземній газифікації вугілля

Підземна газифікація вугілля належить до сучасних напрямів розвитку чистих вугільних технологій і розглядається як один із перспективних способів реалізації концепції «зеленого» видобутку корисних копалин. Її суть полягає у перетворенні вугілля, що залягає у надрах, безпосередньо в газоподібне паливо в результаті контрольованого процесу горіння та хімічних реакцій. Основні принципи цього процесу відомі ще з початку XX століття, проте практична реалізація технології довгий час стримувалася через складність керування гідродинамічними й термомеханічними процесами в масиві порід. Останніми роками інтерес до підземної газифікації суттєво зріс у зв'язку з розвитком методу CRIP (Controlled Retractable Injection Point), який забезпечує ефективніше управління процесом горіння та підвищує рівень безпеки робіт. Саме цей метод став предметом аналізу у даному дослідженні. Однією з ключових невирішених проблем залишається визначення оптимальної ширини вугільного цілика між суміжними реакторними порожнинами з урахуванням впливу термомеханічного руйнування масиву. Для вирішення цього завдання застосовано числове моделювання із використанням програмного комплексу ANSYS 17.2, що дало змогу дослідити просторовий розподіл термомеханічних напружень у тілі вугільного цілика під час газифікації. Для прогнозування моменту та характеру руйнування на різній глибині було використано теорію Мора, яка дозволяє оцінити критичні значення напружень у породі. Отримані результати свідчать, що руйнування вугільного пласта поблизу продуктивної та нагнітальної свердловин призводить до зменшення ефективної ширини запобіжного цілика, хоча ступінь цього впливу виявився меншим, ніж очікувалося. Встановлено, що зі збільшенням глибини залягання пласта розширюється зона термомеханічного пошкодження вугілля, що обумовлено зростанням опорного тиску внаслідок обвалення покрівельних порід у постгазифікаційний період. Таким чином, головним чинником руйнування цілика є саме підвищений гірський тиск, а не локальні температурні ефекти.

Ключові слова: підземна газифікація вугілля; стійкість ціликів; ширина запобіжного цілика; газифікація тонкого вугільного пласта; термічне напруження; CAD-CAE технології.

Вступ. Найважливішим компонентом сталого розвитку останніх років є скорочення викидів вуглецю. Виконання глобальних зобов'язань передбачає планове скорочення викидів парникових газів та декарбонізацію [1]. В енергетичному секторі цього можна досягти насамперед завдяки зменшенню залежності від викопного вугілля, яке вважається основним джерелом забруднення навколишнього середовища. Енергетична криза, спричинена війною в Україні, показала небажання світу відмовитися від вугілля [2]. Однак аналіз тенденцій у світовому видобутку вугілля показує, що, всупереч очікуванням, світ поступово збільшує видобуток вугілля, переносячи його до країн, що розвиваються [3]. На думку різних експертів, якщо поточні тенденції у світовій енергетиці збережуться, вугілля залишатиметься одним з ключових джерел енергії щонайменше протягом наступних десяти років. У таких умовах, поряд з розвитком альтернативних «зелених» джерел енергії, технології скорочення викидів вуглецю, засновані на використанні викопного вугілля як енергетичного ресурсу, стають дедалі актуальнішими. У глобальному контексті це відображається у підвищеному науковому та інженерному інтересі до технологій підземної газифікації (ПГВ).

Енергетична незалежність є одним із ключових факторів виживання економіки під час війни та розвитку під час повоєнної відбудови України. Значні розвідані запаси вугілля зруйнованих шахт та перспективних ділянок, які, за різними оцінками, гарантують забезпечення внутрішнього ринку цим енергоресурсом на період від 100 до 250 років. Водночас інтеграція України в європейський простір передбачає скорочення викидів парникових газів, що створює суперечність між необхідністю збільшення виробництва, яке може бути реалізовано шляхом спалювання викопного вугілля, та зобов'язаннями щодо зменшення вуглецевого сліду. Вирішення цієї суперечності можливе шляхом широкого впровадження ПГВ, що розкриває регіональний контекст актуальності цієї технології.

Наразі експериментальні дослідження проводяться в підземних газогенераторах та в лабораторних умовах. Досягнуто значного прогресу в управлінні вибоєм ПГВ; визначено оптимальні діапазони зміни тиску дуттєвої суміші та вплив концентрації газів і пари на процес газифікації; було впроваджено нові методи підземної газифікації [4–8]. Серед проблемних питань, що обмежують використання ПЦГ, є екологічні небезпеки. Передусім існує високий ризик просідання земної поверхні, затоплення та забруднення води через еволюцію тріщин у розміщених вище пластах та зміщення гірських порід над порожнинами реактора ПГВ [9].

У цьому дослідженні розглядається метод CRIP (паралельних контрольованих точок вприску). Цей метод є більш перспективним, оскільки має вищу ефективність виробництва синтез-газу, стабільніші рівні видобутку газу та підвищені коефіцієнти використання вугілля. Стійкість розкривної породи над панелями газифікації за методом CRIP значною мірою залежить від стійкості запобіжних ціликів.

Багато вчених вивчали параметри запобіжних ціликів у випадку використання методу CRIP [10–12]. Однак вплив термомеханічного руйнування вугілля поблизу продуктивних та нагнітальних свердловин на ширину цілика між порожнинами реактора вивчений недостатньо. Вугілля поблизу панелі UCG піддається впливу високих температур, які можуть перевищувати 1000 °С. Це призводить до незворотних змін властивостей вугілля, посилення тріщинуватості та зниження несучої здатності в зоні термічного впливу. В результаті нагрівання вугілля розширюється, створюючи додаткові теплові напруження в ціликах. Таким чином, функціональна ширина цілика стає меншою за геометрично розраховану ширину. Зазначена задача формує напрям цього дослідження.

Методи досліджень. У цьому дослідженні було використано метод скінченних елементів у програмному забезпеченні Ansys. Була використана тривимірна зв'язана термомеханічна числова модель. Модель мала ширину 100 м, висоту 130 м та довжину 50 м (рис. 1). Модель включала дві порожнини вигазованого простору та один реактор. Довжина реактора становила 30 м. У цьому дослідженні ширина вугільного цілика також становила 30 м. Над панеллю газифікації в період після газифікації було змодельовано зону обвалення. Ця зона у вигазованому просторі мала арочну форму. Висота зони обвалення була у 8 разів більшою за товщину вугільного пласта [9, 13]. Вигазований простір був заповнений матеріалом горіння та обваленими породами. Вертикальний тиск у моделі дорівнював вазі породних пластів на відповідній глибині. Глибина вугільного пласта змінювалася від 200 до 600 м.

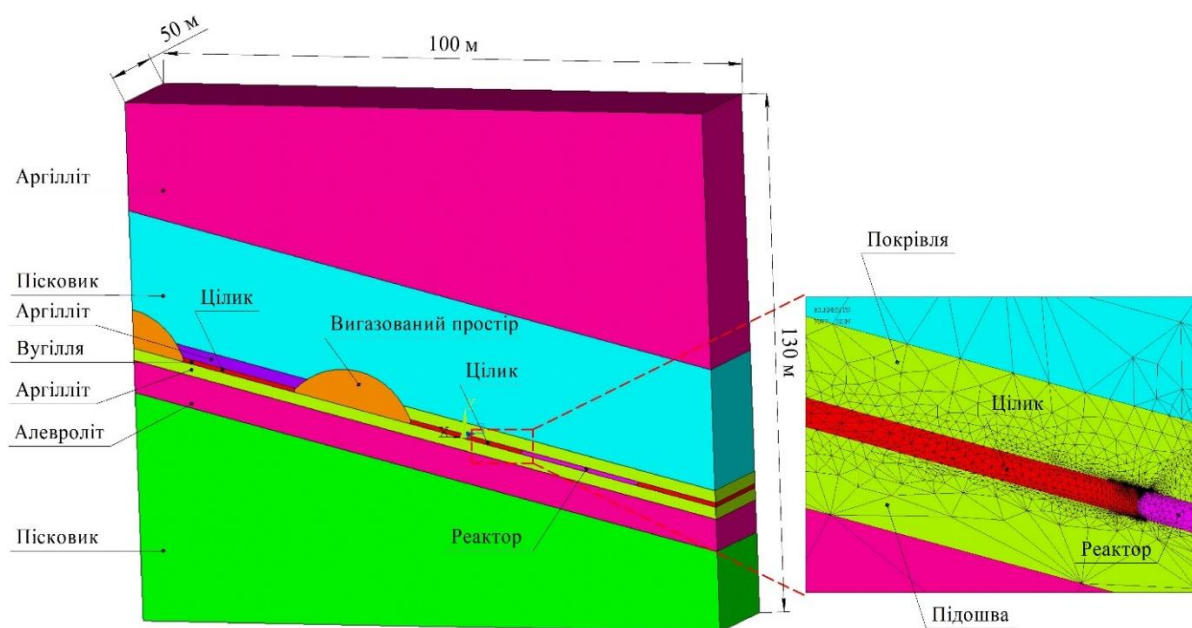


Рис. 1. Чисельна кінцеелементна модель

Для моделювання поведінки гірської маси поза межами теплового впливу реактора було використано модель Друкера – Прагера. Для розрахунку властивостей гірської маси було використано критерій руйнування Хука – Брауна [14]. Метод розрахунку параметрів гірської маси описано в роботі [15].

Температуру гірської маси було прийнято рівною 27 °С. Температура в забої реактора становила 1000 °С. Властивості вугілля в зоні термічного впливу було прийнято на основі досліджень [16, 17]. Властивості аргіліту в безпосередній покрівлі та підшві в межах теплового впливу реактора були розраховані з урахуванням досліджень [18] (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри гірського масиву в зоні теплового впливу реактора ПГВ

Коефіцієнт лінійного теплового розширення (α) (K^{-1})	Питома теплоємність (CP) (Дж/кг К)	Теплопровідність (λ) (В/м/К)	Міцність на розтягування (МПа)	Модуль деформації (ГПа)	Коефіцієнт Пуассона	Значення когезії, (МПа)	Кут внутрішнього тертя (град)
Безпосередня покрівля / підосва (аргіліт)							
$3.0 \cdot 10^{-5}$	800	1.67	0.36	1.17	0.3	2.7	27
Вугільний пласт							
$1 \cdot 10^{-5}$	620	0.16	0.27	0.5	0.4	1.13	20

Результати досліджень. Аналіз напружено-деформованого стану та аналіз розподілу температури створили основу для розуміння механізму втрати несучої здатності цілика та вивчення закономірностей зменшення функціональної ширини вугільного цілика залежно від глибини. На рисунку 2, а показано розподіл температури в моделі. Слід зазначити, що модель враховує термічне руйнування вугілля в стінках продуктивних та нагнітальних свердловин, що призводить до утворення непрямокутних стінок реактора. Зона теплового впливу реактора, обмежена $250^\circ C$ в стінках реактора, згідно з результатами моделювання, не перевищує 30 см. При цьому максимальна ширина зони підвищення температури в стінках реактора зосереджена в середній частині товщини вугільного пласта.

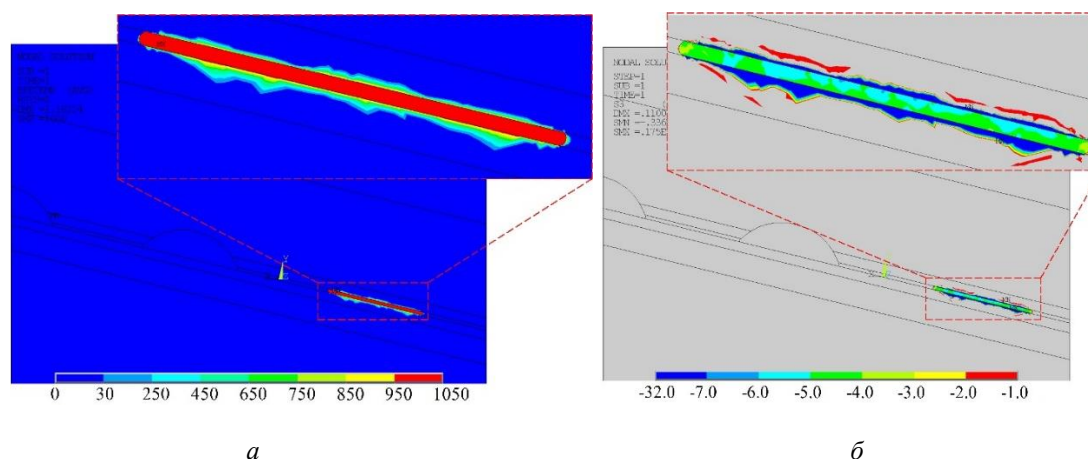


Рис. 2. Розподіл температури в градусах Цельсія (а) та термічного напруження (б) у моделі

На рисунку 2, б показано розподіл термічних напружень навколо порожнини реактора. Термічні напруження, спричинені розширенням породи в зоні впливу температури, мають знак мінус. Це означає, що ці напруження є стискаючими. Таким чином, термічні напруження збільшують мінімальні головні механічні напруження в навколишніх породах. Оскільки термічні напруження не залежать від глибини, частка їхнього впливу на суму термомеханічних напружень зменшується з глибиною. Значення максимальних термічних напружень у стінках порожнини реактора становить 3,6 МПа. На глибині 200 м це додаткові 72 % до геостатичних напружень, а на глибині 600 м – лише 24 %. Таким чином, вугільні цілики, розташовані на невеликій глибині, більш чутливі до термічних напружень згідно з принципом суперпозиції.

Вугільні цілики руйнуються в результаті стиснення, тому критичними напруженнями для них є головні мінімальні напруження. Розподіл сумісних механічних та термічних напружень у породах, що оточують реактор, на глибині 200 та 600 м показано на рисунку 3. Поле напружень на різних глибинах суттєво змінюється як на грані реактора, так і в його стінках.

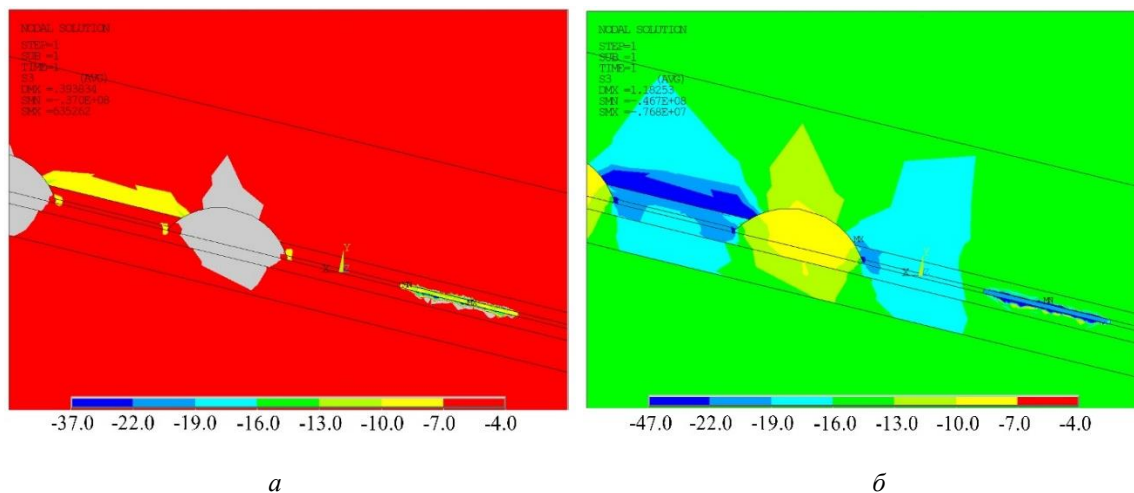


Рис. 3. Розподіл мінімальних головних напружень (МПа) у моделі на глибині 200 м (а) та 600 м (б)

На рисунку 4 показано зміну сумісних стискаючих напружень у вугільному цілику з глибиною. Лінія моніторингу розташована в центрі вугільного пласта та простягається від стінки порожнини реактора до стінки попередньо газифікованої порожнини. Збільшення напружень у цілику (відносно літологічних напружень) з боку попередньо відпрацьованої порожнини зумовлене опорним тиском, що збільшився в результаті обвалення порід над порожниною газифікації в постгазифікаційний період. Цей процес добре вивчений і не викликає інтересу. Збільшення напружень з боку реактора зумовлене термічними напруженнями. Там спостерігається різке збільшення стискаючих напружень з піковим значенням на поверхні стінки реактора. Глибина теплового впливу реактора на мінімальні головні напруження не перевищує 50 см для геологічних умов цього дослідження.

З рисунка 4, а видно, що збільшення напружень поблизу реактора не є постійним і становить 3,07, 3,09, 3,20, 3,32, 3,44 МПа для глибин 200, 300, 400, 500, 600 м відповідно. Це пояснюється комбінованим впливом термічних та механічних напружень у стінці порожнини ПГВ. Більше того, оскільки порожнина має арочну форму, а властивості вугілля моделюються нелінійно, спостерігається непрямий зв'язок між збільшенням глибини та напруженнями в стінці порожнини ПГВ при постійному значенні термічних напружень. Оскільки арочна форма дозволяє зменшити стискаючі напруження на контурі, сума збільшення термомеханічних напружень у досліджуваному діапазоні менша за термічні напруження. Однак у основах арки з боку покрівлі та підшви виникають підвищені стискаючі напруження. Проте вони не суттєво впливають на руйнування вугільного цілика.

На рисунку 4, б показано зміну коефіцієнта концентрації напружень у цілику на різних глибинах вугільного пласта. Як і очікувалося, частка впливу термічних напружень зменшується з глибиною. Таким чином, коефіцієнт стискаючих напружень на поверхні стінки реактора становить 1,62 для глибини 200 м та 1,23 для глибини 600 м.

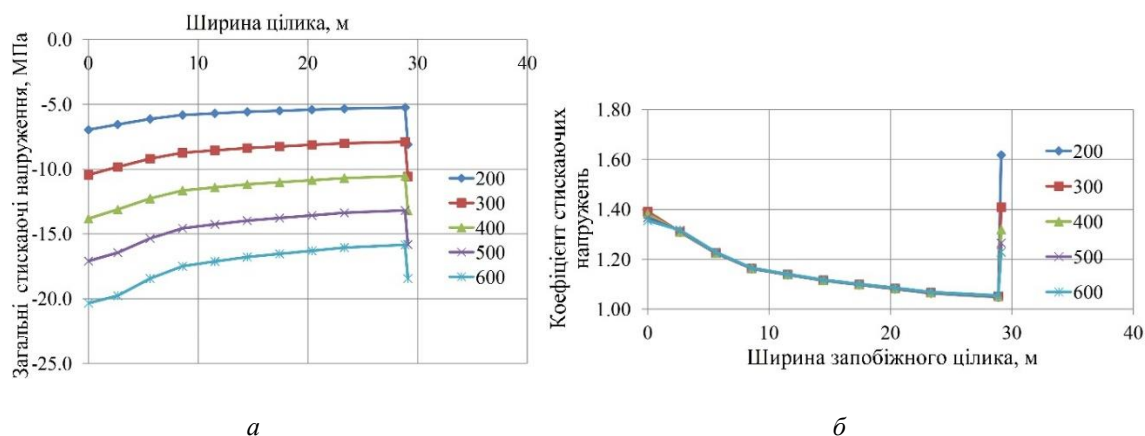


Рис. 4. Зміна термомеханічних напружень (а) та коефіцієнта концентрації напружень (б) у вугільному цілику на глибині 200–600 м

Обговорення. У цьому дослідженні пропонується використовувати критерій Мора для визначення глибини руйнування вугільного цілика поблизу порожнини реактора. Відомо, що міцність породи в об'ємному полі напружень збільшується. З певним ступенем спрощення збільшення глибини можна інтерпретувати як збільшення бічних напружень. Таким чином, результати випробувань вугілля в об'ємному полі напружень можуть надати дані для оцінки руйнування цілика на різних глибинах. Як приклад, у цій статті використовуються результати випробувань зразків вугілля в тривісній компресійній машині; експериментальна методика була детально описана в попередньому дослідженні [19].

Під час лабораторних випробувань моделювалося збільшення глибини вугільного пласта шляхом збільшення обмежених напружень. Так глибина 200, 300, 400, 500, 600 м відповідала бічному тиску 5,0, 7,5, 10,0, 12,5, 15,0 МПа. На початковому етапі навантаження зразків вертикальний та бічний тиски збільшувалися одночасно. Після досягнення необхідного рівня обмеженого напруження вертикальний тиск збільшувався до руйнування зразків. Кола Мора для вугілля марки Д показані на рисунку 5, а.

Тривісне пікове напруження на глибині 200, 300, 400, 500, 600 м становить 7,20, 1,10, 13,72, 16,00, 18,25 МПа відповідно. Кут внутрішнього тертя вугілля становить 31 градус. Рисунок 5, б поєднує результати лабораторних випробувань та числового моделювання. Частина цілика, в якій напруження вище за тривісне пікове напруження (згідно з теорією Мора), буде зруйнована. Таким чином, точки перетину ліній пікового напруження та ліній сумісних стискаючих напружень на відповідній глибині характеризують пікові стани.

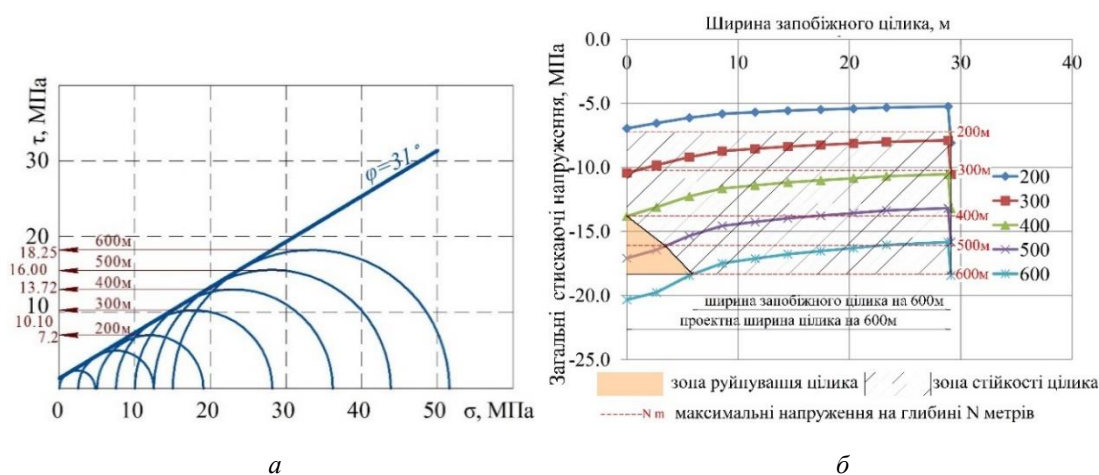


Рис. 5. Кола Мора для вугілля (а) та зміна ширини запобіжного цілика (б) на глибині 200–600 м

Для випадку, проілюстрованого на рисунку 5, б, можна зробити висновок, що термічні напруження призведуть до руйнування цілика з боку реактора ПГВ лише на глибинах 200 та 300 м, оскільки для цих глибин лінія пікових напружень відсікає частину кривої сумісних стискаючих напружень. Зона тріщинуватості становить лише кілька сантиметрів. З боку вигазованого простору, на глибинах 500 та 600 м, спостерігається руйнування вугілля, що призводить до зменшення безпечної ширини цілика. Ширина зони тріщинуватості на глибині 500 м становить 3,4 м, а на глибині 600 м – 6,1 м. Ширина запобіжного цілика зменшується на вказані значення, що слід враховувати під час проектування ціликів. Однак основною причиною руйнування є механічні напруження. Таким чином, можна зробити висновок, що для умов, розглянутих у статті, термічне руйнування вугілля в стінках реактора ПГВ не призводить до суттєвого зменшення ширини запобіжного цілика.

Висновки. Це дослідження було зосереджене на особливостях розрахунку ширини цілика при підземній газифікації вугілля. За результатами цього дослідження можна зробити такі висновки:

1. У вугільному цілику з боку реактора ПГВ спостерігається два процеси, що спричиняють руйнування. Перший – термодеструкція внаслідок підвищення температури. Другий – механічне руйнування вугілля, викликане розширенням в результаті нагрівання, тобто термічними напруженнями. Глибина зони термічного руйнування не перевищує 30 см. Глибина зони руйнування від термічних напружень становить близько 10 см. Таким чином, можна зробити висновок, що для умов, які розглядаються в статті, термодеструкція вугілля в стінках реактора істотно не знижує необхідну ширину запобіжного цілика;

2. У вугільному цілику з боку вигазованої панелі руйнування цілика пов'язане з ростом опорного тиску в результаті руйнування порід над панеллю газифікації в постгазифікаційний період. При розрахунку ширини запобіжного цілика слід враховувати, що механічні напруження збільшуються з глибиною. Результати дослідження показали, що при проектній ширині цілика 30 м на глибинах 500 і 600 м ширина запобіжного цілика зменшується до 26,6 і 23,9 м відповідно. Причиною цього є руйнування вугілля в зоні підвищених напружень.

Список використаної літератури:

1. Рамкова конвенція ООН про зміну клімату, 31 жовтня – 13 листопада. – 2021 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10_add1_adv.pdf.
2. Allam Z. The Rising Impacts of the COVID-19 Pandemic and the Russia–Ukraine War: Energy Transition, Climate Justice, Global Inequality, and Supply Chain Disruption / Z.Allam, S.E. Bibri, S.A. Sharpe // *Resources*. – 2022. – Vol. 11, Issue 11. DOI: 10.3390/resources11110099.
3. Global coal demand to remain on a plateau in 2025 and 2026 / Coal [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels/coal>.
4. Control of contour evolution, burn rate variation, and reaction channel formation in coal gasification / R.Dychkovskiy, V.Falshtynskiy, P.Saik and other // *Sci Rep*. – 2025. – Issue 15. DOI: 10.1038/s41598-025-93611-3.
5. Kostür K. Some influences of underground coal gasification on the environment / K.Kostür, M.Laciak, M.Durdan // *Sustainability*. – 2018. – Issue 10. DOI: 10.3390/su10051512.
6. Laouafa F. Overview and modeling of mechanical and thermomechanical impact of underground coal gasification exploitation / F.Laouafa, R.Farret, S.Vidal-Gilbert // *Strateg. Glob. Change*. – 2016. – Issue 21. – P. 547–576. DOI: 10.1007/s11027-014-9542-y.
7. Increasing the underground coal gasification efficiency using preliminary electromagnetic coal mass heating / V.Lozynskyi, V.Falshtynskiy, A.Kozhantov and other // *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.* – 2024. – Vol. 1348. DOI: 10.1088/1755-1315/1348/1/012045/.
8. Revisiting the underground gasification of coal reserves from contiguous seams / P.B. Saik, R.O. Dychkovskiy, V.H. Lozynskyi and other // *Науковий вісник НГУ*. – 2016. – № 6. – С. 60–66.
9. Sakhno I. Surface Subsidence Response to Safety Pillar Width Between Reactor Cavities in the Underground Gasification of Thin Coal Seams / I.Sakhno, S.Sakhno, O.Vovna // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17 (6). DOI: 10.3390/su17062533.
10. Research on the surface movement rules and prediction method of underground coal gasification / H.Li, G.Guo, J.Zha and other // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2015. – Vol. 75 (3). – P. 1133–1142. DOI: 10.1007/s10064-015-0809-7.
11. Najafi M. Thermal–mechanical–numerical analysis of stress distribution in the vicinity of underground coal gasification (UCG) panels / M.Najafi, S.M.E. Jalali, R.KhaloKakaie // *International Journal of Coal Geology*. – 2014. – Vol. 134–135. – P. 1–16. DOI: 10.1016/j.coal.2014.09.014.
12. Surface Subsidence Modelling Induced by Formation of Cavities in Underground Coal Gasification / Y.Jiang, B.Chen, L.Teng and other // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14. DOI: 10.3390/app14135733.
13. Zhang C. Compaction characteristics of the caving zone in a longwall goaf: A review / C.Zhang, S.Tu, Y.Zhao // *Environ. Earth Sci.* – 2019. – Vol. 78. DOI: 10.1007/s12665-018-8037-7.
14. Hoek E. Hoek-Brown failure criterion / E.Hoek, C.Carranza-Torres, B.Corkum // *In Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference, NARMS-TAC*, 7–10 July. – Toronto, Canada, 2002. – P. 267–271.
15. Floor Heave Control in Gob-Side Entry Retaining by Pillarless Coal Mining with Anti-Shear Pile Technology / I.Sakhno, S.Sakhno, K.Skrzykowski and other // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14 (12). DOI: 10.3390/app14124992.
16. Song J. Study on the Thermal Expansion Characteristics of Coal during CO₂ Adsorption / J.Song, Y.Sun, Y.Liu // *Processes*. – 2024. – Vol. 12 (6). DOI: 10.3390/pr12061229.
17. Experimental Investigation of the Thermal Expansion Characteristics of Anthracite Coal Induced by Gas Adsorption / R.Wang, X.Su, S.Yu and other // *Adsorption Science & Technology*. – 2023. DOI: 10.1155/2023/5201794.
18. Otto C. Thermo-Mechanical Simulations of Rock Behavior in Underground Coal Gasification Show Negligible Impact of Temperature-Dependent Parameters on Permeability Changes / C.Otto, T.Kempka // *Energies*. – 2015. – Vol. 8 (6). – P. 5800–5827. DOI: 10.3390/en8065800.
19. Sakhno I.G. Identification of material parameters for numerical simulation of the behavior of rocks under true triaxial conditions / I.G. Sakhno, A.V. Molodetskyi, S.V. Sakhno // *Науковий вісник НГУ*. – 2018. – № 5. – С. 48–53.

References:

1. *Ramkova konventsiaa OON pro zminu klimatu* (2021), 31 zhovtnia – 13 lystopada, [Online], available at: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10_add1_adv.pdf
2. Allam, Z., Bibri, S.E. and Sharpe, S.A. (2022), «The Rising Impacts of the COVID-19 Pandemic and the Russia–Ukraine War: Energy Transition, Climate Justice, Global Inequality, and Supply Chain Disruption», *Resources*, Vol. 11, Issue 11, doi: 10.3390/resources11110099.
3. «Global coal demand to remain on a plateau in 2025 and 2026», *Coal*, [Online], available at: <https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels/coal>
4. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Saik, P. et al. (2025), «Control of contour evolution, burn rate variation, and reaction channel formation in coal gasification», *Sci Rep*, Vol. 15, doi: 10.1038/s41598-025-93611-3.
5. Kostür, K., Laciak, M. and Durdan, M. (2018), «Some influences of underground coal gasification on the environment», *Sustainability*, Vol. 10, doi: 10.3390/su10051512.
6. Laouafa, F., Farret, R. and Vidal-Gilbert, S. (2016), «Overview and modeling of mechanical and thermomechanical impact of underground coal gasification exploitation», *Strateg. Glob. Change*, Vol. 21, pp. 547–576, doi: 10.1007/s11027-014-9542-y.

7. Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., Kozhantov, A. et al. (2024), «Increasing the underground coal gasification efficiency using preliminary electromagnetic coal mass heating», *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, Vol. 1348, doi: 10.1088/1755-1315/1348/1/012045/.
8. Saik, P.B., Dychkovskiy, R.O., Lozynskiy, V.H. et al. (2016), «Revisiting the underground gasification of coal reserves from contiguous seams», *Naukovyi visnyk NHU*, No. 6, pp. 60–66.
9. Sakhno, I., Sakhno, S. and Vovna, O. (2025), «Surface Subsidence Response to Safety Pillar Width Between Reactor Cavities in the Underground Gasification of Thin Coal Seams», *Sustainability*, Vol. 17 (6), doi: 10.3390/su17062533.
10. Li, H., Guo, G., Zha, J. et al. (2015), «Research on the surface movement rules and prediction method of underground coal gasification», *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 75 (3), pp. 1133–1142, doi: 10.1007/s10064-015-0809-7
11. Najafi, M., Jalali, S.M.E., KhaloKakaie, R. (2014), «Thermal–mechanical–numerical analysis of stress distribution in the vicinity of underground coal gasification (UCG) panels», *International Journal of Coal Geology*, Vol. 134–135, pp. 1–16, doi: 10.1016/j.coal.2014.09.014.
12. Jiang, Y., Chen, B., Teng, L. et al. (2024), «Surface Subsidence Modelling Induced by Formation of Cavities in Underground Coal Gasification», *Applied Sciences*, Vol. 14, doi: 10.3390/app14135733.
13. Zhang, C., Tu, S. and Zhao, Y. (2019), «Compaction characteristics of the caving zone in a longwall goaf: A review», *Environ. Earth Sci.*, Vol. 78, doi: 10.1007/s12665-018-8037-7.
14. Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002), «Hoek-Brown failure criterion», *In Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference, NARMS-TAC*, 7–10 July, Toronto, Canada, pp. 267–271.
15. Sakhno, I., Sakhn, S., Skrzypkowski, K. et al. (2024), «Floor Heave Control in Gob-Side Entry Retaining by Pillarless Coal Mining with Anti-Shear Pile Technology», *Applied Sciences*, Vol. 14 (12), doi: 10.3390/app14124992.
16. Song, J., Sun, Y., and Liu, Y. (2024), «Study on the Thermal Expansion Characteristics of Coal during CO₂ Adsorption», *Processes*, Vol. 12 (6), doi: 10.3390/pr12061229.
17. Wang, R., Su, X., Yu, S. et al. (2023), «Experimental Investigation of the Thermal Expansion Characteristics of Anthracite Coal Induced by Gas Adsorption», *Adsorption Science & Technology*, doi: 10.1155/2023/5201794.
18. Otto, C. and Kempka, T. (2015), «Thermo-Mechanical Simulations of Rock Behavior in Underground Coal Gasification Show Negligible Impact of Temperature-Dependent Parameters on Permeability Changes», *Energies*, Vol. 8 (6), pp. 5800–5827, doi: 10.3390/en8065800.
19. Sakhno, I.G., Molodetskiy, A.V. and Sakhno, S.V. (2018), «Identification of material parameters for numerical simulation of the behavior of rocks under true triaxial conditions», *Naukovyi visnyk NHU*, No. 5, pp. 48–53.

Сахно Світлана Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, голова циклової комісії з гірництва та електроінженерії ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-3917-9143>.

Наукові інтереси:

- геотехнічна інженерія;
- інженерна геологія;
- підземна газифікація вугілля;
- мінімізація негативних наслідків гірничих робіт на навколишнє середовище.

E-mail: svitlana.sakhno@mipolytech.education.

Сахно Іван Георгійович – доктор технічних наук, завідувач кафедри гірничої справи ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-8592-0572>.

Наукові інтереси:

- удосконалення технологій підземної розробки вугілля;
- гірничо-геомеханіка;
- методи чисельного моделювання геомеханічних процесів у гірському масиві;
- невибухове руйнування гірських порід.

E-mail: ivan.sakhno@mipolytech.education.

Назаренко Валентин Олексійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри гірничої справи ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-7704-9270>.

Наукові інтереси:

- методика виконання маркшейдерських вимірювань;
- процеси зрушення гірських порід і земної поверхні при розробці родовищ корисних копалин;
- геомеханічні процеси навколо підземних гірничих виробок.

E-mail: valentyn.nazarenko@mipolytech.education.

Башинський Сергій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т. Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0002-2945-7683>.

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи;
- енергоощадні технології;
- ресурсозбереження в гірництві;
- CAD/CAE технології моделювання.

E-mail: kgt_bsi@ztu.edu.ua.

Панасюк Андрій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0001-7468-2022>.

Наукові інтереси:

- геодезія;
- підземні гірничі технології;
- маркшейдерська справа;
- фотограмметрія;
- математичні методи обробки інженерно-геодезичних вимірювань.

E-mail: kgt_pav@ztu.edu.ua.

Sakhno S.V., Sakhno I.G., Nazarenko V.O., Bashynskyi S.I., Panasiuk A.V.

Influence of thermomechanical stresses on the variation of protective pillar width during underground coal gasification

This study focuses on assessing the influence of thermomechanical stress on the stability and effective width of protective coal pillars formed between adjacent reactor cavities during underground coal gasification (UCG). The research aims to improve understanding of the geomechanical behavior of coal seams subjected to coupled thermal and mechanical loads within the CRIP (Controlled Retractable Injection Point) configuration. Numerical modeling was carried out using the ANSYS 17.2 software package to simulate the spatial distribution of thermomechanical stresses in the coal pillar under different depth conditions. The Mohr–Coulomb failure criterion was applied to predict potential failure zones and determine the critical stress thresholds responsible for pillar instability. The modeling results revealed that coal seam failure occurring near the injection and production wells leads to a decrease in the effective width of the protective pillar, although the magnitude of this effect is moderate. With increasing seam depth, the extent of thermomechanical damage expands due to rising abutment pressure resulting from roof collapse in the post-gasification stage. The study quantifies the relationship between depth-dependent stress redistribution and pillar degradation under UCG conditions, providing insight into safe pillar design criteria for thin and deep coal seams. The findings can be used to enhance the geomechanical safety assessment of UCG operations and to develop adaptive design parameters for maintaining the integrity of protective pillars during high-temperature underground processes.

Keywords: underground coal gasification (UCG); pillar stability; protective coal pillar; thermomechanical stress; Mohr–Coulomb failure; CRIP method; CAD/CAE modeling.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2025.