

УДК 622.083

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-29>

ГЕОМЕХАНІЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПІДЗЕМНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ НА ОСІДАННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ І СТІЙКІСТЬ ПОКРИВНИХ ПОРІД ВУГЛЕПОРОДНОЇ ТОВЩІ

Сахно Іван Георгійович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-8592-0572

Сахно Світлана Володимирівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-3917-9143

Богомаз Ольга Петрівна,

PhD, доцент,

доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-8521-0394

Андрєєва Антоніна Валеріївна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри екології та природоохоронних технологій

Національний університет карабледування ім. Адмірала Макарова

ORCID ID: 0000-0002-0361-5436

Підземна газифікація вугілля (ПГВ) – це чиста безлюдна технологія видобутку вугілля з великим потенціалом. До основних екологічних небезпек, які стримують широке застосування цієї технології, віднесено високий ризик осідання поверхні, затоплення та забруднення води через тріщинуватість та зміщення порід розкриття над порожнинами реактора. Утворення порожнин внаслідок газифікації спричиняє перерозподіл напружень у навколишніх породах, провокує ріст існуючих тріщин та утворення нових, що призводить до руйнування покрівлі реакторів, непружних деформацій порід покрівлі та притоків підземних вод до реакторів. Для подолання цих проблем важливим є забезпечення стійкості порід над порожнинами реакторів ПГВ.

Роботу присвячено аналізу впливу підземної газифікації вугілля на розкриті породи та земну поверхню. Для моделювання поведінки порід під час газифікації тонкого вугільного пласта застосовувався паралельний метод КПТД та метод скінченних елементів у середовищі ANSYS, що дозволило визначити напружено-деформований стан та температурний розподіл у навколишніх породах. Результати показали, що при збереженні несучої здатності запобіжних ціликів осідання поверхні та переміщення порід залишаються в межах допустимих значень, забезпечуючи мінімальний ризик негативного впливу газифікації на поверхню. Для газифікації пласта товщиною 1,05 м на глибині 392–465 м вертикальні осідання поверхні не перевищували 46 мм при ширині цілика 3,75 м та 27 мм при ширині 15,0 м, а висота зони зміни напружень над порожниною не перевищувала 70 м. Руйнування ціликів між порожнинами вигазовування призводить до істотного збільшення осідань – у 11,7 та 19,9 рази відповідно, що ставить під загрозу суцільність водонесних горизонтів та наземну інфраструктуру.

Ключові слова: підземна газифікація вугілля, стійкість ціликів, просідання поверхні, газифікація тонкого вугільного пласта, ширина запобіжного цілика.

Sakhno Ivan, Sakhno Svitlana, Bohomaz Olha, Andriieva Antonina. Geomechanical analysis of the effect of underground coal gasification on ground settlement and the stability of the overlying strata in a coal-bearing formation

Underground coal gasification (UCG) is a clean, unmanned coal extraction technology with great potential. The main environmental hazards hindering the widespread adoption of this technology include a high risk of surface subsidence, flooding, and water contamination due to the fracturing and displacement of overlying strata above the reactor cavities. The formation of cavities because of gasification causes a redistribution of stresses in the surrounding rock, triggers the growth of existing cracks and the formation of new ones, leading to the collapse of the reactor roof, inelastic deformation of the roof rock, and the inflow of groundwater into the reactors. To address these issues, it is essential to ensure the stability of the rock mass above the UCG reactor cavities.

This study analyzes the impact of underground coal gasification on overlying strata and the Earth's surface. To model the behavior of rocks during the gasification of a thin coal seam, the parallel CMBP method and the finite element method were applied in the ANSYS environment, which made it possible to determine the stress-strain state and temperature distribution in the surrounding rocks. The results showed that, provided the bearing capacity of the safety pillars is maintained, surface subsidence and rock displacement remain within acceptable limits, ensuring a minimal risk of negative impact from gasification on the surface. Under the gasification of a 1.05-meter-thick formation at a depth of 392–465 meters, vertical surface settlements did not exceed 46 mm for a 3.75-meter-wide section and 27 mm for a 15.0-meter-wide pillar, and the height of the stress change zone above the cavity did not exceed 70 meters. The collapse of the pillars between gasification cavities leads to a significant increase in subsidence—by 11.7 and 19.9 times, respectively—which threatens the integrity of aquifers and surface infrastructure.

Key words: *underground coal gasification, pillar stability, surface subsidence, thin coal seam gasification, safety pillar width.*

Вступ. Технологія підземної газифікації вугілля (ПГВ) має більш ніж столітню історію розвитку. Перші згадки про ПГВ відносяться до 1868 року, коли німецький учений та інженер сер Вільям Сіменс запропонував ідею газифікації вугілля безпосередньо в пласті під час виступу перед Британським хімічним товариством. Поштовхом до розробки таких технологій стало суттєве погіршення якості атмосферного повітря у промислових центрах, спричинене масовим спалюванням вугілля в період промислової революції [1].

Перший дослідницький проект ПГВ було реалізовано у Британії на початку ХХ століття, проте через початок Першої світової війни випробування не були завершені. У подальші десятиліття технологія ПГВ активно розвивалася в СРСР, США, країнах Європи та Китаї, де нині реалізується найбільш масштабна програма її впровадження [2]. Загалом у світі було здійснено понад 50 пілотних проектів з ПГВ [3; 4]. Однак, не дивлячись на це, технологія ПГВ досі не набула широкого комерційного застосування через ряд технічних та екологічних проблем [3–5].

Теоретично технологія підземної газифікації вугілля є відносно простою. Проте досвід великих польових випробувань у різних країнах останніх десятиліть демонструє, що ефективна та стабільна експлуатація на практиці є набагато складнішою [6–7]. Кожен майданчик ПГВ є унікальним, а специфічні для нього кон'юговані термо-гідро-хіміко-механічні процеси у породах, прилеглих до реактора, зазвичай погано вивчені в польових умовах через складність кількісної оцінки всіх реакцій і їх впливу на форму та обсяг реактора [8; 9]. Високі температури (>1000 °C) у безпосередній близькості від реактора спричиняють складну термомеханічну поведінку породи та багатофазний потік рідини. Для стабільної роботи ПГВ критично важливо кількісно оцінити геомеханічні реакції, пов'язані з процесом, зокрема зміну проникності, руйнування порід і реактивацію розломів [10; 11].

Окрім технічних питань, що обмежують застосування ПГВ, значну роль відіграють

екологічні небезпеки. Перш за все, існує високий ризик просідання поверхні, затоплення та забруднення води через тріщинуватість та зміщення порід розкриття над порожнинами реактора. Утворення порожнин внаслідок газифікації спричиняє перерозподіл напружень у навколишніх породах, провокує ріст існуючих тріщин та утворення нових, що призводить до руйнування покрівлі реакторів, непружних деформацій порід покрівлі та притоків підземних вод до реакторів.

Для подолання цих проблем важливим є забезпечення стійкості порід над порожнинами реакторів ПГВ. Аналогічно традиційній видобувній практиці з використанням довгих лав, між реакторами ПГВ необхідно залишати захисні цілики. Розміри і несуча здатність ціликів суттєво впливають на розподіл напружень, непружне деформування порід та зсуви товщі порід і зрушення земної поверхні [12]. Окрім цього цілики є бар'єрами, що запобігають гідравлічним зв'язкам між водоносними горизонтами і виробленим простором. Будь-який гідравлічний зв'язок між реакторами ПГВ робить неконтрольованим процес підтримання тиску, температури та балансу маси рідин в процесі газифікації [3]. Таким чином, параметри захисних ціликів одночасно визначають рівень зрушень товщі покривних порід і земної поверхні, а також продуктивність газогенератора.

Наведений аналіз підтверджує важливість геомеханічного обґрунтування параметрів системи «газогенератор-цілик-покривні породи» для забезпечення контрольованого процесу підземної газифікації з одночасним забезпеченням мінімізації її негативного впливу на покривні породи, водоносні горизонти і об'єкти поверхневої інфраструктури. Тому дослідження впливу ширини запобіжних ціликів на розподіл напружень у покривних породах, величину осідань поверхні та переміщення порід над порожнинами реакторів є актуальною науковою задачею, вирішенню якої присвячене наведене дослідження.

Метою роботи є визначення оптимальних параметрів ціликів, що забезпечують безпечну

реалізацію підземної газифікації вугілля, запобігають руйнуванню порід покрівлі, знижують екологічні ризики та одночасно забезпечують ефективне використання ресурсу вугільного пласта.

Методи та методики дослідження. Опис проєкту. У цьому дослідженні було розглянуто метод паралельного керованого переміщення точки дуття (КПТД) (рис. 1). КПТД є найбільш популярним і сучасним методом реалізації ПГВ. В цьому методі шляхом направленою буріння проводяться дві свердловини, що розгортаються паралельно одна одній у вугільному пласті. Дуттєва свердловина використовується для подачі дуттєвої суміші (кисню, повітря, пари, тощо), а газовідвідну використовується для виведення газу на поверхню. Вони з'єднуються між собою в кінцевій точці, утворюючи первинний реакційний канал. Лайнер з пальником на кінці, що знаходиться всередині дуттєвої свердловини, забезпечує контрольоване переміщення точки подачі дуття по мірі вигазування вугілля і падіння якості газу. Цей метод значно більш ефективний за лінійну схему газифікації з послідовним переміщенням вогневого вибою [13; 14].

У цьому дослідженні основним методом дослідження було чисельне моделювання. Було змодельовано кілька порожнин, що утворились в процесі газифікації з застосуванням методу КПТД. Довжина реактора завжди становила 30 м, а ширина цілика змінювалась. Було змодельовано два сценарії: у першому ширина захисного цілика становила 15 м, у другому – 3,75 м (рис. 2б), що відповідає

мінімальним і максимальним значенням раціонального діапазону ширини цілика [15-19]. У першому випадку панель газифікації мала 7 порожнин та 6 ціликів (70% вилучення вугілля), у другому випадку – 9 порожнин та 8 ціликів (90% вилучення вугілля). Над газифікаційною порожниною було змодельовано зону обвалення у формі склепіння висотою 8,4 м, що у 8 разів перевищує потужність вугільного пласта [20; 21]. Вироблений простір був заповнений продуктами горіння та обваленими породами покрівлі.

Метою моделювання було дослідження осідання земної поверхні та переміщення гірничого масиву над порожнинами газифікації при різній ширині ціликів. Окрім означених сценаріїв моделювання включало песимістичний сценарій, який демонстрував геомеханічну ситуацію, яка формується у випадку руйнування захисних ціликів між порожнинами реактора та наслідки такої аварії для стійкості покривних порід і земної поверхні.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження в цій роботі була шахта «Котляревська», яка розташована в західно-південній частині Покровського району Донецької області. Наразі видобуток вугілля на шахті зупинено через окупацію території та руйнування наземної інфраструктури. Запаси вугілля шахти містяться у двох пластах I_1 , який розроблявся у довоєнний період, та k_8 , запаси якого майже вичерпані. Залишкові запаси пласта k_8 оцінюються в 34,6 млн тон кам'яного вугілля тому його доцільно розглядати для реалізації проєкту підземної газифікації.

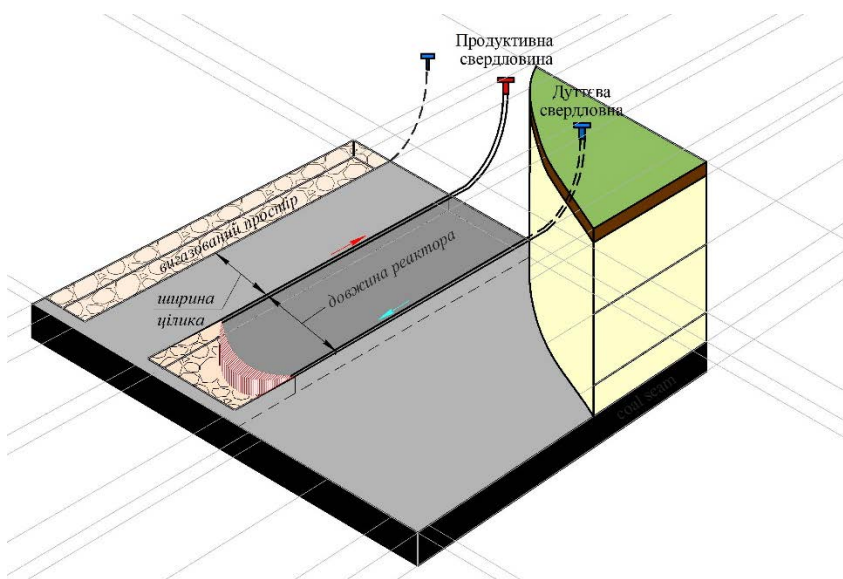


Рис. 1. Метод керованого переміщення точки дуття

Гірничо-геологічні умови шахти типові для південного Донбасу. Потужність вугільного пласта становила 1,05-1,35 м, кут падіння змінювався від 11 до 13 градусів. Безпосередня покрівля вугільного пласта на досліджуваній ділянці представлена слабким аргілітом потужністю до 3,0 м. Основна покрівля – пісковик потужністю до 30 м. Підшова вугільного пласта представлена аргілітом потужністю 3,0 м та алевролітом потужністю до 8,0 м, під яким знаходиться масивний пісковик (Рис. 2а). За панель газифікації вугілля прийнято частину пласта I_1 з довжиною падіння 300 м. Верхня межа згаданої панелі розташована на глибині 392 м, нижня – на глибині 465 м (Рис. 2б).

Гірничий масив у шахтному полі характеризується осадовими відкладеннями пісковиків, алевролітів, аргілітів, вапняків та вугільними пластами. Кам'яновугільна товща знаходиться під чохлам четвертинних та палеоген-неогенових покладів. Палеогенові поклади зустрічаються на кам'яновугільних породах з кутовою невідповідністю і представлені кварцовими пісками, глинами, уламковими породами з прошарками залізистих пісковиків і кварцитів. Неогенові поклади зустрічаються у вигляді окремих масивів у західній та південно-західній частинах Донбасу і представлені переважно глинами та пісками. Четвертинні поклади представлені глинами та суглинками потужністю від 10-20 до 50 м і поширені майже повсюдно.

Опис методу дослідження. Було використано метод скінченних елементів, реалізований у програмному комплексі Ansys, при цьому моделі були тривимірними. На першому етапі моделювання геометричні розміри моделі

становили 900 м у ширину, 620 м у висоту та 100 м у довжину. Бічні межі моделі були зафіксовані від горизонтальних переміщень, нижня межа – від вертикальних, а також враховано дію сили тяжіння.

Шари гірничих порід були об'єднані в групи за критерієм середньозваженої міцності на стиск. Якщо міцність окремого літотипу породи відрізнялася більше ніж на 20% від середнього значення групи, цей літотип виділяли в окрему групу, причому враховувалися лише шари потужністю понад 1,0 м. Після цього процес групування повторювався. Для моделювання поведінки порід використовувалася ортотропна модель, яка дозволяє враховувати анізотропні властивості осадових порід [22-24]. Зміна фізико-механічних властивостей гірничих порід вздовж та впоперек шаруватості визначалася за допомогою калібрувальної числової моделі відповідно до методики, запропонованої Сахно та ін. [25]. Отримані результати калібрування загалом узгоджуються з висновками проф. Ржевського.

Результати.

Песимістичний сценарій. На рис. 3 показано еволюцію вертикальних переміщень у моделі під час покрокового моделювання просідання поверхні та зсуву гірничого масиву над панеллю газифікації. Вертикальний масштаб переміщень на рис. 3 становить 1:20. Відповідно до песимістичного сценарію всі порожнини в панелі були відпрацьовані, а захисні цілики зруйнувалися, не витримавши навантаження. Таким чином, механізми просідання поверхні та переміщення гірничого масиву спрощуються до аналогічних механізмів, характерних для очисного виймання лавами.

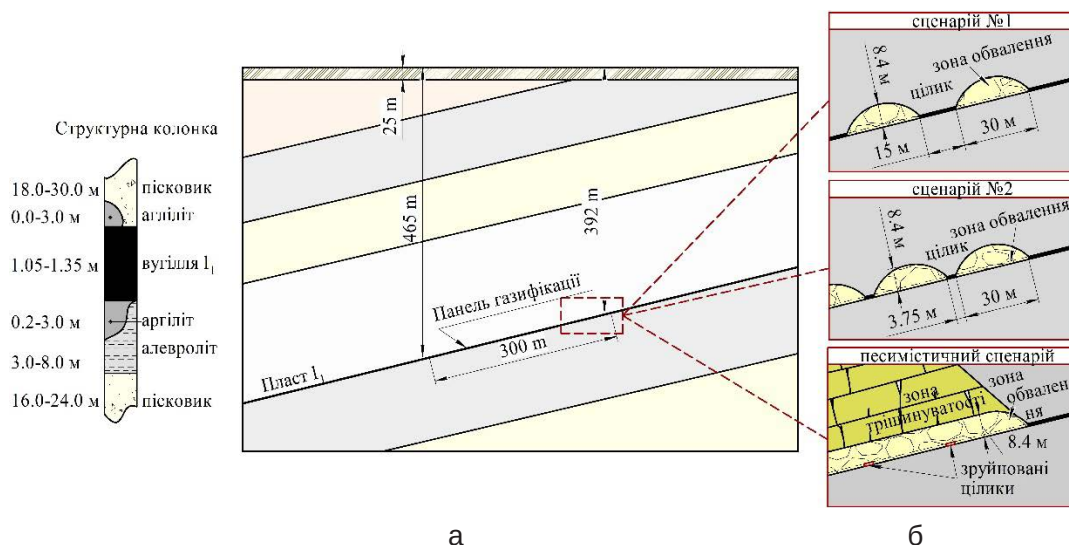


Рис. 2. Геологічні та інженерні умови газифікації:
(а) структурна колонка пласта; (б) схема розташування панелі газифікації

Цю модель було використано для остаточного калібрування властивостей гірничих порід. Для цього результати розрахунку просідання поверхні в моделі порівнювали з результатами моніторингу просідання над південною лавою пласта I₁ шахти «Котляревська». Процедура також описана в роботі [20]. Відповідні графіки просідання поверхні показано на рис. 4. Як видно з рис. 4, після калібрування чисельної моделі графік кривої просідання поверхні близький до кривої просідання, отриманої за результатами моніторингу.

Максимальне вертикальне переміщення в чисельній моделі становить 543 мм, тоді як за даними моніторингу – 550 мм. Ширина мульди осідання в чисельній моделі становить 660 м, а за результатами моніторингу – 630 м.

Точність числової моделі оцінювалася на основі вимірювань похибки. Відсоткова похибка для максимального осідання становила 1,27%, а для ширини мульди осідання – 4,72%.

Отримані показники похибки свідчать про достатню точність моделі.

Вертикальні та горизонтальні переміщення гірського масиву на глибинах 100, 200 і 300 м, а також на поверхні для песимістичного сценарію наведені на рис. 5.

Аналіз результатів моделювання показує, що осідання поверхні та переміщення гірничого масиву перевищують граничні значення, характерні для пружного вигину шарів без їх руйнування. Це свідчить про високий ризик розриву суцільності перекриваючих порід, утворення тріщин над панеллю газифікації, зміни режиму гідрологічного режиму ґрунтових вод та значного притоку води в порожнини газифікації. Таким чином, руйнування ціликів між порожнинами реактора становить загрозу для наземної інфраструктури та стабільності режиму ґрунтових вод, що обумовлює необхідність детального обґрунтування параметрів захисних ціликів при проектуванні технології ПГВ.

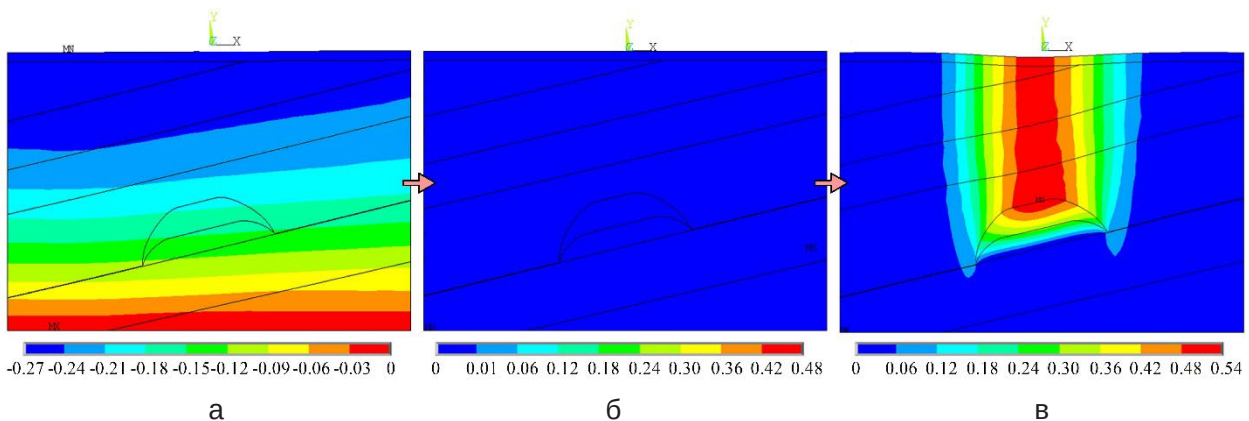


Рис. 3. Еволюція вертикального переміщення в послідовності процесу моделювання за песимістичним сценарієм: (а) Крок 1 (стадія попереднього напруження); (б) Крок 2 (стадія початкового напруження – деформації); (в) Крок 3 (стадія після газифікації)

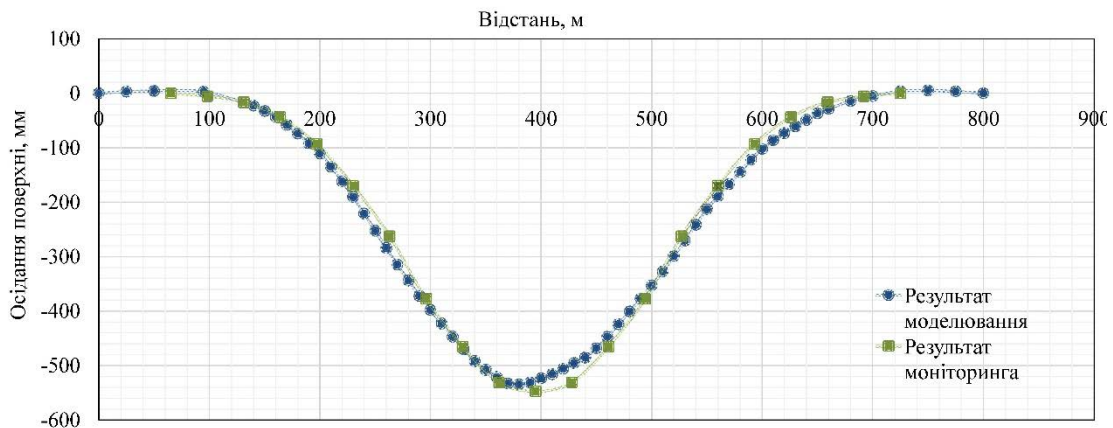


Рис. 4. Просідання поверхні відповідно до результатів моделювання та моніторингу (песимістичний сценарій)

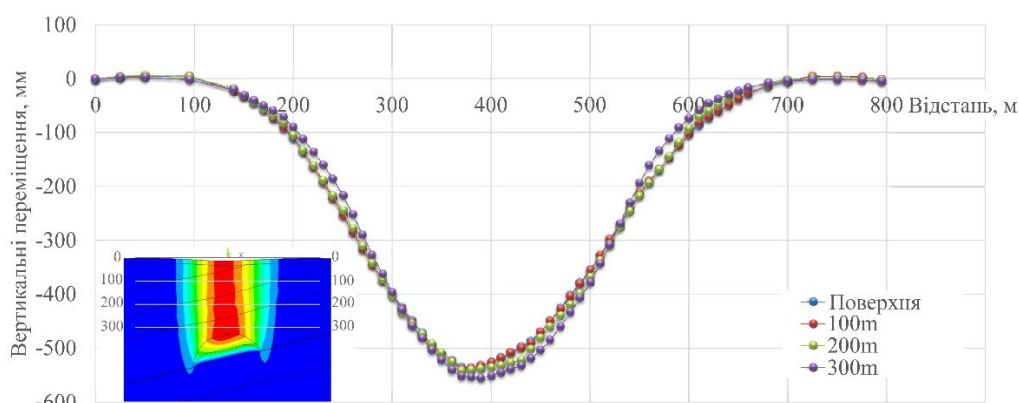
Перший та другий сценарій. На рис. 6 наведено вертикальні переміщення в моделі над панеллю газифікації за сценарієм №1 та сценарієм №2. Вертикальний масштаб переміщень на рис. 6 становить 1:20. Точки максимальних вертикальних переміщень розташовані в центральній частині панелі газифікації. Графіки вертикальних та горизонтальних переміщень поверхні та гірничого масиву на глибинах 100, 200 та 300 м наведені на рис. 7. Аналіз цих графіків показує, що переміщення порід є незначними. Просідання поверхні не перевищує 27 мм у сценарії №1 та 46 мм у сценарії №2, при цьому вертикальне зміщення незначно зростає з глибиною (рис. 7а, в).

В обох сценаріях (№1 і №2) встановлено, що горизонтальні переміщення на поверхні перевищують їх значення на глибині, окрім цього відсутня тенденція до зростання горизонтальних переміщень із глибиною. Як у сценарії №1, так і у сценарії №2, на глибині 100 м горизонтальні переміщення близькі до нуля, далі незначно

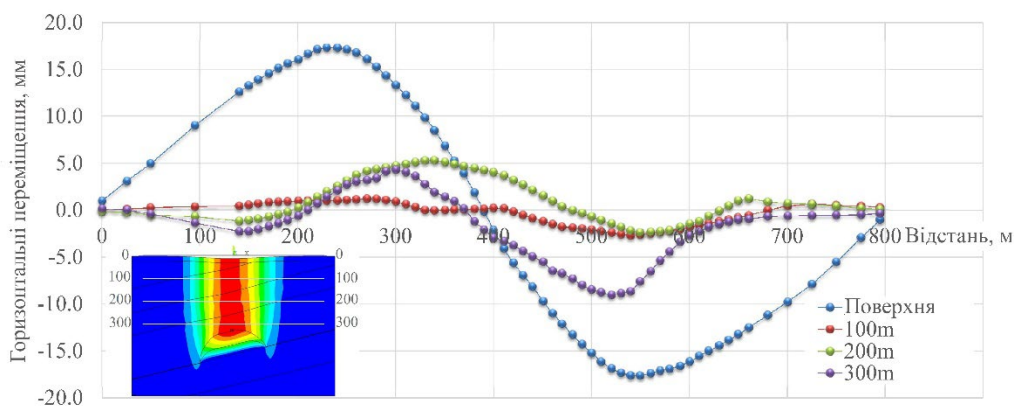
зростають на глибині 200 м і знову зменшуються на глибині 300 м. Вісь переміщень зміщується вправо (у напрямку підняття пластів на глибинах 100-200 м), а потім повертається до початкового положення на глибинах 200-300 м. Отримані результати свідчать про низьку ймовірність утворення тріщин у гірському масиві та на поверхні.

Найбільш інтенсивні переміщення не виходять за межі основної покрівлі (рис. 6). Це також підтверджується аналізом розподілу мінімальних головних напружень (рис. 8). Якщо не враховувати напруження в ціликах на межах панелі газифікації, руйнування гірничого масиву та земної поверхні в обох сценаріях є мало ймовірним, оскільки напруження, що утворюються в породах, значно нижчі за їхню граничну міцність. Напруження на висоті 70 м над панеллю газифікації не відрізняються від напружень у гірничому масиві поза зоною впливу газифікації.

Що стосується напружень у ціликах, їх максимальні значення спостерігаються в центральній



а



б

Рис. 5. Вертикальні (а) та горизонтальні (б) переміщення гірничого масиву і земної поверхні в песимістичному сценарії

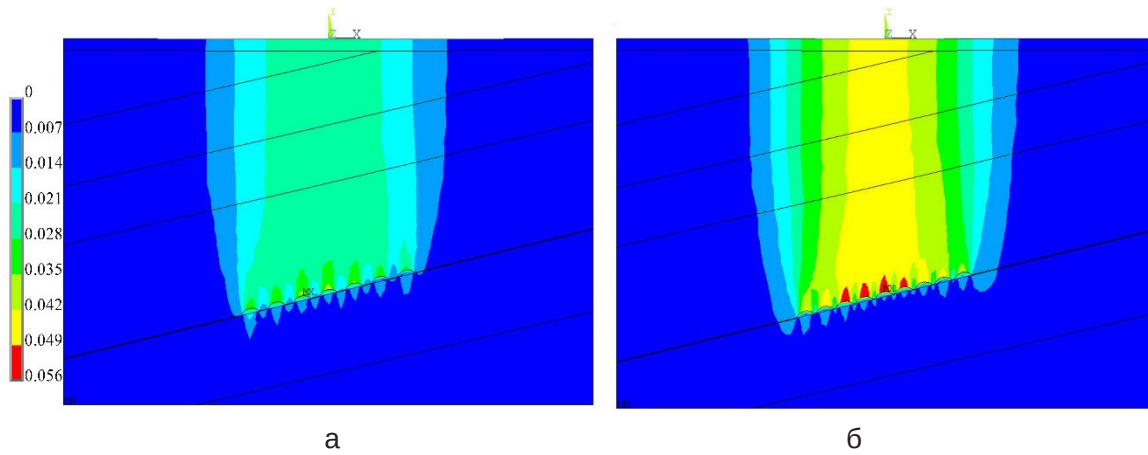


Рис 6. Розподіл вертикальних переміщень: (а) сценарій №1; (б) сценарій № 2

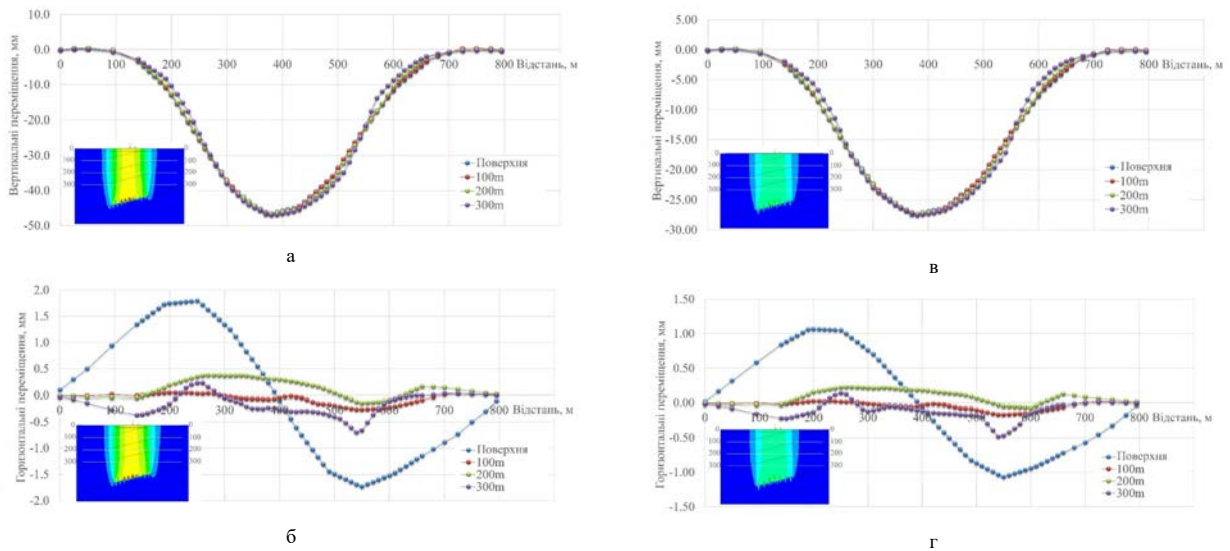


Рис. 7. Вертикальні та горизонтальні зміщення гірських порід та земної поверхні за сценарієм №1 (а, б); сценарієм №2 (в, г)

частині панелі газифікації (рис. 8). За результатами першого етапу моделювання в обох сценаріях напруження перевищують граничну межу міцності гірничих порід. Так, за сценарієм №1 максимальні стискальні напруження становлять 86,6 МПа, а за сценарієм №2 – 109 МПа.

Обговорення. За результатами проведеного аналізу можна зробити наступні висновки. Під час підземної газифікації тонкого вугільного пласта (потужністю 1,05 м) на глибині 392-465 м методом КПТД при довжині вогневого вибою 30 м за сценарієм №1 та сценарієм №2 осідання земної поверхні та переміщення гірничого масиву є незначними. Найбільш інтенсивні переміщення локалізуються над порожниною вигазування в межах основної покрівлі. Аналіз вертикальних та горизонтальних переміщень

свідчить про низьку ймовірність утворення тріщин у гірському масиві та на земній поверхні. Однак, передумовою для цього є забезпечення стійкості ціликів між порожнинами вигазування.

У разі руйнування ціликів між порожнинами вигазування (песимістичний сценарій) існує висока ймовірність виникнення тріщин та руйнування порід розкриву. Аналіз вертикальних та горизонтальних переміщень показує, що в такому випадку осідання поверхні та деформації масиву перевищують граничні значення, характерні для безрозривного вигину шарів. Це створює загрозу для наземної інфраструктури, а також може призвести до руйнування водонесних пісковиків і проривів води в газифікаційні порожнини.

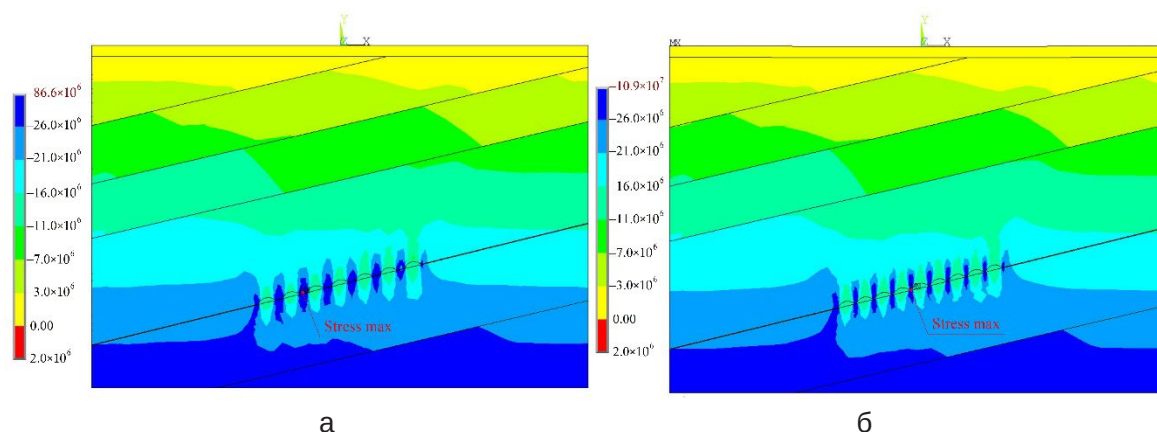


Рис. 8. Розподіл мінімальних головних напружень: (а) сценарій №1; (б) сценарій №2

Максимальні стискаючі напруження локалізуються в ціликах розташованих в центральній частині панелі газифікації, при цьому головні напруження перевищують граничну міцність порід. Водночас для обґрунтованої оцінки стійкості ціликів необхідне більш детальне масштабне дослідження з урахуванням усіх припущень. Таке дослідження буде метою подальших досліджень авторів.

Висновки. Це дослідження зосереджено на визначенні негативного впливу ПГВ на розкривні породи та земну поверхню. Було досліджено підземну газифікацію тонкого вугільного пласта паралельним методом КПТД. Для вивчення напружено-деформованого стану та розподілу температури в навколишніх породах було використано метод скінченних елементів реалізований в ANSYS.

На основі результатів цього дослідження

встановлено, що осідання поверхні та переміщення порід над порожниною вигазовування знаходяться у допустимих межах у випадку збереження несучої здатності запобіжних ціликів. Це забезпечує низьку ймовірність негативного впливу газифікації. Для умов цього дослідження, газифікації вугільного пласта товщиною 1,05 м на глибині 392–465, вертикальні осідання поверхні не перевищувало 46 мм при ширині цілика 3,75 м та 27 мм при ширині цілика 15,0 м. У цьому випадку висота області зміни напружень над порожниною газифікації не перевищує 70 м. Руйнування ціликів між порожнинами вигазовування призводить до збільшення осідання в 11,7 та 19,9 рази для ширини ціликів 3,75 та 15,0 м відповідно. Переміщення розкривних порід збільшується аналогічним чином, що ставить під загрозу суцільність водоносних горизонтів та наземну інфраструктуру.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Klimenko A. Early Ideas in Underground Coal Gasification and Their Evolution. *Energies*. 2009. Vol.2 (2). P. 456–476. <https://doi.org/10.3390/en20200456>
2. Shafirovich E., Varma A. Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2009. Vol. 48, no. 17. P. 7865–7875. <https://doi.org/10.1021/ie801569r>
3. Burton E., Friedmann J., Upadhye R. Best practices in underground coal gasification (Contract No. W-7405-Eng-48). Lawrence Livermore National Laboratory. 2006.
4. Couch G. Underground coal gasification (CCC/151). IEA Clean Coal Centre. 2009.
5. Sarhosis V., Yang D., Sheng Y., Kempka T. Coupled hydro-thermal analysis of underground coal gasification reactor cool down for subsequent CO₂ storage. *Energy Procedia*. 2013. Vol. 40. P. 428–436. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.049>
6. Sury M., White M., Lucas C. Review of underground coal gasification technologies and practices. DTI Cleaner Coal Technology Programme. 2004.
7. Imran M., Kumar D., Kumar N., Qayyum A., Saeed A. Environmental concerns of underground coal gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 31. P. 600–610. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.025>
8. Najafi M., Jalali S. M. E., KhaloKakaie, R. Thermal–mechanical–numerical analysis of stress distribution in the vicinity of underground coal gasification (UCG) panels. *International Journal of Coal Geology*. 2014. Vol. 134. P. 1–16.
9. Sirdesai N. N., Singh R., Singh T. N., Ranjith P. G. Numerical and experimental study of strata behavior and land subsidence in an underground coal gasification project. *Proc. IAHS*. 2016. Vol. 372. P. 455–462. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-455-2015>

10. Akbarzadeh H., Chalaturnyk R. J. Structural changes in coal at elevated temperature pertinent to underground coal gasification: A review. *International Journal of Coal Geology*. 2014. Vol. 131. P. 126–146. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.06.009>
11. Buscheck T. E., Kuder T., Philip R., Kolhatkar R., Klinchuch L. Two-dimensional compound-specific isotope analysis to assess remediation system effectiveness, in situ and on-site bioremediation. *Tenth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium*. Baltimore, MD, United States, 2009.
12. Corkum A. G., Board M. P. Numerical analysis of longwall mining layout for a Wyoming trona mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016. Vol. 89. P. 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijmms.2016.09.001>
13. Seifi M., Chen Z., Abedi J. Large scale simulation of UCG process applying porous medium approach. *Can. J. Chem. Eng.* 2015. Vol. 93. P. 1311–1325. <https://doi.org/10.1002/cjce.22218>
14. Lozynskyi V., Falshtynskyi V., Kozhantov A., Kieush L., Saik P. Increasing the underground coal gasification efficiency using preliminary electromagnetic coal mass heating. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2024. Vol. 1348. P. 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012045/>
15. Wang X., Zhang Q., Yuan L. A coupled thermal-force-chemical-displacement multi-field model for underground coal gas-ification based on controlled retraction injection point technology and its thermal analysis. *Energy*. 2024. Vol. 130614. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130614>
16. Yang D., Sarhosis V., Sheng Y. Thermal–mechanical modelling around the cavities of underground coal gasification. *Journal of the Energy Institute*. 2014. Vol. 87(4). P. 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.029>
17. Zha X.X., Wang H.Y., Cheng S.S. Finite element analysis of the subsidence of cap rocks during underground coal gasification process. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 859. P. 91–94. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.859.91>
18. Lee K., Nam J., Park J., Hong G. Numerical Analysis of Factors Influencing the Ground Surface Settlement above a Cavity. *Materials*. 2022. Vol. 15(23). P. 8301. <https://doi.org/10.3390/ma15238301>
19. Liu X., Xu L., Zhang K. Strata movement characteristics in underground coal gasification (UCG) under thermal coupling and surface subsidence prediction methods. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(8). P. 5192. <https://doi.org/10.3390/app13085192>
20. Sakhno I., Sakhno S., Petrenko A., Barkova O., Kobylanskyi B. Numerical simulation of the surface subsidence evolution caused by the flooding of the longwall goaf during excavation of thin coal seams. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2023. Vol. 1254. P. 012057. <https://doi.org/10.3390/app14135733>
21. Zhang C., Tu S., Zhao Y. Compaction characteristics of the caving zone in a longwall goaf: A review. *Environmental Earth Sciences*. 2019. Vol. 78. P. 27. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8037-7>
22. Barla G. Rock anisotropy: Theory and laboratory testing. *Rock mechanics* / ed. by L. Müller. Springer-Verlag. 1972. P. 131–169.
23. Cazacu O., Cristescu N.D., Sha J.F., Henry J.P. A new anisotropic failure criterion for transversely isotropic solids. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*. 1998. Vol. 3. P. 89–103.
23. Oka F., Kimoto S., Kobayashi H., Adachi T. Anisotropic behavior of soft sedimentary rock and a constitutive model. *Soils and Foundations*. 2002. Vol. 42 (5). P. 59–70.
24. Khanlari G., Rafiei B., Abdilor Y. Evaluation of strength anisotropy and failure modes of laminated sandstones. *Arab J Geosci*. 2015. Vol. 8(5). P. 3089–3102. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1411-1>
25. Sakhno I.G., Molodetskyi A.V., Sakhno S.V. Identification of material parameters for numerical simulation of the behavior of rocks under true triaxial conditions. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. Vol. 5. P. 48–53. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/4>

REFERENCES:

1. Klimenko, A. Y. (2009). Early ideas in underground coal gasification and their evolution. *Energies*, 2(2), 456–476. <https://doi.org/10.3390/en20200456>
2. Shafirovich, E., & Varma, A. (2009). Underground coal gasification: A brief review of current status. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(17), 7865–7875. <https://doi.org/10.1021/ie801569r>
3. Burton, E., Friedmann, J., & Upadhye, R. (2006). *Best practices in underground coal gasification* (Contract No. W-7405-Eng-48). Lawrence Livermore National Laboratory.
4. Couch, G. (2009). *Underground coal gasification* (CCC/151). IEA Clean Coal Centre.
5. Sarhosis, V., Yang, D., Sheng, Y., & Kempka, T. (2013). Coupled hydro-thermal analysis of underground coal gasification reactor cool down for subsequent CO₂ storage. *Energy Procedia*, 40, 428–436. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.049>

6. Sury, M., White, M., & Lucas, C. (2004). *Review of underground coal gasification technologies and practices*. DTI Cleaner Coal Technology Programme.
7. Imran, M., Kumar, D., Kumar, N., Qayyum, A., & Saeed, A. (2014). Environmental concerns of underground coal gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 600–610. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.025>
8. 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*, 134, 1-16
9. Sirdesai, N. N., Singh, R., Singh, T. N., & Ranjith, P. G. (2016). Numerical and experimental study of strata behavior and land subsidence in an underground coal gasification project. *Proc. IAHS*, 372, 455–462. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-455-2015>
10. Akbarzadeh, H., & Chalaturnyk, R. J. (2014). Structural changes in coal at elevated temperature pertinent to underground coal gasification: A review. *International Journal of Coal Geology*, 131, 126–146. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.06.009>
11. Buscheck, T. E., Kuder, T., Philip, R., Kolhatkar, R., & Klinchuch, L. (2009). Two-dimensional compound-specific isotope analysis to assess remediation system effectiveness, in situ and on-site bioremediation. *Paper presented at the Tenth International In Situ and On-Site Bioremediation Symposium*, Battelle Memorial Institute, Baltimore, MD, United States.
12. Corkum, A. G., & Board, M. P. (2016). Numerical analysis of longwall mining layout for a Wyoming trona mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 89, 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.09.001>
13. Seifi, M., Chen, Z., & Abedi, J. (2015). Large scale simulation of UCG process applying porous medium approach. *Can. J. Chem. Eng.* 93, 1311–1325. <https://doi.org/10.1002/cjce.22218>
14. Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., Kozhantov, A., Kieush, L., & Saik, P. (2024). Increasing the underground coal gasification efficiency using preliminary electromagnetic coal mass heating *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1348, 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012045/>
15. Wang, X., Zhang, Q., & Yuan, L. (2024). A coupled thermal-force-chemical-displacement multi-field model for underground coal gas-ification based on controlled retraction injection point technology and its thermal analysis. *Energy*, 130614. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130614>
16. Yang, D., Sarhosis, V., & Sheng, Y. (2014). Thermal–mechanical modelling around the cavities of underground coal gasification. *Journal of the Energy Institute*, 87(4), 321-329. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.029>
17. Zha, X.X., Wang, H.Y., & Cheng, S.S. (2014). Finite element analysis of the subsidence of cap rocks during underground coal gasification process. *Advanced Materials Research*, 859, 91-94. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.859.91>
18. Lee, K., Nam, J., Park, J., & Hong, G. (2022). Numerical Analysis of Factors Influencing the Ground Surface Settlement above a Cavity. *Materials*, 15(23), 8301. <https://doi.org/10.3390/ma15238301>
19. Liu, X., Xu, L., & Zhang, K. (2023). Strata movement characteristics in underground coal gasification (UCG) under thermal coupling and surface subsidence prediction methods. *Applied Sciences*, 13(8), 5192. <https://doi.org/10.3390/app13085192>
20. Sakhno, I., Sakhno, S., Petrenko, A., Barkova, O., & Kobylanskyi, B. (2023). Numerical simulation of the surface subsidence evolution caused by the flooding of the longwall goaf during excavation of thin coal seams. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 1254, 012057. <https://doi.org/10.3390/app14135733>
21. Zhang, C., Tu, S., & Zhao, Y. (2019). Compaction characteristics of the caving zone in a longwall goaf: A review. *Environmental Earth Sciences*, 78, 27. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8037-7>
22. Barla, G. (1972). Rock anisotropy: Theory and laboratory testing. In L. Müller (Ed.), *Rock mechanics* (pp. 131–169). Springer-Verlag.
23. Cazacu, O., Cristescu, N.D., Shao, J.F., & Henry, J.P. (1998). A new anisotropic failure criterion for transversely isotropic solids. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 3, 89-103.
23. Oka, F., Kimoto, S., Kobayashi, H., & Adachi, T. (2002). Anisotropic behavior of soft sedimentary rock and a constitutive model. *Soils and Foundations*, 42 (5), 59-70.
24. Khanlari, G., Rafiei, B., & Abdilor, Y. (2015). Evaluation of strength anisotropy and failure modes of laminated sandstones. *Arab J Geosci.*, 8(5), 3089-3102. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1411-1>
25. Sakhno, I.G., Molodetskyi, A.V., & Sakhno, S.V. (2018). Identification of material parameters for numerical simulation of the behavior of rocks under true triaxial conditions. *Naukovyi Visnyk NHU*, 5, 48–53. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/4>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 08.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026