ISSN 2664-4304

UDC 622.274:622.862.3:334.15
DOI: 10.36804/nndipbop.42-1.2026.40–48
RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ЕНЕРГЕТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ТРИМКОСТІ ОХОРОННИХ СПОРУД ПІДГОТОВЧИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

С. В. Подкопаєв[1], **Д. А.Чепіга**[2*], **Є. С. Подкопаєв**[3], **І. О. Бойко**[4], **О. О. Вісин**[1]

[1] Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна
[2] Івано-Франківський обласний навчально-курсовий комбінат житлово-комунального господарства, Івано-Франківськ, Україна
[3] ТОВ «ВК ЄЛТЕКО», Костянтинівка, Україна
[4] ТзОВ «Волинь Фарм», Луцьк, Україна

* E-mail для листування: daria.chepiha@donntu.edu.ua

Отримано: 10 квітня 2026; ***Прийнято***: 26 травня 2026; *Опубліковано:* 31 травня 2026

Цитувати як: Подкопаєв, С. В., Чепіга, Д. А., Подкопаєв, Є. С., Бойко, І. О., Вісин, О. О. (2026). Енергетичне оцінювання тримкості охоронних споруд підготовчих гірничих виробок. *Проблеми охорони праці в Україні,* 42(1), 40–48

Мета. Обґрунтувати доцільність використання енергетичних показників деформування як інформативної основи для оцінювання тримкості охоронних споруд, прогнозування наближення їх граничного стану та своєчасного запобігання обваленням порід покрівлі в підготовчих виробках на виїмкових ділянках вугільних шахт.

Методологія. Для дослідження деформаційних процесів в охоронних спорудах застосовано масштабні моделі, які знаходилися в умовах одновісного стиснення. Такий підхід дав змогу виконати енергетичне оцінювання тримкості вугільних цілків при поступовому навантаженні, а також закладального матеріалу з подрібненої породи в умовах бічного розширення матеріалу.

Висновки. Експериментально встановлено, що для цілика вугілля характерним є інтенсивне накопичення енергії деформації в межах інтервалу деформацій $\lambda \leq 0{,}29$, що відображає швидку концентрацію енергії в несучому об'ємі тримальної конструкції. У зазначених межах тримкість вугільного цілика забезпечується переважно опором деформуванню та здатністю функціонувати у жорсткішому режимі навантаження. Подальше зростання навантаження, зумовлює розвиток локальних руйнувань. Для подрібненої породи накопичення енергії реалізується в діапазоні деформування $\lambda \leq 0{,}6$ і досягає вищих значень порівняно з цілiком, що зумовлено енергоємними процесами ущільнення та формування стійкого контактного каркаса. На завершальній стадії деформування закладального матеріалу спостерігається більш інтенсивне зростання нормалізованої густини енергії деформації, що свідчить про підвищення опірності тримальної конструкції.

Наслідки досліджень. Одержані результати дають змогу кількісно оцінити тримкість охоронних споруд для своєчасного запобігання обваленням покрівлі шляхом обмеження її переміщень у виробленому просторі виїмкових ділянок, що забезпечує стійкість підготовчих виробок і підвищення безпеки праці гірників.

Оригінальність. Запропоновано єдиний енергетичний підхід до порівняльного оцінювання тримкості охоронних споруд різних типів, який ґрунтується на залежності між нормалізованою густиною енергії деформації та процентним рівнем реалізації тримкості.

Ключові слова: підготовча вирубка, охоронна споруда, тримкість, деформаційний ресурс, густина енергії деформації, обвалення покрівлі.

ENERGY-BASED ASSESSMENT OF THE STABILITY OF PROTECTIVE STRUCTURES FOR PREPARATORY MINE WORKINGS

S. Podkopaiev[1], D. Chepiga[2*], Y. Podkopayev[3], I. Boiko[4], O. Visyn[1]

[1] Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
[2] Ivano-Frankivsk Regional Educational and Course Combine of Housing and Communal Services, Ivano-Frankivsk, Ukraine
[3] MS ELTEKO, LLC, Kostyantynivka, Ukraine
[4] VOLYNFARM, LLC, Lutsk, Ukraine

* E-mail для листування: daria.chepiha@donntu.edu.ua

Received: 10 April 2026; *Accepted:* 26 May 2026; *Published:* 31 May 2026

Cite as: Podkopaiev, S., Chepiga, D., Podkopayev, Y., Boiko, I., Visyn, O. (2026). Energy-based assessment of the stability of protective structures for preparatory mine workings. *LabourProtection Problems in Ukraine*, 42(1), 40–48

Purpose. To substantiate the applicability of deformation energy indicators as an informative basis for assessing the stability of protective structures, predicting their approach to the limiting state, and preventing roof falls in preparatory workings within extraction panels of coal mines.

Methodology. Deformation processes in protective structures were studied using scaled models subjected to uniaxial compression. This approach made it possible to perform an energy-based assessment of the stability of coal pillars under gradual loading, as well as backfill structures composed of crushed rock under conditions allowing lateral expansion of the material.

Findings. The experimental results showed that coal pillars are characterized by intensive accumulation of deformation energy within the deformation range $\lambda \leq 0.29$, which reflects rapid energy concentration within the load-bearing volume of the structure. Within this range, the stability of the coal pillar is mainly governed by its resistance to deformation and its ability to operate under a relatively stiff loading regime. Further loading leads to the initiation and development of local failure. In contrast, crushed rock backfill exhibits energy accumulation within the range $\lambda \leq 0.6$ and reaches higher energy values than the coal pillar due to energy-intensive compaction processes and the formation of a stable contact framework. At the final stage of deformation, the backfill material demonstrates a more pronounced increase in normalized strain energy density, indicating enhanced resistance of the protective structure.

ISSN 2664-4304

Practical implications. The obtained results provide a basis for the quantitative assessment of the stability of protective structures in order to prevent roof falls in a timely manner by limiting roof displacements in the mined-out space of extraction panels, ensuring the stability of preparatory workings, and improving miners' occupational safety.

Originality. A unified energy-based approach is proposed for the comparative assessment of protective structures of different types. The approach is based on the relationship between normalized strain energy density and the percentage level of stability mobilization.

Keywords: preparatory mine working, protective structure, stability, deformation capacity, strain energy density, roof fall.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Вугільні підприємства функціонують у складних гірничо-геологічних та гірничо-технічних умовах. Сучасна вугільна шахта є динамічною геомеханічною системою, ефективність роботи якої значною мірою визначається умовами залягання вугільного пласта, глибиною розробки та властивостями вуглепородного масиву. Із поглибленням гірничих робіт вуглепородний масив з виробками характеризується міцнісною анізотропією, а структура, склад і механічні властивості бічних порід суттєво змінюються в межах виїмкової ділянки. Це зумовлює підвищену небезпеку ведення підземних робіт та зростання рівня травматизму гірників, пов'язаного з обваленнями порід покрівлі.

Механічне травмування гірників унаслідок обвалень порід покрівлі у виробленому просторі виїмкових ділянок залишається ключовою проблемою безпеки. Однією з причин виникнення таких ситуацій є недостатня тримкість охоронних споруд для підготовчих гірничих виробок. Існуючі підходи до її оцінювання недостатньо враховують енергетичну сторону деформування, пов'язану з накопиченням роботи деформації та вичерпання деформаційного ресурсу тримальних конструкцій. За цих умов розроблення деформаційно-енергетичного підходу до оцінювання тримкості охоронних споруд різних типів є актуальним завданням.

Для забезпечення стійкості підготовчих виробок та створення безпечних умов праці на виїмкових ділянках вугільних шахт застосовують різні способи охорони, серед яких є цілики вугілля та штучно створені споруди з подрібненої породи [1, 2]. Перший із них базується на використанні частини вуглепородного масиву як природного несучого елемента, другий - на формуванні штучної опори, здатної сприймати навантаження та обмежувати зміщення бічних порід. Аналіз результатів досліджень свідчить, що обидва підходи можуть забезпечувати стійкість підготовчих виробок та запобігати обваленням покрівлі [3]. Однак їх ефективність визначається різними механізмами формування тримкості охоронних споруд, що значно впливає на обмеження переміщень бічних порід у виробленому просторі вуглепородного масиву. Для вугільних циліків основними чинниками є їх геометричні параметри, напружено-деформований стан, характер концентрації напружень та ступінь руйнування [4]. Для закладальних масивів визначальними є деформаційні властивості первісного матеріалу, здатність до його ущільнення та формування тримкості в умовах зростаючого гірничого тиску [5].

Сучасні дослідження [6, 7] присвячено оцінюванню окремих конструктивних параметрів охоронних споруд або аналізу їх роботи в конкретних гірничо-геологічних умовах. Такий підхід дозволяє обґрунтувати рішення щодо застосування охоронних споруд , проте не забезпечує достатньо універсального критерію для їх різних типів при порівнянні. Особливо це стосується випадків, коли тримкість охоронних споруд формується не лише силовими або деформаційними параметрами, а й накопиченням енергії в процесі навантаження [8].

У зв'язку з цим актуальним є застосування деформаційно-енергетичного підходу до оцінювання тримкості охоронних споруд. Такий підхід дозволяє розглядати тримкість не лише як здатність споруди сприймати навантаження, а і як здатність зберігати працездатний стан у межах певного ресурсу деформування, що супроводжується накопиченням і перерозподілом енергії. Це створює основу для порівняльного оцінювання вугільних циліків і закладальних масивів, а також для обґрунтування умов запобігання обваленням покрівлі та забезпечення стійкості підготовчих виробок на виїмкових ділянках вугільних шахт.

Мета дослідження. Постановка завдання дослідження. Обґрунтувати доцільність використання енергетичних показників деформування як інформативної основи для оцінювання тримкості охоронних споруд, прогнозування наближення їх граничного стану та своєчасного запобігання обваленням порід покрівлі в підготовчих виробках на виїмкових ділянках вугільних шахт.

Для досягнення мети було поставлене завдання дослідити деформаційні властивості охоронних споруд в умовах одновісного стиснення та встановити енергетичні показники їх тримкості.

Матеріали та методи досліджень.

Об'єктом дослідження є деформаційні процеси в охоронних спорудах, що зумовлюють формування їх тримкості в умовах розвантаження вуглепородного масиву під час підтримання підготовчих виробок. Деформаційні процеси в охоронних спорудах досліджували на семи масштабних моделях циліків вугілля та семи моделях закладального матеріалу з подрібненої породи в умовах одновісного стиснення. Розміри експериментальних моделей становили: висота $h_0 = 0{,}04$ *м*, ширина *0,04 м*, довжина *0,08 м*, геометричний масштаб моделювання 1:25.

Для вугільних циліків у моделях використовували коксове вугілля марки *К* густиною *1420 кг/м*^{3}, коефіцієнт поперечної деформації $\nu = 0{,}3$. Для закладального матеріалу використовували подрібнений піщано-глинистий сланець густиною *2438 кг/м*^{3}, гранулометричний склад *(0,1-5) мм*.

Зразки по контуру посилювали шістьома дерев'яними стояками діаметром *0,05 м* та розміщували між плитками з піщано-цементної суміші (σ_{cm} » *38 МПа*), що імітували покрівлю і підошву.

Навантаження здійснювали на пресі ГП-50, а на кожному етапі поступового навантаження реєстрували деформацію моделі *Δh (м)* та відповідне навантаження *F (кН)*. Для спрощення знехтували деформацією випробувального обладнання та силами тертя.

Відносну деформацію λ експериментальних зразків визначали за виразом

$$l = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot \qquad (1)$$

Механічне напруження *σ (МПа)* дорівнює тиску та визначалось як

$$s = \frac{F}{S}, \qquad (2)$$

ISSN 2664-4304

де S – площа поперечного перетину експериментального зразка, $м^2$.

Густину енергії деформації U *(МДж/м³)* визначали за діаграмою «напруження – відносна деформація» як питому механічну роботу деформування, тобто як площу під кривою $\sigma(\lambda)$ від початку навантаження до поточного значення деформації. У загальному вигляді формула має вигляд

$$U = \int_0^l \sigma \, d\lambda \,. \qquad (3)$$

Оскільки експериментальні дані були задані дискретно, густину енергії деформації обчислювали чисельним методом трапецій.

$$U_i = U_{i-1} + \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2}(\lambda_i + \lambda_{i-1}), \qquad (4)$$

де U_i накопичена густина деформації на i-му кроці;

σ_i, σ_{i-1} – сусідні значення механічного напруження;

λ_i, λ_{i-1} – приріст відносної деформації.

Для оцінювання інтенсивності енергетичних змін у процесі деформування охоронних споруд, використовували показник швидкості зміни нормалізованої густини енергії деформації $d(U/U_{гр}) / d(\lambda/\lambda_{гр})$. Цей показник характеризує темп зміни нормалізованої густини енергії залежно від ступеня реалізації деформаційної здатності охоронних споруд. Для дискретних експериментальних даних показник визначали різницевим методом як відношення приросту $U/U_{гр}$ до приросту $\lambda/\lambda_{гр}$ між сусідніми точками. Нормалізовану відносну деформацію визначали як $\lambda/\lambda_{гр}$, а нормалізовану густину енергії деформації – як $U/U_{гр}$, де λ_i і U_i є поточними значеннями відповідних параметрів, а $\lambda_{гр}$ і $U_{гр}$ – граничні значення деформаційного та енергетичного показників, що характеризують межу реалізації тримкості охоронної споруди. Використання цих безрозмірних характеристик дало змогу усунути вплив абсолютних значень деформаційних та енергетичних параметрів і привести охоронні споруди різного типу до єдиної шкали порівняння. Це дає змогу оцінювати ступінь їх реалізації та зіставляти різні охоронні споруди за однакового рівня наближення до межі реалізації тримкості.

Для узагальненого опису процесу деформування охоронних споруд доцільно використовувати залежність нормалізованої густини енергії деформації $U/U_{гр}$ від процентного рівня реалізації $X = \lambda/\lambda_{гр}$ *100%* їх тримкості. Вибір параметра $U/U_{гр}$ обумовлений тим, що густина енергії деформації є інтегральною характеристикою, яка відображає накопичену роботу деформування та дозволяє зіставляти охоронні споруди різної природи за єдиним енергетичним показником. Нормалізація за граничним значенням $U_{гр}$ усуває вплив абсолютного рівня енергоємності матеріалу і дає змогу оцінювати ступінь наближення охоронної споруди до граничного стану. Використання по осі абсцис саме процентного рівня реалізації тримкості охоронних споруд, а не безпосередньо відношення $\lambda/\lambda_{гр}$ обґрунтовується тим, що така форма подання має більш наочний фізичний та інженерний зміст. Вона безпосередньо показує ступінь реалізації тримкості охоронної споруди: $X = 0$ *%* відповідає початковому стану, а $X = 100$ *%* – граничному рівню її реалізації. За $X > 100$ *%* характер деформування змінюється, у зв'язку з чим післяграничну область доцільно розглядати окремо. На відміну від безрозмірного відношення $\lambda/\lambda_{гр}$, процентне подання полегшує інтерпретацію результатів, спрощує порівняння різних охоронних споруд і дає змогу аналізувати зміну їх енергетичних показників залежно від рівня реалізації тримкості.

Інтенсивність енергетичних змін у процесі деформування охоронних споруд оцінювали за швидкістю зміни нормалізованої густини енергії деформації залежно від процентного рівня реалізації їх тримкості. Такий підхід дає змогу характеризувати не лише поточний рівень накопиченої енергії, а й темп її зміни в міру наближення охоронної споруди до граничного стану.

Швидкість зміни нормалізованої густини енергії деформації розглядали як похідну

$$\frac{d(U/U_{гр})}{dX},$$

яка відображає зміну нормалізованої густини енергії деформації при збільшенні рівня реалізації тримкості охоронної споруди на *1 %*. За фізичним змістом цей показник характеризує інтенсивність енергетичної реалізації тримкості. Зі зростанням його значення підвищується інтенсивність накопичення нормалізованої густини енергії деформації в процесі поступового навантаження охоронної споруди.

Оскільки експериментальні дані мають дискретний характер, швидкість зміни визначали за різницевою схемою, як відношення приросту нормалізованої густини енергії деформації до приросту процентного рівня реалізації тримкості між сусідніми експериментальними точками

$$V_i = \frac{(U/U_{гр})_{i+1} - (U/U_{гр})_i}{X_{i+1} - X_i}. \qquad (5)$$

У рівнянні (5) V_i є середньою швидкістю зміни показника на відповідному інтервалі навантаження. Такий розрахунок дозволяє простежити зміну інтенсивності накопичення енергії на різних рівнях реалізації тримкості охоронних споруд.

Проведені експерименти є частиною комплексного дослідження деформаційних процесів у охоронних спорудах підготовчих гірничих виробок [3, 8].

Результати досліджень.

Статистичний аналіз результатів деформування семи моделей вугільного цілика та семи моделей закладального матеріалу з подрібненої породи в умовах одновісного стиснення підтвердив високу відтворюваність експериментальних даних. Коефіцієнт варіації деформацій становив *2,7–9,9 %*, а t-критерій Стьюдента не виявив статистично значущих відмінностей між моделями на рівні значущості $p = 0,05$. Це дало підстави вважати дослідні серії однорідними та обґрунтувало використання однієї репрезентативної моделі для подальшого аналізу кожного типу охоронних споруд. Аналіз коробкових діаграм деформацій Δh показав, що для вугільного цілика при $F \le 50$ *кН* деформування відбувається у статистично стійкому режимі, тоді як при $F > 50$ *кН* спостерігається різке розширення інтерквартильного розмаху та загального діапазону значень деформацій, що прийнято як статистичну ознаку досягнення граничного стану, якому відповідає граничне значення відносної деформації $\lambda_{гр} = 0,29$. Для закладального матеріалу з подрібненої породи в інтервалі $F = 10–100$ *кН* деформації мають статистично закономірний характер, що відповідає стадії ущільнення та структурної перебудови матеріалу. Граничне значення $\lambda_{гр} = 0,6$, досягнуте при $F = 110$ *кН*, відповідає межі завершення цієї стадії, а подальша стабілізація характеру деформування свідчить про формування стійкої контактної структури та перехід матеріалу у стан структурного зміцнення. Узагальнені значення граничного навантаження та граничної відносної деформації для досліджуваних охоронних споруд наведено в табл. 1.

ISSN 2664-4304

Таблиця 1 – Граничні параметри деформування охоронних споруд, визначені за статистичним аналізом

Тип охоронної споруди	Статистична ознака досягнення граничного стану	F, кН	$\lambda_{гр}$
Вугільний цілик	Різке зростання варіабельності деформацій, розширення інтерквартильного розмаху та загального діапазону значень	понад 50	0,29
Закладальний матеріал з подрібненої породи	Завершення стадії статистичного закономірного ущільнення та структурної перебудови матеріалу	110	0,6

Проведений статистичний аналіз коробкових діаграм підтвердив можливість використання варіабельності деформацій як об'єктивного критерію визначення граничного стану охоронних споруд різного типу.

У табл. 2 наведено деформаційно-енергетичні показники одновісного стиснення вугільного цілика.

Таблиця 2 – Деформаційно-енергетичні параметри та швидкість зміни нормалізованої густини енергії деформації цілика вугілля в умовах одновісного стиснення

№№ з/п	F, кН	Δh, м	λ	$\frac{l}{l_{гр}}$	X, %	U, МДж/м^3	$U/U_{гр}$	$\frac{d(U/U_{гр})}{d(l/l_{гр})}$	$\frac{d(U/U_{гр})}{dX}$
1	5	0,0006	0,015	0,06172	5,17	0,012	0,0049	0,19486	0,00195
2	10	0,0014	0,035	0,12069	12,07	0,06	0,0243	0,36446	0,00364
3	15	0,002	0,05	0,17241	17,24	0,117	0,0474	0,47438	0,00474
4	20	0,0025	0,0625	0,21552	21,55	0,184	0,0746	0,55943	0,00559
5	25	0,0035	0,0875	0,30172	30,17	0,357	0,1447	0,71735	0,00717
6	30	0,0045	0,1125	0,38793	38,79	0,558	0,2262	0,86375	0,00864
7	35	0,0057	0,1425	0,49138	49,13	0,834	0,3381	1,02862	0,01029
8	40	0,008	0,2	0,68966	68,96	1,424	0,5772	1,32144	0,01321
9	50	0,0116	0,29	1,0	100,0	2,467	1,00	1,73900	0,01739

У табл. 3 наведено деформаційно-енергетичні показники одновісного стиснення закладального масиву з подрібненої породи.

Таблиця 3 - Деформаційно-енергетичні параметри та швидкість зміни нормалізованої густини енергії деформації закладального матеріалу з подрібненої породи в умовах одновісного стиснення

№№ з/п	F, кН	Δh, м	λ	$\frac{l}{l_{гр}}$	X, %	U, МДж/м^3	$U/U_{гр}$	$\frac{d(U/U_{гр})}{d(l/l_{гр})}$	$\frac{d(U/U_{гр})}{dX}$
1	10	0,003	0,075	0,12500	12,50	0,129	0,0172	0,24608	0,00246
2	20	0,007	0,175	0,29167	29,16	0,578	0,0771	0,57907	0,00579
3	30	0,009	0,225	0,37500	37,50	0,933	0,1245	0,74639	0,00746
4	50	0,012	0,3	0,50000	50,00	1,761	0,2351	0,99806	0,00998
5	70	0,016	0,4	0,66667	66,66	3,379	0,4510	1,33458	0,01335
6	80	0,02	0,5	0,83333	83,33	5,297	0,7070	1,67195	0,01672
7	100	0,022	0,55	0,91667	91,66	6,212	0,8292	1,84090	0,01841
8	110	0,024	0,600	1,0	100,0	7,492	1,0000	2,01000	0,02010

Аналіз даних, наведених у табл. 2, та 3 свідчить, що для обох охоронних споруд густина енергії деформації зростає зі збільшенням відносної деформації, однак характер цього зростання є різним. Для цілика вугілля в межах $\lambda = 0{,}015–0{,}29$ значення U збільшується від *0,012* до *2,467 МДж/м³*, що вказує на інтенсивне накопичення енергії в міру наближення до граничного стану. Для подрібненої породи в інтервалі $\lambda = 0{,}075–0{,}60$ густина енергії деформації зростає від *0,129* до *7,492 МДж/м³*, що відображає енергоємний процес ущільнення та структурної перебудови зернистого матеріалу. Наведені в табл. 2 та 3 дані свідчать про різні механізми формування тримкості досліджуваних охоронних споруд.

На рис. 1 наведено графіки зміни нормалізованої густини енергії деформації $U/U_{гр}$ від процента реалізації тримкості X, % охоронних споруд.

З наведених графіків встановлено, що для обох охоронних споруд нормалізована густина енергії деформації $U/U_{гр}$ зростає зі збільшенням процента використання їх тримкості X від 0 до 100 %. Обидві криві мають нелінійний вихідний характер і в граничній точці сходяться до значення $X = 100$ % та $U/U_{гр} = 1{,}0$, що відповідає досягненню граничного стану (рис. 1, крива 1, 2).

ISSN 2664-4304

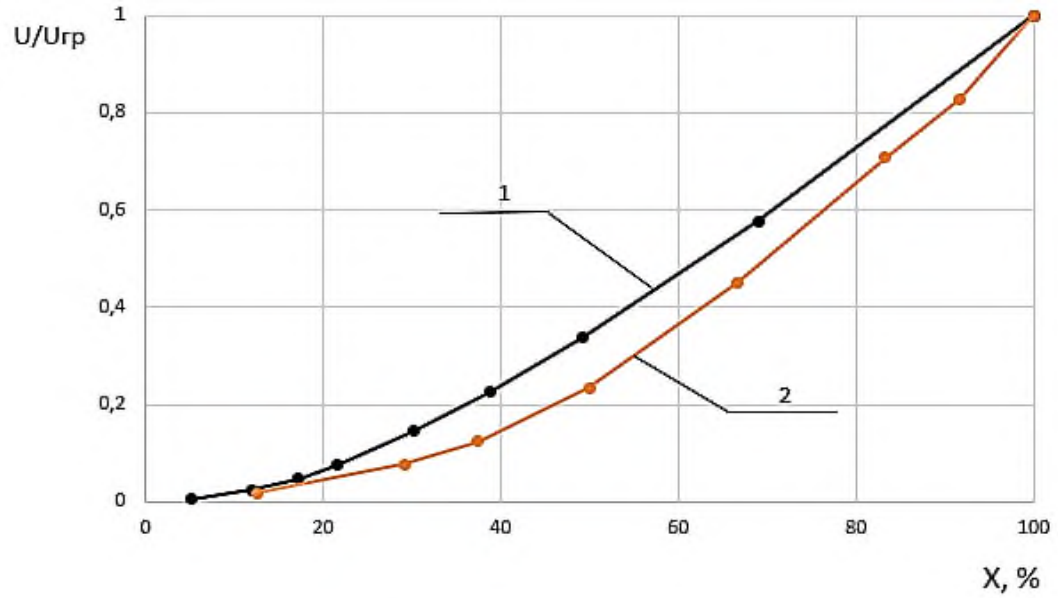


Рисунок 1 - Графіки зміни нормалізованої густини енергії деформації $U/U_{гр}$ від процента реалізації тримкості X, % охоронних споруд при їх поступовому навантаженні в умовах одновісного стиснення:
1 - вугільний цілик; 2 - закладальний матеріал з подрібненої породи

Для узагальнення виявлених закономірностей зміни нормалізованої густини енергії деформації залежно від процента реалізації тримкості, експериментальні дані апроксимовано степеневими залежностями. Для цілика вугілля залежність описується рівнянням (рис. 1, крива 1)

$$\frac{U}{U_{гр}} = \left(\frac{X}{100}\right)^{1,739} \quad (6)$$

з коефіцієнтом детермінації $r^2 = 0,992$.

Для подрібненої породи залежність описується рівнянням (рис. 1, крива 2)

$$\frac{U}{U_{гр}} = \left(\frac{X}{100}\right)^{2,010} \quad (7)$$

з коефіцієнтом детермінації $r^2 = 0,999$.

Апроксимацію експериментальних даних застосовано для виявлення узагальненої закономірності зміни досліджуваного показника, зменшення впливу випадкового розкиду значень та подання процесу у вигляді аналітичної залежності, придатної для кількісного порівняння та фізичної інтерпретації. Встановлено, що за однакового відсотка реалізації тримкості вугільний цілик накопичує більшу частку граничної густини енергії деформації, ніж закладальний матеріал з подрібненої породи. Так, при $X = 12$ % значення $U/U_{гр}$ становлять *0,0243* для цілика і *0,0172* для подрібненої породи, а при $X = 50$ % – відповідно *0,3381* і *0,2350*. У діапазоні $X = 67–69$ % ці показники дорівнюють *0,5772* і *0,4510*, що також підтверджує більш інтенсивне накопичення енергії у вугільному цілику на ранніх і середніх стадіях деформування. Степеневий характер залежностей свідчить про нерівномірність накопичення нормалізованої густини енергії деформації в процесі реалізації тримкості охоронних споруд. Показник степеня k у рівняннях (6) і (7), визначений за експериментальними даними, відображає характер енергонакопичення та може розглядатися як кількісна характеристика типу охоронної споруди.

Для вугільного цілика при $k = 1,739$ накопичення енергії відбувається інтенсивніше вже на початкових стадіях деформування, тоді як для подрібненої породи при $k = 2,010$ цей процес на початку є менш вираженим, але суттєво посилюється в міру наближення до граничного стану. Отримані залежності свідчать, що для вугільного цілика характерне більш раннє залучення енергетичного потенціалу деформування. Це вказує на концентраційний характер накопичення енергії, за якого відносно значна її частка акумулюється вже на початкових і середніх стадіях реалізації тримкості.

Для закладального матеріалу з подрібненої породи, навпаки, спостерігається уповільнене початкове зростання енергетичного показника, що зумовлено переважанням процесів ущільнення, структурної перебудови дисперсного середовища та формуванням контактного каркаса. Унаслідок цього основна частина енергії деформації накопичується на завершальній стадії навантаження.

З аналізу наведених степеневих залежностей випливає, що відмінність між охоронними спорудами проявляється не лише у величині нормалізованої густини енергії деформації, а й у самому механізмі її накопичення при реалізації тримкості. Менше значення показника степеня для вугільного цілика відповідає більш ранньому енергонакопиченню, тоді як більше значення цього показника для подрібненої породи відображає відкладений характер реалізації енергетичного потенціалу з його інтенсифікацією поблизу граничного стану. Крім того, отримані криві є опуклими вгору, що вказує на прискорюваний характер накопичення нормалізованої густини енергії деформації в міру вичерпання тримкості охоронної споруди. Це означає, що наближення до граничного стану супроводжується не лінійним, а все більш інтенсивним приростом енергетичного показника, який може бути використаний як інформативна діагностична ознака небезпечного стану. Отримані результати свідчать, що встановлені залежності мають не лише описне, а й узагальнювальне значення, оскільки дають змогу кількісно порівнювати процес реалізації тримкості охоронних споруд різного типу в єдиній безрозмірній формі.

На рис. 2 наведено графіки швидкості зміни нормалізованої густини енергії деформації від процента реалізації тримкості охоронних споруд.

ISSN 2664-4304

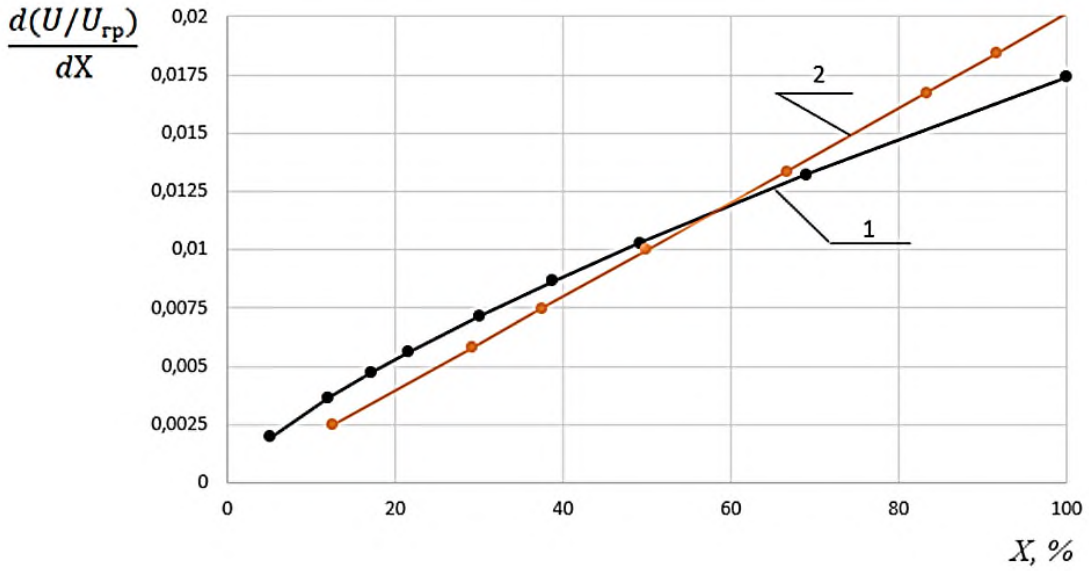


Рисунок 2 - Графіки швидкості зміни нормалізованої густини енергії деформації $d(U/U_{гр})/dX$ від процента реалізації тримкості *X, (%)* охоронних споруд:
1 – вугільний цілик; 2 – закладальний матеріал з подрібненої породи

Аналіз кривих швидкості зміни нормалізованої густини енергії деформації показав, що для обох охоронних споруд зі збільшенням процента реалізації тримкості *X* показник $d(U/U_{гр})/dX$ монотонно зростає (рис. 2, криві 1, 2). Для вугільного цілика його значення збільшується від *0,00195* при *X = 5,17 %* до *0,01739* при *X = 100 %*, тобто у 8,9 рази (рис. 2, крива 1). Для подрібненої породи цей показник зростає від *0,00246* при *X = 12,5 %* до *0,02100* при *X = 100 %*, тобто у 8,2 рази (рис. 2, крива 2). Це свідчить про прискорення енергетичної реалізації тримкості в міру наближення охоронних споруд до граничного стану.

Встановлено, що на початковій і середній стадіях реалізації тримкості, для вугільного цілика характерна вища швидкість зміни нормалізованої густини енергії деформації порівняно з подрібненою породою. Так, при *X = 17,24 %* і *21,55 %* для цілика значення $d(U/U_{гр})/dX$ становить відповідно *0,00474* і *0,00559*, тоді як для подрібненої породи при X=12,5% і 29,17 % – *0,00246* і *0,00579*. У середній області реалізації тримкості ця відмінність також зберігається: при *X = 38,79 %* для цілика значення показника дорівнює *0,00864*, а для подрібненої породи при *X = 37,5 % – 0,00746*; при *X = 49,14%* і *50,0%* відповідно *–0,01029* і *0,00998*. Отримані результати свідчать, що на ранніх і середніх стадіях реалізації тримкості вугільний цілик характеризується більш інтенсивним накопиченням нормалізованої густини енергії деформації, ніж подрібнена порода.

Для подрібненої породи на початкових стадіях швидкість зміни $d(U/U_{гр})/dX$ є меншою, що обумовлено переважанням процесів ущільнення, перепорядкування частинок і формування контактного каркасу зернистого середовища. Наприклад, при *X = 12,5 %* значення показника для подрібненої породи становить *0,00246*, тоді як для цілика вже при *X = 12,07 % – 0,00364*, тобто приблизно у 1,48 рази більше. При *X = 30%* для цілика $d(U/U_{гр})/dX = 0,00717$, а для подрібненої породи при *X = 29,17 % – 0,00579*, тобто для цілика воно більше приблизно у 1,24 рази (рис. 2, криві 1, 2). Це свідчить про те, що на цій стадії частина здатності подрібненої породи до деформування реалізується переважно через структурну перебудову, а не через інтенсивне накопичення енергії.

Особливе значення має точка перетину кривих (рис. 2, криві 1, 2).

Оскільки

$$\frac{U}{U_{гр}} = \left(\frac{X}{100}\right)^{k},$$

то після диференціювання маємо

$$\frac{d(U/U_{гр})}{dX} = \frac{k}{100}\left(\frac{X}{100}\right)^{k-1}. \qquad (8)$$

Цей підхід ґрунтується на стандартному правилі диференціювання степеневої функції.

Точку перетину кривих визначали з умови рівності швидкості зміни нормалізованої густини енергії деформації для обох охоронних споруд

$$0,01739\left(\frac{X}{100}\right)^{0,739} = 0,02010\left(\frac{X}{100}\right)^{1,010}.$$

Розв'язання цього рівняння дає *X = 58,6 %*, що відповідає однаковій інтенсивності накопичення нормалізованої густини енергії деформації для вугільного цілика і подрібненої породи. У цій точці $d(U/U_{гр})/dX \approx 0,0117$. До цієї точки більш інтенсивне накопичення енергії характерне для вугільного цілика, а після неї - для подрібненої породи (рис. 2, криві 1, 2).

Після точки перетину при *X* = 66,67% для подрібненої породи $d(U/U_{гр})/dX=0,01335$, тоді як для цілика при значенні *X = 68,97 % – 0,01321*, значення вже практично однакові. Далі розбіжність збільшується і для подрібненої породи при *X* = 83,33 % показник становить 0,01672, тоді як для цілика навіть при *X = 68,97 %* він дорівнює 0,01321. Поблизу граничного стану різниця стає виразнішою, тобто при *X = 91,67 %* для подрібненої породи $d(U/U_{гр})/dX=0,01841$, а для цілика при *X = 100 % – 0,01739*. У самій граничній точці *X = 100 %* для подрібненої породи показник дорівнює 0,02010, що приблизно у 1,16 рази більше ніж для вугільного цілика (0,01739) (рис. 2, криві 1, 2). Це свідчить про більш різке прискорення накопичення нормалізованої густини енергії деформації в закладальному матеріалі на завершальній стадії реалізації тримкості.

ISSN 2664-4304

Обговорення результатів.

У результаті виконаних досліджень розроблено підхід до енергетичного оцінювання тримкості охоронних споруд підготовчих гірничих виробок. Одержані результати дають змогу кількісно оцінювати їх тримкість, своєчасно виявляти наближення до граничного стану, запобігати обваленням порід покрівлі та забезпечувати стійкість підготовчих виробок. Значення $\lambda = 0{,}29$ для вугільного цілика та $\lambda = 0{,}6$ для подрібненої породи прийнято як граничні на підставі статистичного критерію, а саме за зміною варіабельності деформацій з урахуванням коробкових діаграмам (табл. 1). Для вугільного цілика досягнення $\lambda = 0{,}29$ супроводжується різким розширенням інтерквартильного розмаху та загального діапазону деформацій. Для подрібненої породи значення $\lambda = 0{,}6$ відповідає межі, до якої варіабельність деформацій зберігає статистично закономірний характер. Це дає підстави розглядати зазначені значення λ як межі переходу від стійкого режиму деформування до стану, близького до граничного.

За даними табл. 2 і 3 встановлено, що зміна густини енергії деформації залежно від відносної деформації для досліджуваних охоронних споруд відбувається по-різному. Для вугільного цілика (табл. 2) інтенсивне зростання густини енергії деформації відбувається в межах відносно невеликого інтервалу деформацій, обмеженого значенням $\lambda = 0{,}29$. Для подрібненої породи (табл. 3), навпаки, енергія накопичується в ширшому інтервалі деформації до $\lambda = 0{,}6$ і досягає вищих абсолютних значень. Це свідчить про різні енергетичні сценарії формування тримкості охоронних споруд. Для вугільного цілика характерне більш раннє накопичення енергії в межах коротшого інтервалу деформування, тоді як для подрібненої породи – поступове накопичення енергії в ширшому інтервалі деформації. Такий характер зміни показників можна пояснити тим, що тримкість вугільного цілика забезпечується переважно опором деформуванню і здатністю сприймати навантаження в жорсткішому режимі, тоді як для подрібненої породи істотну роль відіграють ущільнення, структурна перебудова та акумулювання енергії ущільнення.

Апроксимацією експериментальних даних встановлено універсальні степеневі залежності (6), (7) між нормалізованою густиною енергії деформації та процентним рівнем використання тримкості охоронних споруд. Показник степеня k у цих залежностях визначено за експериментальними даними. Відмінність його значень для вугільного цілика і подрібненої породи відображає різний характер накопичення енергії деформації у процесі реалізації тримкості. Це дає підстави розглядати показник степеня k як кількісну характеристику типу охоронної споруди та особливостей механізму її деформування.

Про відмінність механізмів енергетичної реалізації тримкості досліджуваних охоронних споруд свідчить характер одержаних кривих на рис. 1 і 2. За графіком на рис. 1 встановлено, що для вугільного цілика (крива 1) характерне більш раннє та інтенсивне накопичення нормалізованої густини енергії деформації. Для подрібненої породи (крива 2) цей процес на початковій стадії відбувається повільніше, але помітно прискорюється поблизу граничного стану. Це свідчить про те, що вугільний цілик швидше залучає свій енергетичний потенціал у межах реалізації тримкості, тоді як подрібнена порода реалізує його більш поступово, у міру ущільнення та формування стійкої контактної структури.

За графіком на рис. 2 встановлено, що для вугільного цілика (крива 1) більш інтенсивне накопичення енергії характерне на початкових і середніх стадіях деформування. Для подрібненої породи (крива 2), навпаки, на початковій стадії енергетична реалізація тримкості є менш інтенсивною. Після $X = 58{,}6\%$ інтенсивність цього процесу для подрібненої породи зростає, а поблизу граничного стану перевищує відповідні значення для вугільного цілика. Це дає підстави розглядати точку перетину кривих як кількісно визначену межу зміни домінуючого механізму енергетичної реалізації тримкості охоронних споруд. До цієї точки домінує концентраційний механізм деформування вугільного цілика, за якого енергія переважно акумулюється в його несучому об'ємі. Після точки перетину домінуючим стає енергоємний механізм ущільнення та структурної перебудови подрібненої породи, який забезпечує інтенсивніше накопичення енергії поблизу граничного стану.

Експериментальні результати показали, що реалізація тримкості вугільного цілика супроводжується здатністю обмежувати переміщення бічних порід упродовж усього інтервалу деформування до граничного значення. Для подрібненої породи такий ефект також встановлено, але він формується в іншій послідовності стадій деформування. Це дає підстави вважати, що для вугільного цілика реалізація тримкості пов'язана спочатку з підвищеним опором деформуванню та збереженням достатньої жорсткості, а надалі – із збереженням несучої здатності після часткової втрати жорсткісних характеристик. Для подрібненої породи реалізація тримкості на початковій стадії зумовлена ущільненням і структурною перебудовою, а на наступній – формуванням закладального масиву, здатного ефективно обмежувати переміщення бічних порід.

Обговорення результатів.

У результаті виконаних досліджень розроблено підхід до енергетичного оцінювання тримкості охоронних споруд підготовчих гірничих виробок. Одержані результати дають змогу кількісно оцінювати їх тримкість, своєчасно виявляти наближення до граничного стану, запобігати обваленням порід покрівлі та забезпечувати стійкість підготовчих виробок. Значення $\lambda = 0{,}29$ для вугільного цілика та $\lambda = 0{,}6$ для подрібненої породи прийнято як граничні на підставі статистичного критерію, а саме за зміною варіабельності деформацій з урахуванням коробкових діаграмам (табл. 1). Для вугільного цілика досягнення $\lambda = 0{,}29$ супроводжується різким розширенням інтерквартильного розмаху та загального діапазону деформацій. Для подрібненої породи значення $\lambda = 0{,}6$ відповідає межі, до якої варіабельність деформацій зберігає статистично закономірний характер. Це дає підстави розглядати зазначені значення λ як межі переходу від стійкого режиму деформування до стану, близького до граничного.

За даними табл. 2 і 3 встановлено, що зміна густини енергії деформації залежно від відносної деформації для досліджуваних охоронних споруд відбувається по-різному. Для вугільного цілика (табл. 2) інтенсивне зростання густини енергії деформації відбувається в межах відносно невеликого інтервалу деформацій, обмеженого значенням $\lambda = 0{,}29$. Для подрібненої породи (табл. 3), навпаки, енергія накопичується в ширшому інтервалі деформації до $\lambda = 0{,}6$ і досягає вищих абсолютних значень. Це свідчить про різні енергетичні сценарії формування тримкості охоронних споруд. Для вугільного цілика характерне більш раннє накопичення енергії в межах коротшого інтервалу деформування, тоді як для подрібненої породи – поступове накопичення енергії в ширшому інтервалі деформації. Такий характер

ISSN 2664-4304

зміни показників можна пояснити тим, що тримкість вугільного цілика забезпечується переважно опором деформуванню і здатністю сприймати навантаження в жорсткішому режимі, тоді як для подрібненої породи істотну роль відіграють ущільнення, структурна перебудова та акумулювання енергії ущільнення.

Апроксимацією експериментальних даних встановлено універсальні степеневі залежності (6), (7) між нормалізованою густиною енергії деформації та процентним рівнем використання тримкості охоронних споруд. Показник степеня k у цих залежностях визначено за експериментальними даними. Відмінність його значень для вугільного цілика і подрібненої породи відображає різний характер накопичення енергії деформації у процесі реалізації тримкості. Це дає підстави розглядати показник степеня k як кількісну характеристику типу охоронної споруди та особливостей механізму її деформування.

Про відмінність механізмів енергетичної реалізації тримкості досліджуваних охоронних споруд свідчить характер одержаних кривих на рис. 1 і 2. За графіком на рис. 1 встановлено, що для вугільного цілика (крива 1) характерне більш раннє та інтенсивне накопичення нормалізованої густини енергії деформації. Для подрібненої породи (крива 2) цей процес на початковій стадії відбувається повільніше, але помітно прискорюється поблизу граничного стану. Це свідчить про те, що вугільний цілик швидше залучає свій енергетичний потенціал у межах реалізації тримкості, тоді як подрібнена порода реалізує його більш поступово, у міру ущільнення та формування стійкої контактної структури.

За графіком на рис. 2 встановлено, що для вугільного цілика (крива 1) більш інтенсивне накопичення енергії характерне на початкових і середніх стадіях деформування. Для подрібненої породи (крива 2), навпаки, на початковій стадії енергетична реалізація тримкості є менш інтенсивною. Після $X = 58{,}6\%$ інтенсивність цього процесу для подрібненої породи зростає, а поблизу граничного стану перевищує відповідні значення для вугільного цілика. Це дає підстави розглядати точку перетину кривих як кількісно визначену межу зміни домінуючого механізму енергетичної реалізації тримкості охоронних споруд. До цієї точки домінує концентраційний механізм деформування вугільного цілика, за якого енергія переважно акумулюється в його несучому об'ємі. Після точки перетину домінуючим стає енергоємний механізм ущільнення та структурної перебудови подрібненої породи, який забезпечує інтенсивніше накопичення енергії поблизу граничного стану.

Експериментальні результати показали, що реалізація тримкості вугільного цілика супроводжується здатністю обмежувати переміщення бічних порід упродовж усього інтервалу деформування до граничного значення. Для подрібненої породи такий ефект також встановлено, але він формується в іншій послідовності стадій деформування. Це дає підстави вважати, що для вугільного цілика реалізація тримкості пов'язана спочатку з підвищеним опором деформуванню та збереженням достатньої жорсткості, а надалі – із збереженням несучої здатності після часткової втрати жорсткісних характеристик. Для подрібненої породи реалізація тримкості на початковій стадії зумовлена ущільненням і структурною перебудовою, а на наступній – формуванням закладального масиву, здатного ефективно обмежувати переміщення бічних порід.

За результатами виконаних досліджень запропоновано єдиний безрозмірний деформаційно-енергетичний підхід до порівняльного оцінювання тримкості охоронних споруд різного типу, який ґрунтується на зв'язку нормалізованої густини енергії деформації з рівнем реалізації тримкості. Встановлено, що такий підхід дає змогу використовувати єдину шкалу зіставлення для вугільного цілика і закладального матеріалу з подрібненої породи, незважаючи на відмінність механізмів їх деформування. Крім того, кількісно визначено межу зміни домінуючого механізму реалізації тримкості охоронних споруд, що відповідає точці перетину нормалізованих енергетичних кривих.

Таким чином, запропонований підхід дозволяє своєчасно виявляти небезпечне наближення охоронної споруди до граничного стану, оцінювати її здатність обмежувати переміщення бічних порід на контурі підготовчих виробок та прогнозувати зміну їх стійкості. Це підвищує обґрунтованість інженерних рішень щодо вибору способів охорони виробок і сприяє зниженню ризику механічного травмування гірників унаслідок обвалень покрівлі на виїмкових ділянках вугільних шахт.

Висновок.

Експериментально встановлено, що в умовах одновісного стиснення для вугільного цілика інтенсивне накопичення енергії деформації відбувається в інтервалі $\lambda \le 0{,}29$, тоді як для подрібненої породи – у ширшому інтервалі деформування $\lambda \le 0{,}6$. Це свідчить про різні механізми формування тримкості охоронних споруд. Показано, що найбільш виразно ця відмінність проявляється за кривими швидкості зміни нормалізованої густини енергії деформації, а точка їх перетину, що відповідає $58{,}6\ \%$ реалізації тримкості, може розглядатися як кількісно визначена межа зміни домінуючого механізму її енергетичної реалізації. Енергетичне оцінювання тримкості охоронних споруд дає змогу визначати їх працездатність, від якої залежать стійкість підготовчих виробок і безпека праці гірників.

Конфлікт інтересів.

Автори заявляють про відсутність будь-яких фінансових, особистих або інших конфліктів інтересів, які могли б вплинути на результати цього дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Peng, L., Gong, K., & He, M Research on Width Optimization of Bearing Coal Pillar Between Roadways Under the Influence of Mining on Both Sides. *Applied Sciences*. 2025. 15(1), 314. https://doi.org/10.3390/app15010314

2. Zhang, J., Zhou, N., Huang, Y. et al. Impact law of the bulk ratio of backfilling body to overlying strata movement in fully mechanized backfilling mining. *Journal of Mining Science*, 47, 73–84 (2011). https://doi.org/10.1134/S1062739147010096

3. Бачурін, Л. Л., Іорданов, І. В., Бессараб, І. М., Король, А. В., Каюн, О. П., Подкопаєв, Є. С. та ін. Комплексне дослідження стійкості відкотних штреків крутих вугільних пластів при різних способах охорони. *Вісник НУВГП. Технічні Науки.* 2021. 1(93), 217–236. https://doi.org/10.31713/vt1202116

4. Jiang, D., Wang, H., Zhao, T., Zhang, K., Liu, J., Liu, J., Lan, H. and Yao, Y., Study on the Mining Pressure Law of Tunneling Roadway in Coal Pillar of Lower Coal Seam in the Mining Hollow Area. *Energy Science & Engineering.* 2025. 13: 4011–4023. https://doi.org/10.1002/ese3.70148

ISSN 2664-4304

5. Smoliński, A., Malashkevych, D., Petlovanyi, M., Rysbekov, K., Lozynskyi, V., & Sai, K. Research into Impact of Leaving Waste Rocks in the Mined-Out Space on the Geomechanical State of the Rock Mass Surrounding the Longwall Face. *Energies.* 2022. 15(24), 9522. https://doi.org/10.3390/en15249522

6. Геомеханічні процеси у породних масивах. Монографія / Шашенко А. Н., Майхерчик Т., Сдвижкова. Е. А. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. 2005. 319 с. ISBN 966-350-018-2.

7. Волков С. В., Бойченко Г. Є. Оцінка стійкості відкатного штреку з використанням статистичного аналізу відмов аркового податливого кріплення. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2023. № 1. С. 16–28. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-1-16-28

8. Assessment of deformation processes in backfill masses using crushed rock models / O. Tkachuk et al. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. Vol.4, no.1(84). 50–57. URL: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.333869.

REFERENCES

1. Peng, L., Gong, K., & He, M. (2025). Research on width optimization of bearing coal pillar between roadways under the influence of mining on both sides. *Applied Sciences*, *15*(1), Article 314. https://doi.org/10.3390/app15010314

2. Zhang, J., Zhou, N., Huang, Y., & Zhang, Q. (2011). Impact law of the bulk ratio of backfilling body to overlying strata movement in fully mechanized backfilling mining. *Journal of Mining Science*, *47*(1), 73–84. https://doi.org/10.1134/S1062739111010096

3. Bachurin, L. L., Iordanov, I. V., Bessarab, I. M., Korol, A. V., Kaiun, O. P., Podkopaiev, Y. S., et al. (2021). Kompleksne doslidzhennia stiikosti vidkotnykh shtrekiv krutykh vuhilnykh plastiv pry riznykh sposobakh okhorony [Comprehensive study of the stability of haulage drifts of steep coal seams under different protection methods]. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky*, *1*(93), 217–236. https://doi.org/10.31713/vt1202116

4. Jiang, D., Wang, H., Zhao, T., Zhang, K., Liu, J., Liu, J., Lan, H., & Yao, Y. (2025). Study on the mining pressure law of tunneling roadway in coal pillar of lower coal seam in the mining hollow area. *Energy Science & Engineering*, *13*, 4011–4023. https://doi.org/10.1002/ese3.70148

5. Smoliński, A., Malashkevych, D., Petlovanyi, M., Rysbekov, K., Lozynskyi, V., & Sai, K. (2022). Research into impact of leaving waste rocks in the mined-out space on the geomechanical state of the rock mass surrounding the longwall face. *Energies*, *15*(24), Article 9522. https://doi.org/10.3390/en15249522

6. Shashenko, O. M., Maikherchyk, T., & Sdvyzhkova, O. O. (2005). *Heomekhanichni protsesy u porodnykh masyvakh: Monohrafiia* [Geomechanical processes in rock masses: Monograph]. National Mining University.

7. Volkov, S. V., & Boichenko, H. Y. (2023). Otsinka stiikosti vidkatnoho shtreku z vykorystanniam statystychnoho analizu vidmov arkovoho podatlyvoho kriplennia [Assessment of the haulage drift stability using statistical analysis of failures of the arch yielding support]. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*, (1), 16–28. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-1-16-28

8. Tkachuk, O., Chepiga, D., Bachurin, L., Podkopaiev, S., Bachurina, Y., Podkopayev, Y., Rudynets, M., & Visyn, O. (2025). Assessment of deformation processes in backfill masses using crushed rock models. Technology Audit and Production Reserves, 4(1(84)), 50–57. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.333869