УДК 622.268:622.831:331.15
https://doi.org/10.31474/1999-981X-2026-1-187-204

Д.А. Чепіга
О.О. Вісин
Є.С. Подкопаєв
Д.В. Полій
В.В. Демченко
В.С. Бріженюк

ДЕФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ТРИМКОСТІ ОХОРОННИХ СПОРУД ПІДГОТОВЧИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК*

***Мета**. Оцінити тримкість охоронних споруд на основі деформаційно-енергетичних показників для забезпечення стійкості підготовчих виробок та запобігання обвалень порід покрівлі на виїмкових ділянках вугільних шахт.*

***Методи.** Для оцінювання тримкості охоронних споруд застосовано масштабні моделі випробувані в умовах одновісного стиснення. Такий підхід дав змогу встановити особливості деформування вугільних циліків під навантаженням і закладального матеріалу з подрібненої породи за умов її бічного розширення.*

***Результати.** Встановлено, що межа деформаційного ресурсу для вугільного цілика становить $\lambda = 0,29$, а для закладального матеріалу з подрібненої породи – $\lambda = 0,6$. Критерієм її визначення прийнято рівень залишкової жорсткості, за якого приріст деформації ще супроводжується приростом напруження; для досліджених охоронних споруд він відповідає 6–10 % максимального значення тангенціального модуля деформації. Показано, що тримкість охоронних споруд формується сукупною дією деформаційних, жорсткісних та енергетичних чинників, узагальнених у безрозмірному деформаційно-енергетичному показнику. При цьому для закладального матеріалу характерне більш інтенсивне накопичення енергії деформації порівняно з вугільним циліком, а середня швидкість цього процесу є приблизно у 1,6 раза вищою.*

***Новизна**. Для охоронних споруд підготовчих виробок встановлено залежність між інтегральним деформаційно-енергетичним показником тримкості та нормалізованою відносною деформацією, а також закономірності зміни швидкості накопичення енергії деформації, що дозволяє оцінювати ступінь реалізації деформаційного ресурсу, встановлювати межу працездатного стану та порівнювати особливості формування тримкості різних типів охоронних споруд.*

***Практичне значення**. Полягає у можливості використання деформаційно-енергетичних показників для оцінювання тримкості охоронних споруд, вибору їх раціонального типу залежно від умов експлуатації та визначення моменту наближення до граничного стану, що сприяє підвищенню стійкості підготовчих виробок у вугільних шахтах.*

***Ключові слова**: підготовча виробка, охоронні споруди, тримкість, жорсткість, деформаційні процеси, безпека праці.*

Вступ.

Актуальність енергетичної оцінки тримкості охоронних споруд зумовлена необхідністю забезпечення стійкості підготовчих виробок на виїмкових ділянках вугільних шахт. Стійкість підготовчих виробок в ускладнених гірничо-геологічних умовах залежить від ефективності роботи охоронних споруд, які сприймають навантаження від вуглепородного масиву та обмежують переміщення бічних порід на їх контурі. Традиційні підходи до оцінювання тримкості охоронних споруд переважно базуються на деформаційних або силових характеристиках і не повною мірою враховують енергетичні процеси, що відбуваються під час їх деформування. Разом з тим у процесі взаємодії тримальних конструкцій із масивом відбуваються накопичення, перерозподіл та розсіювання енергії гірничого тиску, що істотно впливає на характер їх роботи та втрату тримкості.

* Робота виконується під науковим керівництвом доктора технічних наук, професора С.В. Подкопаєва (ЛНТУ) /
The work is carried out under the scientific supervision of Doctor of Technical Sciences, Professor S.V. Podkopaiev (LNTU)

Енергетичний підхід дозволяє оцінити не лише рівень навантаження, а й здатність тримальних конструкцій акумулювати та поглинати енергію деформування, що є важливим для забезпечення тримкості та запобігання раптовим руйнуванням бічних порід.

Особливого значення така оцінка набуває для охоронних споруд різного типу, зокрема вугільних циліків та закладальних масивів з подрібненої породи, механізми деформування яких суттєво відрізняються.

Врахування енергетичних характеристик деформування дає можливість визначити межу деформаційного ресурсу охоронних споруд, за якої вони зберігають здатність сприймати навантаження без втрати тримкості. Це створює передумови для обґрунтованого вибору параметрів охоронних споруд. Крім того, енергетична оцінка дозволяє порівнювати ефективність різних конструктивних рішень за інтегральним показником деформування.

Таким чином, застосування енергетичного підходу до оцінювання тримкості охоронних споруд є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню стійкості підготовчих виробок та забезпеченню безпечних умов ведення гірничих робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Враховуючи структурну неоднорідність вуглепородного масиву і характер перерозподілу напружень у процесі ведення гірничих робіт, забезпечення експлуатаційного стану підготовчих виробок є однією з ключових задач гірничого виробництва. У таких умовах напружено-деформований стан вуглепородного масиву формується під впливом взаємодії очисних робіт, гірничого тиску та порушення природної рівноваги порід, що призводить до розвитку зон концентрації напружень, деформацій, а також руйнування бічних порід.

З метою обмеження негативного впливу цих процесів, у практиці гірничих робіт застосовують різні способи охорони підготовчих виробок, серед яких є цілики вугілля та використання штучних споруд з подрібненої породи. Ці споруди виконують функцію перерозподілу гірничого тиску, локалізації зон підвищення напружень та формування бар’єра між виробленим простором і контуром підготовчої виробки.

Практичний досвід застосування циліків вугілля для охорони підготовчих виробок, узагальнений за результатами сучасних теоретичних, чисельних і натурних досліджень підтверджує, що їх тримкість формується як результат складної взаємодії процесів перерозподілу напружень і накопичення деформаційної енергії в межах пружного несучого ядра [1]. Зокрема встановлено, що у процесі навантаження цілика формується неоднорідна структура, яка включає пружне ядро та пластичні приконтурні зони. Причому саме співвідношення цих зон визначає його тримкість. При недостатній ширині цілика пластична зона охоплює практично весь його об’єм, що призводить до втрати тримкості. При збільшені ширини формується пружне ядро, здатне акумулювати енергію та забезпечувати стабільний опір навантаженню. Встановлено [2], що ефективні значення ширини циліків знаходяться у межах *8-11 м*, за яких забезпечується формування пружного ядра та контрольована деформація виробки. Результати досліджень [3] вказують, що зменшення ширини цілика до вказаних розмірів, дозволяє зберегти стійкість підготовчої виробки та одночасно підвищити вилучення вугілля, що свідчить про необхідність переходу від емпіричного до науково-обґрунтованого підбору параметрів охоронних споруд.

Практика використання безціликових способів охорони підготовчих виробок показує, що їх ефективність суттєво залежить від відповідності деформаційних характеристик охоронних споруд рівню гірничого тиску, зумовленого зрушенням підроблених порід. У разі невідповідності цих параметрів відбувається руйнування покрівлі, інтенсивне деформування кріплення виробок, що потребує його періодичного ремонту або повної заміни [4, 5]. За таких умов знижується безпека ведення гірничих робіт і зростає ймовірність травмування гірників.

Одним із ефективних напрямків вирішення зазначеної проблеми є

застосування технологій закладання виробленого простору шахтною породою. Практичний досвід свідчить, що формування закладального масиву дозволяє істотно зменшити інтенсивність деформаційних процесів, запобігти обваленню порід покрівлі і виключити завали підготовчих виробок. При цьому закладка виконує функцію опорного середовища, яке обмежує розвиток тріщиноутворення в бічних породах та сприяє стабілізації напружено-деформованого стану вуглепородного масиву [6]. Аналіз досвіду експлуатації вугільних шахт із закладанням виробленого простору показує, що така технологія забезпечує суттєве покращення геомеханічної обстановки, зокрема за рахунок зниження концентрації напружень, обмеження конвергенції порід у виробках і підвищення стійкості бічних порід [7]. Це дозволяє розглядати закладку не лише як засіб утилізації відходів гірничого виробництва, а як ефективний інструмент управління напружено-деформованим станом вуглепородного масиву. Відповідно до галузевих нормативних документів, при застосуванні повної закладки виробленого простору допускається відмова від використання додаткових способів охорони підготовчих виробок, оскільки закладальний масив здатний забезпечити необхідний рівень їх стійкості та експлуатаційної надійності [8].

При оцінці тримкості охоронних споруд енергетичні показники набувають визначального значення, оскільки дозволяють обґрунтувати параметри тримальних конструкцій в умовах дії гірничого тиску різної інтенсивності [9, 10]. На відміну від традиційних силових критеріїв, енергетичний підхід враховує здатність конструкції не лише тримати навантаження, а й акумулювати та розсіювати енергію деформування. Ключовим параметром при цьому є густина енергії деформації та її складові, які характеризують внутрішню роботу матеріалу охоронних споруд у процесі навантаження. Саме ці показники відображають здатність системи накопичувати енергію в пружній формі та частково її дисипувати, що є принципово важливим для встановлення межі деформаційного ресурсу та визначення раціонального режиму роботи охоронних споруд.

Енергетичні показники деформування, зокрема густина енергії, дозволяють оцінювати не лише поточний напружено-деформований стан тримальних конструкцій, але й їхню потенційну здатність протистояти подальшому руйнуванню. У цьому контексті вони виступають інтегральною характеристикою, яка поєднує деформаційні, жорсткісні та енергетичні параметри і забезпечує кількісне визначення межі стійкості охоронних споруд.

Аналіз енергетичних характеристик дає можливість встановлювати критичні стани системи, що відповідають вичерпанню її деформаційного ресурсу, а також прогнозувати момент втрати тримкості. Це створює передумови для переходу від емпіричних до науково обґрунтованих підходів оцінювання ефективності охоронних споруд. Зокрема, встановлено, що застосування кріплень та охоронних споруд, здатних до ефективного розсіювання енергії, дозволяє підвищити стійкість підготовчих виробок в умовах значних зміщень порід. Це дозволяє забезпечити стійкість виробок за рахунок зменшення концентрації напружень на їх контурі та перерозподілу вглиб масиву, що сприяє більш рівномірному розвитку деформації і зниженню ризику руйнування [11, 12].

Таким чином, використання енергетичних показників деформування формує наукову основу для комплексної оцінки тримкості охоронних споруд і оптимізації їх параметрів з урахуванням умов взаємодії з вуглепородним масивом, що дозволяє підвищити стійкість підготовчих виробок, знизити ризик обвалень бічних порід та підвищити рівень безпеки праці гірників.

Мета та задачі дослідження.

Метою роботи є оцінювання тримкості охоронних споруд на основі деформаційно-енергетичних показників для забезпечення стійкості підготовчих виробок та запобігання обвалень порід покрівлі на виїмкових ділянках вугільних шахт.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- встановити особливості впливу деформаційних показників охоронних споруд на реалізацію їх деформаційного ресурсу та формування тримкості в умовах одновісного стиснення;

- обґрунтувати інтегральний критерій тримкості охоронних споруд на основі узагальнення деформаційних, жорсткісних та енергетичних показників.

Матеріали та методи досліджень.

Об'єктом дослідження є деформаційні процеси в охоронних спорудах, що визначають формування їх тримкості при розвантаженні вуглепородного масиву під час підтримання підготовчих виробок.

Деформаційні процеси у охоронних спорудах досліджувались на експериментальних зразках у вигляді цілків вугілля та закладального матеріалу з подрібненої породи. Експериментальні зразки піддавались поступовому навантаженню в умовах одновісного стиснення.

Дослідження деформаційних процесів у цілках вугілля було виконано на 7 масштабних моделях. Розміри моделей: висота $h_0 = 0{,}04$ *м*, ширина *0,04 м*, довжина *0,08 м*. Матеріал моделей – коксове вугілля марки *К*. Густина в масиві *1420 кг/м*^{3}, коефіцієнт поперечної деформації $\nu = 0{,}3$. Моделі були посилені по контуру шістьома дерев'яними стояками діаметром *0,05 м*.

Дослідження деформаційних процесів у закладальному матеріалі було виконано на 7 масштабних моделях з подрібненої породи неоднорідного гранулометричного складу *(0,1 – 5) мм*. Матеріал моделі піщано-глинистий сланець, густина в масиві *2438 кг/м*^{3}. Подрібнену породу розміщували у тканинну оболонку і по контуру посилювали шістьома дерев'яними стояками діаметром *0,05 м.* Розміри моделей: висота h_0=*0,04 м*, ширина *0,04 м*, довжина *0,08 м*. Прийнятий геометричний масштаб моделювання 1:25 визначає висоту модельних зразків та співвідношення розмірів зерен (кусків) модельного та реального матеріалу.

Експериментальні зразки розміщували між плітками, що імітували шари покрівлі та підошви. Плітки були виготовлені з піщано-цементної суміші з межею міцності на стиснення $\sigma_{cm} \approx 38$ *МПа*. Розміщення дерев'яних стояків по контуру експериментальних зразків підвищувало стійкість крайових зон та забезпечувало локальне обмеження поперечних деформацій в умовах поступового навантаження.

Експериментальні зразки розміщували між металевими плитами пресу ГП-50 та піддавали поступовому навантаженню. На кожному етапі поступового навантаження реєструвались зміна висоти Δh(м) та відповідне навантаження *F (кН)*. Для спрощення знехтували деформацією випробувального обладнання та силами тертя.

Відносну деформацію λ експериментальних зразків визначали за виразом

$$\lambda = \frac{\Delta h}{h_0}. \quad (1)$$

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

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (2)$$

де S – площа поперечного перетину експериментального зразка, *м*^{2}.

Густину енергії деформації *U (МДж/м*^{3}*)* розраховували за діаграмою «напруження – відносна деформація» як площу під кривою до поточного значення деформації

$$U = \int_0^{\lambda} \sigma(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

Оскільки дані задані дискретно, інтервал обчислювали чисельним методом трапецій [13, 14].

Тангенціальний модуль деформації E_t *(МПа)* визначали за експериментальною діаграмою «напруження – деформація» як похідну

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\lambda}. \quad (4)$$

Для цілків вугілля значення E_t розраховували без згладжування. Застосування згладжування E_t методом ковзного середнього (вікно 3-х точок) було виконано для закладального матеріалу, оскільки ущільнення подрібненої породи супроводжувалося локальними коливаннями похідної.

Інтегральний деформаційно-енергетичний показник тримкості охоронних споруд *К* розраховували за формулою

$$K = \sqrt{\frac{\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{гр}}}\right)^2 + \left(\frac{E_{to} - E_t}{E_{to} - E_{t\text{гр}}}\right)^2 + \left(\frac{U}{U_{\text{гр}}}\right)^2}{3}}, \quad (5)$$

де λ - поточна відносна деформація;

$\lambda_{гр}$ – гранична відносна деформація (межа деформаційного ресурсу);

E_t – поточний тангенціальний модуль деформації, МПа;

E_{to} – максимальний тангенціальний модуль деформації у межах деформаційного ресурсу, МПа;

$E_{tгр}$ – тангенціальний модуль деформації на межі деформаційного ресурсу, МПа;

U – поточна густина енергії деформації, *МДж/м*^{3};

$U_{гр}$ – гранична густина енергії деформації, *МДж/м*^{3}.

Вибір складових показника К обумовлений необхідністю одночасного врахування деформаційної, жорсткісної та енергетичної складових стану охоронної споруди. Відносна деформація характеризує ступінь реалізації деформаційного ресурсу, жорсткісна складова – втрату здатності конструкції чинити опір навантаженню, а густина енергії деформації – інтенсивність накопичення внутрішньої енергії в процесі деформування. Сукупне використання цих параметрів дозволяє оцінювати поточний стан охоронної споруди більш повно, ніж при використанні лише окремих деформаційних або жорсткісних характеристик.

Для узагальнення результатів експериментальних досліджень охоронних споруд різного типу використано безрозмірні параметри, які відображають відповідно ступінь реалізації деформаційного ресурсу, зміну жорсткості та рівень накопичення енергії деформації. Інтенсивність енергетичних перетворень у процесі деформування оцінювали за швидкістю зміни нормалізованої густини енергії деформації відносно відносної деформації, яку визначали за першою похідною

$$\frac{d\left(\frac{U}{U_{\text{гр}}}\right)}{d\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{гр}}}\right)}. \quad (6)$$

Отримана величина дає змогу оцінити інтенсивність акумулювання енергії деформації в межах реалізації деформаційного ресурсу охоронних споруд.

Моделі вугільного цілика та закладального масиву приймали однакових геометричних розмірів для забезпечення коректності їх порівняльного дослідження в умовах одновісного стиснення. Це дозволило мінімізувати вплив площі контакту, об'єму зразків і співвідношення їх розмірів на результати випробувань та забезпечити зіставність напружено-деформованого стану моделей. За таких умов відмінності у деформаційно-енергетичних показниках відображають переважно різні фізико-механічні властивості матеріалів і механізми реалізації їх деформаційного ресурсу.

Проведенні експерименти є частиною комплексного дослідження деформаційних процесів у навантажених охоронних спорудах підготовчих гірничих виробок [15, 16].

Результати досліджень деформаційно-енергетичної оцінки тримкості охоронних споруд.

Результати досліджень формування тримкості охоронних споруд на основі аналізу деформаційних, жорсткісних та енергетичних показників.

У даному розділі наведено результати досліджень процесів деформування модельних зразків в умовах одновісного стиснення та поступового навантаження. Статистичний аналіз результатів деформаційної поведінки 7 моделей вугільного цілика та 7 моделей закладального масиву з подрібненої породи показав високу відтворюваність експериментальних даних. У дослідженому діапазоні навантажень коефіцієнт варіації деформацій становив 2,7-9,9 %, а перевірка однорідності вибірки за *t*-критерієм Стьюдента не виявила статистично значущих відмінностей на рівні значущості 0,05. Це дозволяє використовувати і розглядати одну репрезентативну модель вугільного цілика та закладального матеріалу з подрібненої породи.

В таблиці 1 наведено деформаційно-енергетичні показники одновісного стиснення вугільного цілика.

Таблиця 1 – Деформаційна енергетичні показники одновісного стиснення вугільного цілика

№п/п	*F (кН)*	*Δh, м*	*λ*	*σ, МПа*	*U, МДж/м³*	*Eₜ, МПа*
1.	5	0,0006	0,015	1,6	0,012	85,7
2.	10	0,0014	0,035	3,1	0,06	100,0
3.	15	0,002	0,05	4,6	0,117	120,0
4.	20	0,0025	0,0625	6,1	0,184	56,0
5.	25	0,0035	0,0875	7,5	0,357	44,0
6.	30	0,0045	0,1125	8,6	0,558	40,0
7.	35	0,0057	0,1425	9,7	0,834	18,3
8.	40	0,008	0,2	10,7	1,424	18,9
9.	50	0,0116	0,29	12,5	2,467	7,58
10.	60	0,016	0,4	13,3	3,902	2,4
11.	70	0,022	0,55	13,1	5,889	-0,8

В табл. 2 наведено деформаційна енергетичні показники одновісного стиснення закладального матеріалу з подрібненої породи.

Таблиця 2 - Деформаційно-енергетичні показники одновісного стиснення закладального матеріалу з подрібненої породи неоднорідного гранулометричного складу

№п/п	*F (кН)*	*Δh, м*	*λ*	*σ, МПа*	*U, МДж/м³*	*Eₜ, МПа*
1.	10	0,003	0,075	3,1	0,129	34,55
2.	20	0,007	0,175	6,0	0,578	34,91
3.	30	0,009	0,225	8,4	0,933	61,56
4.	50	0,012	0,3	13,7	1,761	55,92
5.	70	0,016	0,4	18,1	3,379	25,04
6.	80	0,02	0,5	18,8	5,297	15,62
7.	100	0,022	0,55	20,5	6,212	25,86
8.	110	0,024	0,6	21,3	7,492	5,24
9.	118	0,025	0,625	20,9	7,848	-17,63
10.	120	0,026	0,65	20,5	8,958	-51,91
11.	122	0,026	0,65	19,6	8,960	-

На рис. 1 наведено графіки зміни напруження *σ (МПа)* від відносної деформації *λ* охоронних споруд в умовах одновісного стиснення.

Для циліків вугілля на початковій стадії деформування при *λ = 0,015-0,0875* напруження зростає від *σ = 1,6 МПа* до *σ = 7,5 МПа*. Це відповідає пружно-пластичному деформуванню вугілля. У подальшому, при збільшенні поступового навантаження, коли *λ = 0,1125-0,29,* напруження зростає і досягає значення *σ = 12,5 МПа*. Максимальне значення напруження *σ = 13,3 МПа* фіксується при *λ = 0,4* (рис. 1, крива 1). Наведена залежність вказує на те, що для вугільного цілика характерне поступове зниження жорсткості та наближення до втрати тримкості в процесі деформування. Для закладального матеріалу з подрібненої породи крива має інший характер. На початковій стадії деформування при *λ = 0,075-0,225* напруження зростає від *σ = 3,1 МПа* до *σ = 8,4 МПа*, що відповідає ущільненню подрібненої породи. Далі при *λ = 0,3-0,5* напруження продовжує зростати від *σ = 13,7 МПа* до *σ = 18,8 МПа*, що свідчить про формування стійкості контактної структури. Максимальне значення напруження *σ = 21,3 МПа* фіксується при відносній деформації *λ = 0,6*. При *λ>0,6* спостерігається незначне зниження

напруження, яке пов'язане з перебудовою зернового каркасу (рис. 1, крива 2).

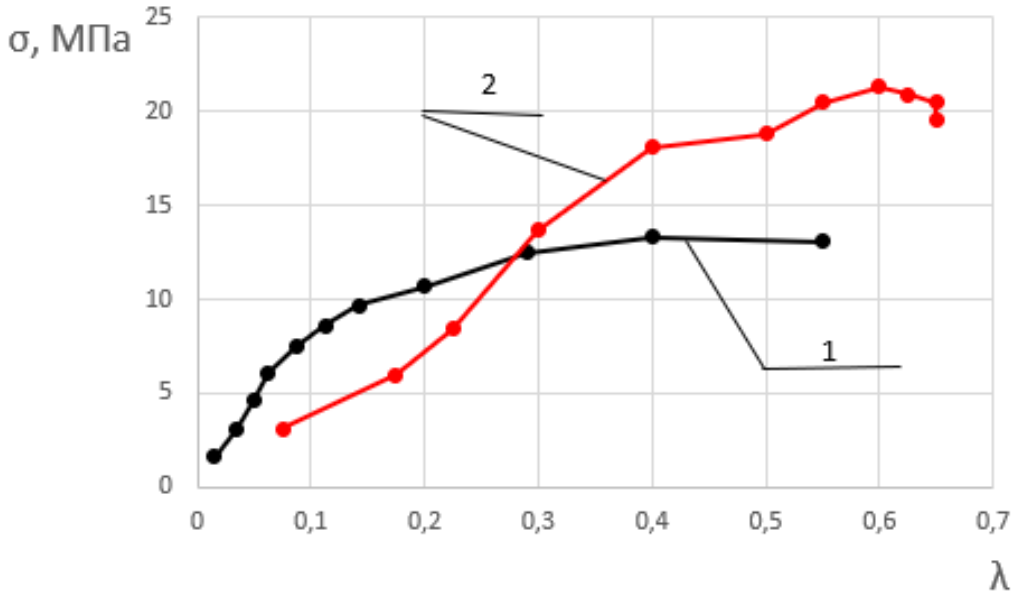


Рисунок 1. Графіки зміни напруження *σ (МПа)* від відносної деформації *λ* охоронних споруд в умовах одновісного стиснення:
1 - цілик вугілля; 2 - закладальний матеріал з подрібненої породи.

Залежність напруження σ від відносної деформації λ охоронних споруд при їх поступовому навантаженні в умовах одновісного стиснення характеризує особливості їх деформування та реалізації деформаційного ресурсу. Межу деформаційного ресурсу за графіком (рис. 1, криві 1, 2) визначали як точку, після якої подальше зростання відносної деформації вже не супроводжується істотним приростом напруження. Для вугільного цілика така межа становить $\lambda = 0,29$, а для подрібненої породи – $\lambda = 0,6$ (табл. 1, 2). Це дало змогу встановити особливості деформування, реалізації деформаційного ресурсу та формування тримкості досліджених конструкцій.

На рис. 2 наведено графіки зміни густини енергії деформації U від навантаження σ охоронних споруд в умовах одновісного стиснення.

Для вугільного цілика при зростанні напруження від $\sigma = 1,6$ *МПа* до $\sigma = 10,7$ *МПа* густина енергії деформації зростає від $U = 0,012$ *МДж/м*^{3} до $U = 1,424$ *МДж/м*^{3} поступово, без різких стрибків. Це відповідає стадії пружно-пластичного деформування та накопичення початкових пошкоджень у структурі вугільного цілика. Подальше підвищення напруження від $\sigma = 12,5$ *МПа* до $\sigma = 13,3$ *МПа* супроводжується зростанням густини енергії деформації від $U = 2,467$ *МДж/м*^{3} до $U = 3,902$ *МДж/м*^{3}. Зниження напруження до значення $\sigma = 13,1$ *МПа* супроводжується зростанням енергії до $U = 5,889$ *МДж/м*^{3} (рис. 2, крива 1). Такий характер кривої означає, що після досягнення повного рівня навантаження, енергія починає накопичуватись швидше, ніж зростає опір вугільного цілика. Це вказує на локалізацію деформацій, прискорене утворення тріщин і перехід цілика до руйнівного стану.

Для закладального матеріалу з подрібненої породи у діапазоні напружень $\sigma = 3,1$-$13,7$ *МПа* густина енергії деформації зростає від $U = 0,129$ *МДж/м*^{3} до $U = 1,761$ *МДж/м*^{3}, що відповідає початковій стадії ущільнення подрібненої породи. Далі, при $\sigma = 18,1$-$21,3$ *МПа* енергія зростає значно інтенсивніше до $U = 3,379$-$7,492$ *МДж/м*^{3}. В таких умовах закладальний матеріал не тільки накопичує енергію, а й продовжує підвищувати опір деформуванню за рахунок ущільнення та формування стійкого контактного каркаса. У діапазоні $\sigma = 20,5$-

21,3 МПа крива наближається до максимуму, а подальше незначне зниження напруження *(σ = 19,6 МПа),* супроводжується зростанням густини енергії деформації до $U = 8{,}960$ *МДж/м*^{3} (рис. 2, крива 2). Це свідчить про перехід до нестійкого стану несучого породного каркаса. Графік (рис. 2, криві 1, 2) дозволив визначити межу деформаційного ресурсу як точку, після якої подальше накопичення густини енергії деформації вже не супроводжується істотним приростом напруження. Для вугільного цілика така межа відповідає $\lambda = 0{,}29$, а для подрібненої породи – $\lambda = 0{,}6$ (табл.1,2). Це свідчить про перехід охоронних споруд від ресурсоутримувального до післяграничного режиму деформування.

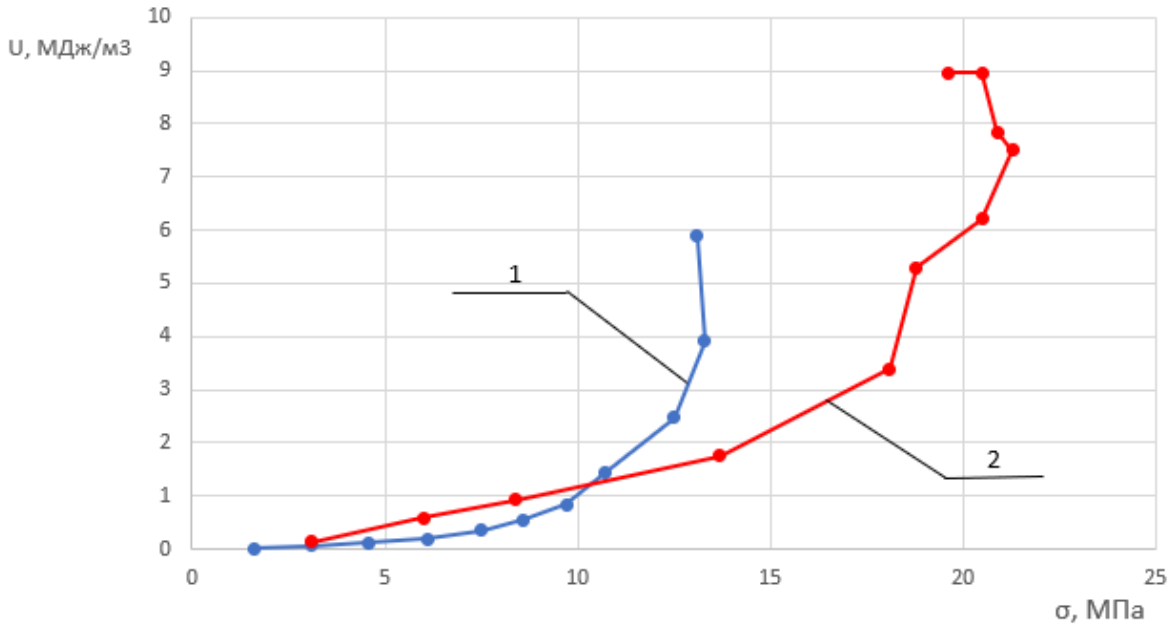


Рисунок 2. Графіки зміни густини енергії деформації *U (МДж/м*^{3}) від навантаження *σ (МПа)* охоронних споруд в умовах одновісного стиснення:
1 – цілик вугілля; 2 – закладальний матеріал з подрібненої породи

На рис.3 наведено графіки зміни тангенціального модуля деформації E_t від відносної деформації λ охоронних споруд в умовах одновісного стиснення.

Для вугільного цілика на початковій стадії деформування при $\lambda = 0{,}015\text{-}0{,}05$ тангенціальний модуль деформації має значення $E_t = 85{,}7\text{-}120{,}0$ *МПа*, що свідчить про його здатність інтенсивно сприймати навантаження. Після досягнення $\lambda > 0{,}0625$ спостерігається різке зниження тангенціального модуля деформації до значення $E_t = 44{,}0$ *МПа*, що вказує на початок накопичення пошкоджень у вугільному цілику. У подальшому при $\lambda = 0{,}1125\text{-}0{,}29$ модуль поступового зменшується від $E_t = 40{,}0$ *МПа* до $E_t = 7{,}58$ *МПа,* що характеризує деградацію жорсткості та наближення цілика до втрати тримкості (рис. 3, крива 1). Для подрібненої породи на початковій стадії деформування при $\lambda = 0{,}075\text{-}0{,}175$ значення тангенціального модуля деформації становлять $E_t = 34{,}55\text{-}34{,}91$ *МПа*, що відображає початкову миттєву жорсткість закладального матеріалу. При подальшому деформуванні, коли $\lambda = 0{,}225$, модуль зростає до значення $E_t = 61{,}56$ *МПа*, що пов'язане з ущільненням подрібненої породи та формуванням несучого зернового каркаса. Після цього при $\lambda = 0{,}3\text{-}0{,}5$ спостерігається поступове зниження жорсткості до $E_t = 15{,}62$ *МПа*, що відображає перерозподіл контактів між частинами породи. В умовах, коли відносна деформація закладального масиву $\lambda > 0{,}6$, модуль набуває від'ємних значень (E_t = -

17,63 МПа та E_t *= -51,91 МПа*), що свідчить про втрату стійкості зернового каркаса та перехід закладального матеріалу у нестійкий стан деформування (рис. 3, крива 2).

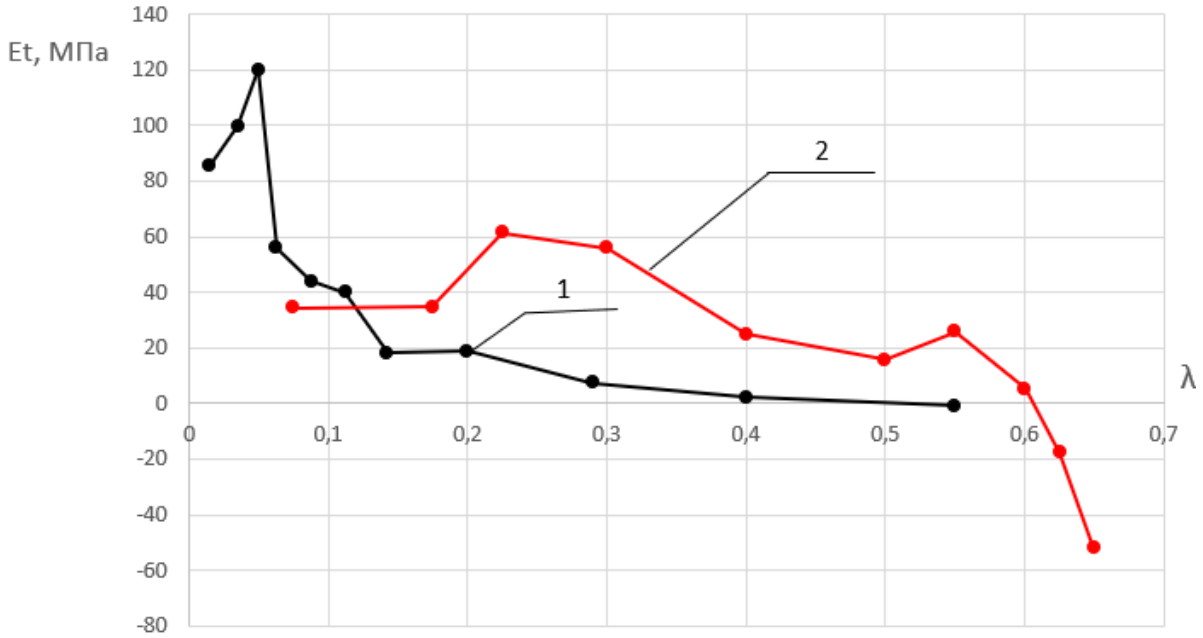


Рисунок 3. Графіки зміни тангенціального модуля деформації E_t *(МПа)* від відносної деформації λ охоронних споруд в умовах одновісного стиснення: 1 - цілик вугілля; 2 - закладальний матеріал з подрібненої породи.

На основі аналізу залежностей відносна деформація–напруження, напруження–густина енергії деформації та відносна деформація–тангенціальний модуль деформації встановлено особливості впливу деформаційних, жорсткісних і енергетичних показників на реалізацію тримкості охоронних споруд підготовчих виробок. При цьому для кількісного оцінювання переходу від працездатного до граничного стану доцільно використовувати межу деформаційного ресурсу, яку визначають таким рівнем тангенціального модуля деформації, за якого приріст деформації ще супроводжується приростом напруження, тобто тримальна конструкція зберігає залишкову несучу реакцію. Оскільки тангенціальний модуль деформації (4) характеризує поточну жорсткість споруди, його граничне значення відповідає мінімальній жорсткості в межах працездатного стану. Для вугільного цілика при λ *= 0,29* тангенціальний модуль становить *7,58 МПа*, що відповідає *6,3 %* від максимального значення *120 МПа*, а для подрібненої породи при λ *= 0,6-5,24* МПа, або *8,5 %* від максимального значення *61,56 МПа*. Саме в цій області залишкової жорсткості ще забезпечується приріст напруження при подальшому деформуванні, що дає підстави розглядати її як граничний рівень реалізації деформаційного ресурсу. Отримані результати свідчать про різну здатність охоронних споруд сприймати навантаження в умовах одновісного стиснення і відображають відмінності в механізмах реалізації деформаційного ресурсу. Для вугільного цілика досягнення зазначеної межі пов'язане з розвитком пошкоджень, деградацією жорсткості та наближенням до втрати тримкості, тоді як для закладального матеріалу з подрібненої породи – із завершенням стадії ущільнення, вичерпанням можливостей подальшого зближення частинок і переходом до нестійкого режиму, що супроводжується

бічним переміщенням первісного матеріалу під навантаженням.

Результати досліджень обґрунтування інтегрального критерію тримкості охоронних споруд.

Для комплексної оцінки процесу формування тримкості охоронних споруд доцільно використовувати інтегральний показник, який узагальнює деформаційні, жорсткісні та енергетичні характеристики їх напружено-деформованого стану. Визначення інтегрального показника *K* ґрунтується на використанні безрозмірних параметрів відносної деформації, тангенціального модуля деформації та густини енергії деформації. Ці параметри обчислюються як відношення їх поточних значень до відповідних граничних значень, встановлених у межах деформаційного ресурсу охоронних споруд.

В таблиці 3 наведені безрозмірні параметри деформування та інтегральний показник тримкості вугільного цілика.

Таблиця 3 – Безрозмірні деформаційні, жорсткісні та енергетичні параметри та інтегральний деформаційно-енергетичний показник тримкості вугільного цілика з урахуванням швидкості накопичення енергії деформування.

$\frac{\lambda}{\lambda_{\text{гр}}}$	$\frac{E_{to}-E_t}{E_{to}-E_{t\text{гр}}}$	$\frac{U}{U_{\text{гр}}}$	K	$\frac{d\left(\frac{U}{U_{\text{гр}}}\right)}{d\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{гр}}}\right)}$
0,05	0,305	0	0,179	-
0,12	0,178	0,02	0,125	0,29
0,17	0,000	0,05	0,103	0,6
0,22	0,569	0,07	0,354	0,4
0,3	0,676	0,14	0,436	0,88
0,39	0,712	0,23	0,486	1,0
0,49	0,905	0,34	0,626	1,1
0,69	0,899	0,58	0,734	1,2
1,0	1,0	1,0	1,0	1,35

В таблиці 4 наведені безрозмірні параметри деформування та інтегральний показник тримкості закладального матеріалу з подрібненої породи.

На основі безрозмірних деформаційних, жорсткісних та енергетичних параметрів, наведених у таблицях 3 ,4 побудовано залежності інтегрального деформаційно-енергетичного показника від нормалізованої відносної деформації.

На рис. 4 наведено графіки зміни інтегрального деформаційно-енергетичного показника тримкості від нормалізованої відносної деформації охоронних споруд

На осі абсцис відкладено нормалізовану відносну деформацію $\lambda / \lambda_{гр}$, оскільки саме деформація є керувальним параметром процесу навантаження і безпосередньо відображає ступінь реалізації деформаційного ресурсу охоронної споруди. Нормування на граничне значення $\lambda_{гр}$ переводить різні за природою охоронні споруди в єдину безрозмірну шкалу, де значення $\lambda / \lambda_{гр} = 1$ відповідає повному вичерпанню деформаційного ресурсу, тобто досягненню граничного стану. Це дає змогу коректно порівнювати закономірності деформування вугільних циліків і

закладальних масивів незалежно від їх абсолютних значень граничної деформації.

Таблиця 4 – Безрозмірні деформаційні, жорсткісні та енергетичні параметри та інтегральний деформаційно-енергетичний показник тримкості закладального матеріалу з подрібненої породи з урахуванням швидкості накопичення енергії деформування.

$\frac{\lambda}{\lambda_{\text{гр}}}$	$\frac{E_{to}-E_t}{E_{to}-E_{t\text{гр}}}$	$\frac{U}{U_{\text{гр}}}$	K	$\frac{d\left(\frac{U}{U_{\text{гр}}}\right)}{d\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{гр}}}\right)}$
0,12	0,480	0,02	0,286	-
0,29	0,473	0,08	0,324	0,35
0,38	0,000	0,12	0,228	0,44
0,5	0,100	0,24	0,324	1,0
0,67	0,648	0,45	0,597	1,24
0,83	0,816	0,71	0,787	1,63
0,92	0,634	0,83	0,802	1,33
1,0	1,0	1,0	1,0	2,13

.

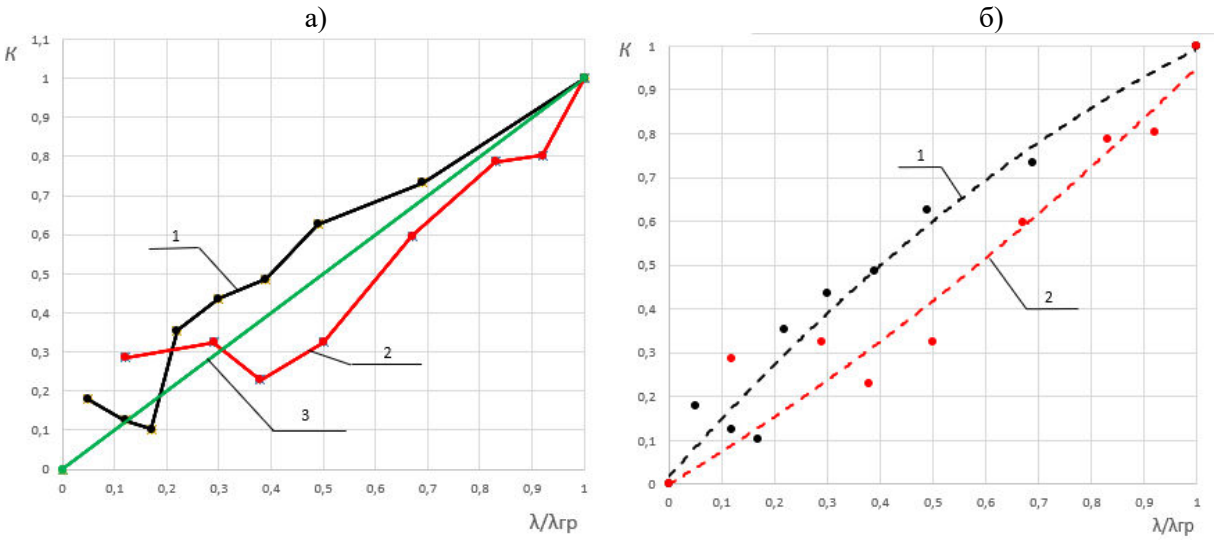


Рис. 4. Графіки зміни інтегрального деформаційно-енергетичного показника тримкості K від нормалізованої відносної деформації $\lambda / \lambda_{гр}$ охоронних споруд: а) експериментальні криві 1, 2 відносно еталонної лінії 3; б) апроксимація експериментальних даних з координатами (0;0) та (1;1); 1 - вугільний цілик; 2 - закладальний матеріал з подрібненої породи; 3 – еталонна лінія.

Для цілика вугілля на початковій стадії деформування спостерігається зменшення показника від $K = 0,179$ при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,052$ до мінімального значення $K = 0,103$ при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,172$, що пов'язано зі зростанням жорсткості охоронної споруди. Після цього

при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,216$ відбувається зростання до значення $K = 0,354$, тобто більш ніж у 3 рази, що свідчить про початок інтенсивної втрати жорсткості. Надалі залежність має стійкий зростаючий характер: при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,302$ $K = 0,436$, при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,491$ $K = 0,626$, при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,690$ $K = 0,734$ і досягається граничного значення $K = 1,0$ при $\lambda / \lambda_{гр} = 1,0$. В таких умовах для цілика вугілля характерним є відносно ранній перехід до стадії інтенсивного зростання інтегрального показника тримкості (рис. 4, крива 1).

Для подрібненої породи на початковій ділянці показник зростає від $K = 0,286$ при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,125$ до $K = 0,324$ при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,292$, після чого зменшується до мінімального значення $K = 0,228$ при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,375$, що відповідає досягненню максимальної жорсткості закладального матеріалу внаслідок ущільнення подрібненої породи. Подальше зростання показника відбувається поступово: при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,500$ $K = 0,324$, при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,667$ $K = 0,597$, при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,833$ $K = 0,787$, при $\lambda / \lambda_{гр} = 0,917$ $K = 0,802$ і досягає $K = 1,0$ при $\lambda / \lambda_{гр} = 1,0$ (рис. 4а, крива 2). Це свідчить про більш тривалий процес реалізації деформаційного ресурсу за рахунок структурної перебудови та ущільнення подрібненої породи.

Лінійну залежність $K = \lambda / \lambda_{гр}$ (рис. 4, крива 3) використано як еталонну при аналізі інтегрального деформаційного-енергетичного показника тримкості К. Така залежність виконує функцію реперної лінії, відносно якої оцінюють характер сумарної зміни стану охоронної споруди в процесі деформування. Положення експериментальної кривої вище лінії 3 свідчить, що сукупний внесок жосткісної та енергетичної складових випереджає деформаційну складову. У такому випадку інтегральний стан охоронної споруди змінюється швидше, ніж використовується деформаційний ресурс. Розташування кривої нижче еталонної ліній 3 вказує, що сумарний вплив жорсткісної та енергетичної складових відстає від деформаційної, а отже частина деформаційного ресурсу реалізується пропорційного зростання інтегрального показника тримкості.

Аналіз графіків (рис. 4а) вказує на те, що для цілика вугілля експериментальна крива 1 після короткої початкової ділянки розташована переважно вище еталонної лінії 3, що свідчить про випереджаюче зростання жорсткісної та енергетичної складових і швидкого наближення до граничного стану. Для подрібненої породи експериментальна крива 2 на більшій частині інтервалу проходить нижче еталонної лінії 3, що вказує на уповільнене зростання інтегрального показника внаслідок ущільнення первісного матеріалу, структурної перебудови частинок і більш поступової реалізації деформаційного ресурсу.

Для виявлення загальної тенденції зміни інтегрального показника тримкості охоронних споруд застосовано апроксимацію експериментальних даних. Для більш якісного опису залежностей (табл. 1, 2) використано координати (0;0) та (1;1), що дозволяє врахувати початковий і граничний стани охоронних споруд та забезпечити коректне порівняння зміни інтегрального показника в межах деформаційного ресурсу. Це дає змогу виділити закономірний характер реалізації деформаційного ресурсу, а також встановити, чи відбувається прискорення або уповільнення зміни інтегрального стану охоронної споруди.

Для наведених експериментальних даних (рис.4а) найкраще підходить квадратична апроксимація через початок координат (рис. 4б):

-для цілика вугілля

$$K = 1,432\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{гр}}}\right) - 0,443\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{гр}}}\right)^2, \qquad (7)$$

з коефіцієнтом детермінації $r^2 = 0,957$.

-для подрібненої породи

$$K = 0,728\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{гр}}}\right) + 0,225\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{гр}}}\right)^2, \qquad (8)$$

з коефіцієнтом детермінації $r^2 = 0,923$.

Вважаємо, що

$$\text{x} = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{гр}}},$$

тоді коефіцієнт при x у формулах (7) та (8) задає початкову швидкість зростання показника K, тобто для цілика вугілля

$$\left.\frac{dK}{dx}\right|_{x\to 0} = 1{,}432,$$

а для подрібненої породи

$$\left.\frac{dK}{dx}\right|_{x\to 0} = 0{,}728.$$

Це означає, що при однаковому прирості нормалізованої деформації стан цілика змінюється інтенсивніше.

Коефіцієнт - 0,443 та + 0,225 визначають кривизну залежностей 1 і 2 (рис. 4б). Аналіз кривизни залежностей дає змогу оцінити характер зміни швидкості росту інтегрального показника тримкості в процесі реалізації деформаційного ресурсу. Для цілика вугілля кривизна спрямована вниз, а для подрібненої – вгору. При цьому модуль коефіцієнта для цілика майже у 2 рази більший, ніж для породи, що свідчить про значно сильніший нелінійний ефект у цілику вугілля. Тобто для вугільного цілика зміна швидкості росту K виражена суттєвіше, ніж для подрібненої породи.

На рис. 5 наведено графіки зміни швидкості накопичення енергії від нормалізованої відносної деформації охоронних споруд в умовах одновісного стиснення.

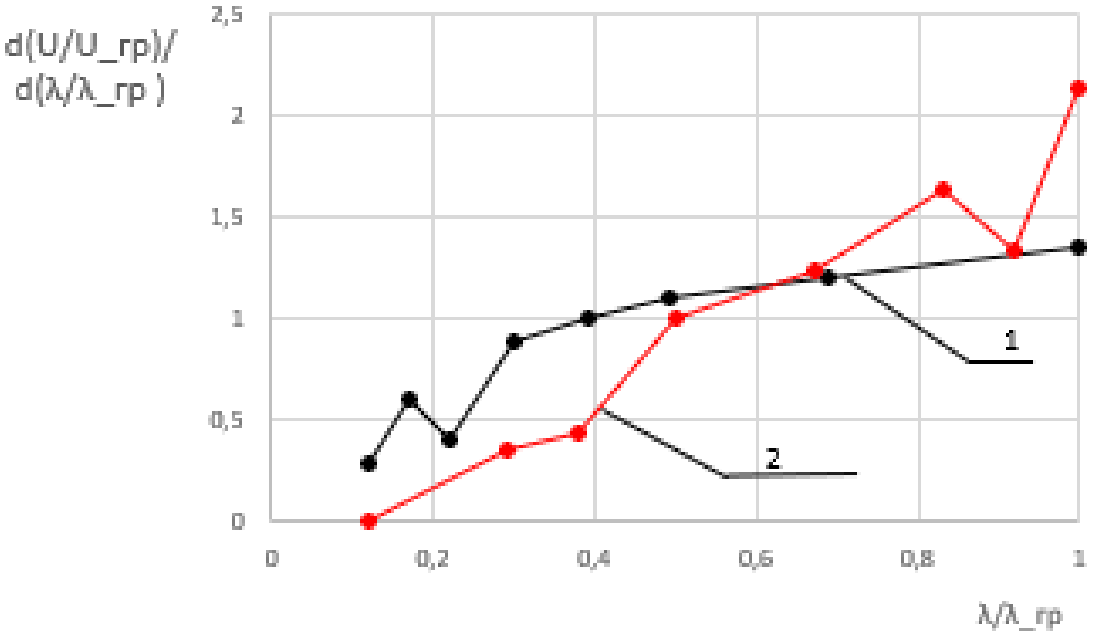


Рисунок 5. Графіки зміни швидкості накопичення енергії $\frac{d\left(\frac{U}{U_{\text{гр}}}\right)}{d\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{гр}}}\right)}$ від нормалізованої відносної деформації $\lambda / \lambda_{гр}$ охоронних споруд в умовах одновісного стиснення: 1 – вугільний цілик; 2 – закладальний матеріал з подрібненої породи.

Аналіз графіків показує, що для вугільного цілика швидкість накопичення енергії деформації зростає від *0,29* до *1,35* (рис. 5, крива 1), що свідчить про плавний характер енергетичних змін, зумовлений концентрацією напружень, розвитком пошкоджень і поступовою деградацією жорсткості. Для закладального масиву з подрібненої породи цей показник змінюється від *0,35* до *2,13* (рис. 5, крива 2), суттєво перевищуючи відповідні значення для вугільного цілика. Така відмінність

пояснюється ущільненням подрібненої породи, збільшенням кількості міжзернових контактів і формуванням більш стійкої структури закладального матеріалу, що забезпечує інтенсивніше акумулювання енергії деформації. Отже, характер зміни швидкості накопичення енергії відображає різні особливості реалізації деформаційного ресурсу охоронних споруд: для вугільного цілика – переважання втрати жорсткості та локалізації пошкоджень, для закладального масиву – переважання ущільнення та структурної перебудови дисперсного матеріалу. Це свідчить, що однаковий рівень відносної деформації для різних типів охоронних споруд супроводжується різною інтенсивністю накопичення енергії та зміною жорсткості.

Обговорення результатів дослідження деформаційно-енергетичної оцінки тримкості охоронних споруд.

У результаті експериментальних досліджень виконано деформаційно-енергетичне оцінювання тримкості охоронних споруд підготовчих гірничих виробок у вугільних шахтах, представлених вугільними циліками та закладальним масивом із подрібненої породи. Дослідження проведено на масштабних моделях в умовах одновісного стиснення при поступовому навантаженні. Для оцінювання межі деформаційного ресурсу використано тангенціальний модуль деформації як показник миттєвої жорсткості тримальної конструкції. Критерієм досягнення цієї межі прийнято стан, за якого приріст деформації ще супроводжується приростом напруження, однак жорсткість знижується до залишкового рівня, що свідчить про наближення охоронної споруди до нестійкого режиму деформування.

Для вугільного цілика встановлено, що зі зростанням відносної деформації приріст напруження поступово уповільнюється, а тангенціальний модуль деформації безперервно зменшується. За відносної деформації $\lambda = 0,29$ його значення становить $E_t = 7,58$ *МПа*, або *6,3 %* від максимального рівня. Це вказує на істотну втрату жорсткості, перехід до нерівномірного деформування, локалізацію пошкоджень і концентрацію напружень в окремих зонах об'єму цілика. За таких умов подальше накопичення енергії деформації вже не забезпечує стійкого опору навантаженню, а супроводжується розвитком дефектності матеріалу. Отже, для вугільного цілика межа деформаційного ресурсу відповідає $\lambda = 0,29$ і характеризує граничний стан, після якого його тримкість швидко втрачається.

Для закладального масиву з подрібненої породи характер зміни показників є іншим. У міру зростання відносної деформації до $\lambda = 0,6$ спостерігається інтенсивна зміна напруження і тангенціального модуля деформації, що відображає не руйнування несучої структури, а ущільнення дисперсного середовища. За цієї межі залишкова жорсткість становить $E_t = 5,24$ *МПа,* або *8,5 %* від максимального значення. На відміну від вугільного цілика, зменшення жорсткості тут пов'язане не з деградацією суцільного матеріалу, а з вичерпанням потенціалу подальшого ущільнення та посиленням бічного переміщення частинок. Це означає, що до $\lambda = 0,6$ тримкість закладального масиву формується завдяки збільшенню числа міжзернових контактів, зменшенню пустотності та перебудові зернового каркаса, тобто через структурне зміцнення первісного матеріалу.

Отримані результати свідчать, що однаковий за формою показник – тангенціальний модуль деформації – для досліджених охоронних споруд має різний фізичний зміст. Для вугільного цілика його зменшення є ознакою втрати жорсткості, розвитку пошкоджуваності та наближення до руйнування. Для закладального масиву зміна цього показника відображає ущільнення дисперсного матеріалу та формування більш стійкої контактної структури. Саме тому механізми реалізації деформаційного ресурсу для досліджених споруд є принципово різними: у вугільному цілику він реалізується через концентраційний механізм деформування, тоді як у закладальному масиві – через ущільнювально-зміцнювальний.

Оцінювання стану охоронних споруд використано з урахуванням інтегрального деформаційно-енергетичний показника K, який враховує сукупну зміну деформаційних,

жорсткісних та енергетичних параметрів у межах деформаційного ресурсу. Встановлено квадратичну залежність між показником K і нормалізованою відносною деформацією $\lambda/\lambda_{гр}$. Нелінійний характер цієї залежності свідчить про те, що зміна тримкості охоронних споруд у процесі деформування не є пропорційною і визначається особливостями внутрішньої перебудови їх структури.

Для вугільного цілика квадратична апроксимація має від'ємну кривизну, що вказує на поступове уповільнення зростання інтегрального показника К у міру збільшення деформації. Такий характер залежності відображає зниження жорсткості, локалізацію напружень і зростання ролі пошкоджувальних процесів, за яких частина накопиченої енергії витрачається на формування дефектів. Для закладального масиву, навпаки, квадратична залежність має додатну кривизну, що характеризує прискорення зростання K зі збільшенням нормалізованої відносної деформації $\lambda/\lambda_{гр}$. Це означає, що на початкових стадіях навантаження значна частина енергії витрачається на ущільнення первісного матеріалу, а на подальших стадіях вже сформована щільна структура забезпечує ефективніше сприйняття навантаження і більш інтенсивне зростання інтегрального показника.

Додаткову інформацію про механізми формування тримкості дає аналіз швидкості накопичення енергії деформації. Для вугільного цілика цей показник змінюється в межах від *0,29* до *1,35* і відображає плавне накопичення енергії на тлі розвитку пошкоджень та поступової втрати жорсткості. Для закладального масиву з подрібненої породи його значення зростає від *0,35* до *2,13,* тобто значно інтенсивніше. У середньому швидкість накопичення енергії деформації для закладального масиву є приблизно у 1,6 раза вищою, ніж для вугільного цілика. Це свідчить, що в подрібненій породі енергія деформування більшою мірою спрямовується на формування тримкості через ущільнення, зближення частинок і підвищення ефективності міжзернової взаємодії. У вугільному цілику, навпаки, накопичення енергії переважно пов'язане з розвитком внутрішніх пошкоджень, тому її зростання є ознакою наближення до втрати тримкості.

Таким чином, тримкість охоронних споруд в умовах одновісного стиснення визначається не лише рівнем навантаження або величиною деформації, а насамперед характером узгодженої зміни деформаційних, жорсткісних та енергетичних показників у межах деформаційного ресурсу. Для вугільного цілика граничне значення $\lambda = 0,29$ відповідає коротшому інтервалу збереження працездатного стану та реалізації тримкості в умовах локалізації пошкоджень і концентрації напружень. Для закладального масиву граничне значення $\lambda = 0,6$ відображає триваліший етап збереження працездатного стану, зумовлений ущільненням матеріалу, перебудовою зернового каркаса і формуванням стійкої контактної структури.

Одержані результати підтверджують доцільність використання інтегрального деформаційно-енергетичного показника як узагальненого критерію оцінювання тримкості охоронних споруд. Його застосування дає змогу кількісно описувати зміну стану споруд у процесі деформування, виявляти наближення до граничного стану та обґрунтовувати параметри тримальних конструкцій для забезпечення стійкості підготовчих виробок на виїмкових ділянках вугільних шахт.

Висновки.

1. Деформаційні, жорсткісні та енергетичні показники визначають формування тримкості охоронних споруд і межу їх деформаційного ресурсу. Встановлено, що ця межа відповідає рівню залишкової жорсткості, за якого приріст деформації ще супроводжується приростом напруження, і для досліджених споруд становить близько 6–10 % від максимального значення тангенціального модуля деформації. Для вугільного цілика межа деформаційного ресурсу досягається за $\lambda = 0,29$, а для закладального масиву з подрібненої породи – за $\lambda = 0,6$. Відмінності зумовлені різними механізмами деформування: для цілика – локалізацією напружень, розвитком пошкоджень і зниженням жорсткості, для закладального масиву – ущільненням подрібненої породи та

структурною перебудовою зернового каркаса.

2. Встановлено залежність між інтегральним деформаційно-енергетичним показником K і нормалізованою відносною деформацією $\lambda/\lambda_{гр}$, яка характеризує ступінь реалізації деформаційного ресурсу та дає змогу оцінювати особливості формування тримкості в умовах одновісного стиснення. Показано, що для вугільного цілика і подрібненої породи ця залежність має різний характер: для цілика після короткої початкової стадії спостерігається інтенсивніше зростання показника *K*, тоді як для подрібненої породи на початковому етапі проявляється стадія ущільнення, що зумовлює уповільнення зростання інтегрального показника. Такі відмінності відображають різні механізми реалізації тримкості: для вугільного цілика – через втрату жорсткості та накопичення деформаційної енергії, для подрібненої породи – через ущільнення і структурну перебудову частинок первісного матеріалу. Це дає змогу оцінювати особливості енергетичних процесів деформування, встановлювати відмінності механізмів формування тримкості та обґрунтовувати вибір типу охоронної споруди залежно від умов експлуатації.

Список літератури

1. Li G., Gao L., Ma Q., Liu H. Research on the optimization and application of coal pillar width in gob-side entry driving under hard roof condition. *Front. Earth Sci.* 2025. Vol. 13. 1603252. https://doi.org/10.3389/feart.2025.1603252
2. 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. Vol. 15(1). 314. https://doi.org/10.3390/app15010314
3. Jiang D., Wang H., Zhao T. et al. 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. Vol. 13. P. 4011-4023. https://doi.org/10.1002/ese3.70148
4. Wang M., Wang W., Xu Y. et al. Study on the new layout pattern about the gob-side entry under dynamic pressure and its surrounding rock stability control. *Energy Sci Eng*. 2024. Vol. 12. P. 1389-1410. https://doi.org/10.1002/ese3.1667
5. 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
6. 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*. 2011. Vol. 47. P. 73–84. https://doi.org/10.1134/S1062739147010096
7. Smoliński A., Malashkevych D., Petlovanyi M. et al. 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. Vol. 15(24). 9522. https://doi.org/10.3390/en15249522
8. СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони. Київ : Мінвуглепром України, 2007. 98 с.
9. Chunlai Wang, Lu Liu, Davide Elmo et al. Improved energy balance theory applied to roadway support design in deep mining. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2018. Vol. 15(4). P. 1588–1601. https://doi.org/10.1088/1742-2140/aab3a0
10. Huang S., Li Z. Optimization and Application of Coal Pillar in Fully Mechanized Mining Face based on Energy Analysis. *International Journal of Energy*. 2023. Vol. 3(3). P. 47-51. https://doi.org/10.54097/ije.v3i3.011
11. Wang W., Qiu W. Energy-Dissipation Support Technology for Large Deformation Tunnels Based on the Post-Peak Behavior of Steel Plate Buckling: A Case Study. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(21). 11972. https://doi.org/10.3390/app132111972
12. Liu X., Zhang Y., Fan D. et al. Energy driven mechanism of surrounding rock deformation and failure of mining roadway and classified control technology. *Sci Rep*. 2025. Vol. 15. 15173. https://doi.org/10.1038/s41598-025-98452-8
13. Burden R. L., Faires J. D. Numerical analysis. 9th ed. Brooks/Cole, Cengage Learning, 2011. 888 p.
14. Chapra S. C., Canale R. P. Numerical methods for engineers. 7th ed. McGraw-Hill Education, 2015. 992 p.
15. Chepiga D., Tkachuk O., Bachurin L. et al. Evaluation of deformation characteristics and bearing capacity assessment of crushed-rock backfill with various grain size distributions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4/7 (136). P. 32–41. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.337172
16. Tkachuk O., Chepiga D., Bachurin L. et al. Assessment of deformation processes in backfill masses using crushed rock models. *Technology Audit and Production Reserves.* 2025. Vol. 4/1 (84). P. 50–57. https://doi.org/10.15587/27065448.2025.333869.

References

1. Li, G., Gao, L., Ma, Q., & Liu, H. (2025). Research on the optimization and application of coal pillar width in gob-side entry driving under hard roof condition. *Frontiers in Earth Science*, 13, 1603252. https://doi.org/10.3389/feart.2025.1603252

2. 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), 314. https://doi.org/10.3390/app15010314
3. 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
4. Wang, M., Wang, W., Xu, Y., et al. (2024). Study on the new layout pattern about the gob-side entry under dynamic pressure and its surrounding rock stability control. *Energy Science & Engineering*, 12, 1389-1410. https://doi.org/10.1002/-ese3.1667
5. Volkov, S., Boichenko, H. (2023). Otsinka stiikosti vidkatnoho shtreku z vykorystanniam statystychnoho analizu vidmov arkovoho podatlyvoho kriphennia. *Journal of Donetsk Mining Institute,* 2023, №1, 16–28. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-1-16-28 . (in Ukrainian)
6. Zhang, J., Zhou, N., Huang, Y., et al. (2011). 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. https://doi.org/10.1134/-S1062739147010096
7. 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), 9522. https://doi.org/10.3390/-en15249522
8. SOU 10.1.00185790.011:2007. (2007). Pidhotovchi vyrobky na polohykh plastakh. Vybir kriplennia, sposobiv i zasobiv okhorony. Kyiv: Minvuhleprom Ukrainy. (in Ukrainian)
9. Wang, C., Liu, L., Elmo, D., Shi, F., Gao, A., Ni, P., & Zhang, B. (2018). Improved energy balance theory applied to roadway support design in deep mining. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(4), 1588–1601. https://doi.org/10.1088/1742-2140/aab3a0
10. Huang, S., & Li, Z. (2023). Optimization and Application of Coal Pillar in Fully Mechanized Mining Face based on Energy Analysis. International Journal of Energy, 3(3), 47-51. https://doi.org/10.54097/ije.v3i3.011
11. Wang, W., & Qiu, W. (2023). Energy-Dissipation Support Technology for Large Deformation Tunnels Based on the Post-Peak Behavior of Steel Plate Buckling: A Case Study. Applied Sciences, 13(21), 11972. https://doi.org/10.3390/app132111972
12. Liu, X., Zhang, Y., Fan, D., et al. (2025). Energy driven mechanism of surrounding rock deformation and failure of mining roadway and classified control technology. Scientific Reports, 15, 15173. https://doi.org/10.1038/s41598-025-98452-8
13. Burden, R. L., & Faires, J. D. (2011). Numerical analysis (9th ed.). Brooks/Cole, Cengage Learning.
14. Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2015). Numerical methods for engineers (7th ed.). McGraw-Hill Education.
15. Chepiga, D., Tkachuk, O., Bachurin, L., Bachurina, Y., Podkopayev, Y., Bielikov, A., Visyn, O., Podkopaiev, S., Bondarchuk, L., & Androshchuk, I. (2025). Evaluation of deformation characteristics and bearing capacity assessment of crushed-rock backfill with various grain size distributions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7 (136)), 32–41. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.337172
16. 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

Чепіга Дар'я Анатоліївна – кандидат технічних наук. доцент, Івано-Франківський обласний навчально-курсовий комбінат житлово-комунального господарства, (вул. Степана Бандери, 77, Івано-Франківськ, Україна, 76000). Email: daria.chepiha@donntu.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3331-9128

Вісин Олена Олександрівна – кандидат історичних наук, доцент, доцент кафедри цивільної безпеки, Луцький національний технічний університет, (вул. Львівська, 75, м Луцьк, Україна, 43018).E-mail: lena_visyn@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2361-6708

Подкопаєв Євген Сергійович – доктор філософії, технічний директор ТОВ ВК ЄЛТЕКО (вул. О.Тихого, 2, м. Костянтинівка, 85105, Україна). E-mail: podkopayev96@gmail.com

Полій Данило Васильович – аспірант кафедри управління гірничим виробництвом Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (вул. Шевченка, 9, м. Дрогобич, Львівська обл., 82100, Україна). E-mail: Polii.Daniil@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3374-815X

Демченко Владислав Володимирович – магістр, аспірант, кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій (вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, 49600, Україна). Email: demchenko.pdaba@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-1596-1010

Бріженюк Володимир Сергійович, магістр, аспірант, кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Українського державного університету науки і технологій (вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, 49600, Україна). Email: volodimirbrizenuk@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0009-0003-9690-1056

DEFORMATION-ENERGY ASSESSMENT OF THE STABILITY OF PROTECTIVE STRUCTURES IN DEVELOPMENT MINE WORKINGS

Purpose. *To assess the stability of protective structures based on deformation-energy indicators in order to ensure the stability of development mine workings and prevent roof falls in longwall mining areas of coal mines.*

Methods. *To evaluate the stability of protective structures, scaled models tested under uniaxial compression conditions were used. This approach made it possible to establish the deformation features of coal pillars under loading and of backfill material made of crushed rock under conditions of lateral expansion.*

Results. *It was established that the deformation resource limit for a coal pillar is $\lambda = 0.29$, while for backfill material made of crushed rock it is $\lambda = 0.6$. The criterion for its determination was taken as the level of residual stiffness at which an increase in deformation is still accompanied by an increase in stress; for the investigated protective structures, this corresponds to 6–10% of the maximum value of the tangent deformation modulus. It is shown that the stability of protective structures is formed by the combined action of deformation, stiffness, and energy factors generalized in a dimensionless deformation-energy indicator. At the same time, backfill material is characterized by a more intensive accumulation of deformation energy compared to a coal pillar, while the average rate of this process is approximately 1.6 times higher.*

Novelty. *For protective structures of development mine workings, a relationship was established between the integral deformation-energy stability indicator and normalized relative deformation, as well as the regularities of changes in the rate of deformation energy accumulation. This makes it possible to assess the degree of deformation resource utilization, determine the boundary of the serviceable state, and compare the features of stability formation for different types of protective structures.*

Practical implications. *The practical significance lies in the possibility of using deformation-energy indicators to assess the stability of protective structures, select their rational type depending on operating conditions, and determine the moment of approaching the limit state, which contributes to improving the stability of development mine workings in coal mines.*

Keywords: *development mine working, protective structures, stability, stiffness, deformation processes, occupational safety.*

Daria Chepiga – Candidate of Technical Sciences. Ivano-Frankivsk Regional Educational and Course Combine of Housing and Communal Services, (Stepana Bandery St., 77, Ivano-Frankivsk, 76014, Ukraine). Email: daria.chepiha@donntu.edu.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3331-9128

Olena Visyn – Candidate of Historical Sciences, Associate Professor of Department of Civil Security Lutsk National Technical University (Lvivska str., 75, Lutsk, 43018, Ukraine). E-mail: lena_visyn@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2361-6708

Yevhen Podkopaiev – Ph.D., technical director of LLC MS YELTEKO (O.Tyhoho St., 2, Kostyantynivka, Donetsk region, 85105, Ukraine). E-mail: podkopayev96@gmail.com

Danylo Polii – Department of Mining Management and Labor Protection Donetsk National Technical University, (Shevchenko str., 9, Drohobych, Lviv Oblast, 82100, Ukraine). E-mail: Polii.Daniil@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3374-815X

Vladyslav Demchenko, Master's degree, Postgraduate Student, Department of Labor Protection, Civil and Environmental Safety, ESI «Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture» of Ukrainian State University of Science and Technologies (Architect Oleh Petrov St., Bldg. 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine) Email: demchenko.pdaba@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-1596-1010

Volodymyr Brizheniuk, Master's degree, Postgraduate Student, Department of Labor Protection, Civil and Environmental Safety, ESI "Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture" of Ukrainian State University of Science and Technologies (Architect Oleh Petrov St., Bldg. 24-a, Dnipro, 49600, Ukraine) Email: volodimirbrizenuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9690-1056