

УДК 622.274.:622.862.3:334.15

DOI: 10.31474/2415-7902-2026-2-17-42-58

Бачурін Л.Л., Подкопасьєв С.В., Чепіга Д.А., Подкопасьєв Є.С.,
Вісин О.О., Бачуріна Я.П.

ОЦІНЮВАННЯ ТРИМКОСТІ ЗАКЛАДАЛЬНИХ МАСИВІВ З ПОДРІБНЕНОЇ ПОРОДИ НА ОСНОВІ ДЕФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЗА РІЗНИХ УМОВ СТИСНЕННЯ

Мета роботи. Оцінювання тримкості закладальних масивів за різних умов стиснення на основі деформаційно-енергетичних показників для обмеження переміщень та запобігання обвалень бічних порід при підтриманні гірничих виробок у виробленому просторі позаду очисного вибою.

Методи. Для оцінювання тримкості закладальних масивів застосовані масштабні моделі, які піддавалися поступовому навантаженню на пресі. Моделювання одновісного стиснення подрібненої породи відповідало частковому, а компресійного стиснення – повному закладанню виробленого простору.

Результати. При компресійному стисненні закладальний матеріал еволюціонує від пухкої поліфракційної суміші до псевдопружного конгломерату з експоненційним характером зростання напружень. Відношення повної потенціальної енергії деформування до тангенціального модуля деформації (енергетичний показник деформування R) спочатку зростає, відображаючи інтенсивну дисипацію на перепакування зерен та закриття порожнин, а потім, коли матриця повністю сформована і працює стабільно, знижується і лягає на горизонтальну асимптоту. Ця константа визначається параметрами «ідеальної» експоненційної залежності «напруження–деформація». В умовах одновісного стиснення (з можливістю бокового розширення) показник R відображає втрату тримкості сформованого масиву і досягнення стадії макроруїнування. Цей процес підпорядковується гіперболічному закону, де точка остаточної втрати тримкості є вертикальною асимптотою ($R \rightarrow \infty$). Для таких умов показник R стає індексом стійкості: поки R невеликий і стабільний – матеріал працює; початок різкого експоненційного зростання R позначає незворотні процеси в системі. Перехід R через нескінченність у область від’ємних значень – момент повного механічного розпаду тримальної структури.

Наукова новизна. Запропонований енергетичний показник деформування R , який дорівнює відношенню повної потенціальної енергії деформування до тангенціального модуля деформації. На основі аналізу експериментальних даних показано асимптотичний характер залежності показника R від відносної деформації матеріалу за різних умов стиснення.

Практична значимість. Аналіз швидкості зміни енергетичного показника деформування R дозволяє прогнозувати втрату тримкості ще до того, як напруження сягають граничних значень. Результати можуть бути використані для обґрунтування способів управління гірничим тиском або охорони підготовчих виробок у вугільних шахтах та при розробці способів моніторингу стану охоронних споруд.

Ключові слова: закладальний масив, питома енергія деформації, тримкість, деформаційні процеси, охоронні споруди.

Вступ. Актуальність закладання виробленого простору у вугільних шахтах породою, визначається необхідністю підвищення стійкості гірничих виробок в умовах зростання глибини розробки корисних копалин та ускладнення гірничо-геологічних умов. Використання шахтної породи як закладального матеріалу є технологічно доцільним, оскільки дозволяє ефективно утилізувати відходи видобутку без їх підйому на поверхню. Це знижує витрати на транспортування та складування породи, скорочує площі відвалів і мінімізує екологічне навантаження на довкілля.

Залишення породи у шахті дозволяє створити штучний опорний масив із заданими фізико-механічними характеристиками, який працює як елемент тримальної системи та частково сприймає навантаження від подрібненого масиву порід. У таких умовах закладальний масив виконує не лише тримальну, а й стабілізуючу функцію, обмежуючи розвиток тріщинуватості та зрушень порід. Крім того, закладання виробленого простору шахтною породою сприяє підвищенню безпеки праці, оскільки зменшує ризик обвалень у очисному вибої та у прилеглих до виробленого простору виробках.

Економічний ефект від використання технології із залишенням породи у шахті пов’язаний також зі скороченням витрат на ремонт і перекріплення підготовчих виробок.

Закладання виробленого простору знижує інтенсивність конвергенції та деформацій бічних порід, що безпосередньо впливає на зменшення експлуатаційних витрат протягом усього періоду функціонування виробок.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розкриття механізму зміни тримкості закладального масиву за різних умов стиснення. Ці умови визначають специфіку контактної взаємодії частинок подрібненої породи, темпи зростання жорсткості закладального матеріалу та умови переходу від етапів ущільнення до пружної деформації або руйнування. Інтеграція енергетичного підходу до аналізу геомеханічних процесів дозволяє розширити уявлення про роботу закладального масиву як активного елемента системи підтримання гірничих виробок. Оцінка здатності акумулювати та перерозподіляти енергію гірничого тиску створює передумови для прогнозування поведінки закладального масиву у межах деформаційного ресурсу, що впливає на стійкість підготовчих виробок.

Аналіз нещодавніх досліджень та публікацій. Одним з ефективних способів управління гірничим тиском у вугільних шахтах є закладання виробленого простору шахтною породою. Вважається [1, 2], що використання цього способу сприяє зниженню шкідливих проявів гірничого тиску у очисному вибої та підготовчих виробках. Слід зазначити, що застосування цього способу забезпечує стійкість виробок, сприяє зниженню втрат вугілля в надрах і попередженню його самозаймання.

Світовий досвід використання способів закладання виробленого простору вказує на пневматичний як найбільш доцільний [3, 4]. Але через значну усадку закладального масиву, забезпечення стійкості підготовчих виробок в таких умовах потребує додаткових охоронних заходів. Одним з таких є використання бутових смуг для охорони підготовчих виробок, що дозволяє використовувати закладальну інфраструктуру як для закладання виробленого простору, так і для формування бутових смуг [5]. Бутові смуги мають порівняно невисоку тримкість, що зумовлено бічним переміщенням закладального матеріалу під дією навантаження.

Повне закладання виробленого простору запобігає тріщиноутворенню навколо підготовчих виробок [2]. Дійсно, при використанні повного закладання виробленого простору, обвалення бічних порід і завали підготовчих виробок можуть бути повністю виключені. Галузеві нормативні документи [6] допускають, що при застосуванні повного закладання виробленого простору може не бути потреби в інших способах охорони підготовчих виробок.

Запобігання обваленням бічних порід та забезпечення стійкості підготовчих виробок на виїмкових ділянках вугільних шахт є одним із ключових чинників безпечного та ефективного ведення підземних робіт. Базуються ці вимоги на забезпеченні тримкості охоронних споруд. Традиційні підходи для оцінки тримкості охоронних споруд ґрунтуються переважно на силових критеріях. Однак вони не враховують енергетичну природу процесів, які відбуваються у тримальній конструкції під час навантаження. Використання енергетичних показників при деформуванні гірських порід останніми роками набуло статусу універсального підходу до кількісної оцінки тримкості охоронних споруд. Одним з основних параметрів, які впливають на їх тримкість, є питома потенціальна енергія або густина енергії деформації [7, 8]. Цей параметр характеризує здатність матеріалу охоронних споруд акумулювати та вивільнювати енергію під час навантаження, що важливо при оцінці тримкості конструкцій.

У механіці гірських порід традиційно аналізуються залежності між напруженнями і деформаціями, які характеризують опір матеріалу зовнішнім механічним впливам і його здатність до відновлення форми або руйнування при навантаженні. Це розглядається як частина загального вивчення фізико-механічних властивостей матеріалів [9]. Для більш глибокого розуміння механізмів деформування все частіше використовують енергетичні характеристики. Вони показують, як енергія, що введена в

систему при навантаженні, розподіляється між накопиченою пружною енергією та дисипованою енергією, що витрачається на пошкодження та пластичну деформацію [10]. Такий підхід був розвинений у роботах, де пропонуються енергетичні індекси крихкості або стійкості, основані на аналізі еволюції енергії до і після піку напруження. У низці публікацій [11, 12] запропоновано енергетичні критерії, які враховують співвідношення накопиченої пружної енергії до енергії, що дисипується в процесі навантаження та руйнування. Такі критерії дозволяють кількісно оцінювати здатність порід до руйнування у різних умовах.

Актуальні наукові дослідження показують, що ефективність закладання виробленого простору визначається фізико-механічними характеристиками і гранулометричним складом подрібненої породи, та геомеханічними умовами експлуатації виїмкових ділянок. Натурні спостереження підтверджують, що раціонально підібрані параметри закладання виробленого простору забезпечують безпечні умови праці. Ефективне вирішення проблеми збереження стійкості підготовчих виробок може бути досягнуто на основі аналізу деформаційно-енергетичних показників закладального масиву із залученням експериментальних методів дослідження. Це дозволить розробити нові заходи щодо збереження стійкості підготовчих виробок та уникнення обвалень бічних порід на виїмкових ділянках вугільних шахт.

Мета дослідження. Метою роботи є оцінювання тримкості закладальних масивів у різних умовах стиснення на основі деформаційно-енергетичних показників з метою ідентифікації критичних стадій деформування. Це дасть змогу уточнити оцінку прогнозованих зміщень породного масиву для уникнення обвалень покрівлі і забезпечення стійкості підготовчих виробок, підтримуваних позаду очисних вибоїв на виїмкових ділянках вугільних шахт.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- дослідити процеси деформування та ущільнення подрібненої породи в умовах одновісного стиснення;
- дослідити процеси деформування та ущільнення подрібненої породи в умовах компресійного стиснення;
- виконати порівняльний аналіз результатів одновісного та компресійного стиснення подрібненої породи з урахуванням деформаційно-енергетичних показників для оцінювання тримкості закладальних масивів.

Методи дослідження. Об'єктом дослідження були процеси деформування подрібненої породи за різних умов навантаження, які узагальнено відповідають поведінці закладальних масивів при повному та частковому закладанні.

Гіпотеза дослідження полягає у такому. Тримкість закладальних масивів з подрібненої породи при розвантаженні вуглепородного масиву визначається характером реалізації їх деформаційного ресурсу, який залежить від здатності матеріалу до пружного акумулювання докладеної зовнішньої роботи. У свою чергу, здатність матеріалу до пружного акумулювання зовнішньої роботи в кожен момент навантаження характеризується відношенням повної питомої енергії деформації до миттєвого тангенціального модуля деформації. Такий показник може бути універсальним безрозмірним інструментом, який дозволить відстежувати «життєвий цикл» геомеханічної системи за різних умов стиснення. Зміна значень цього показника дозволить визначити критичні стадії деформування та досягнення граничного стану закладального масиву з урахуванням особливостей дисипативних процесів.

Для дослідження деформаційних властивостей подрібненої породи та оцінювання тримкості закладальних масивів були проведені лабораторні дослідження на масштабних моделях. Моделювання одновісного стиснення подрібненої породи з можливістю бічного розширення первісного матеріалу відповідає частковому закладанню виробленого простору в натурних умовах. Компресійне стиснення

подрібненої породи забезпечувало деформацію матеріалу по вертикалі, що в натурних умовах відповідає повному закладанню виробленого простору. Матеріал моделей – подрібнена порода з піщано-глинистого сланця неоднорідного гранулометричного складу (0,1–5) мм. Густина у масиві 2438 кг/м³.

Для одновісного стиснення подрібнену породу розміщували у тканинній оболонці. Розміри моделі: висота $h_0=0,04$ м, ширина 0,04 м, довжина 0,08 м. Моделі були посилені по контуру шістьма дерев'яними стояками діаметром 0,005 м, що імітують каркас будової смуги. Експериментальні зразки розміщували між плітками з піщано-цементної суміші з межею міцності на стиснення $\sigma_{cm} \approx 38$ МПа, що імітували шари покрівлі та підосви.

Для дослідження деформаційних властивостей подрібненої породи в умовах компресійного стиснення використовували товстостінний сталевий циліндр діаметром 0,075 м, висотою 0,075 м та пуансон. Висота наважки подрібненої породи $h_0 = 0,063$ м.

Прийнятий геометричний масштаб моделювання 1:25 визначав висоту модельних зразків та співвідношення розмірів зерен (кусків) модельного та реального матеріалу.

Експериментальні зразки розміщували між металевими плитами пресу ГП-50. На кожному етапі поступового навантаження реєструвалися деформація моделей 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, м².

Жорсткість C (Н/м) закладального матеріалу визначали за формулою

$$C = \frac{F}{\Delta h}. \quad (3)$$

Густину енергії деформації U (МДж/м³) розраховували за діаграмою «напруження – відносна деформація» як площу під кривою до поточного значення відносної деформації:

$$U = \int_0^{\lambda} \sigma(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Оскільки дані задані дискретно, інтеграл знаходили методом чисельного інтегрування експериментальної залежності «напруження – відносна деформація», інтерпольованої кубічними сплайнами [13].

Тангенціальний модуль деформації визначали за експериментальною діаграмою «напруження – відносна деформація» як похідну, що наближено обчислювалася зі співвідношення приростів напруження та деформації методом центральної різницевої апроксимації:

$$E_t = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\lambda} = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_{i-1}}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}. \quad (5)$$

Для виявлення критичних та перехідних станів матеріалу під навантаженням пропонується енергетичний показник деформування R :

$$R = \frac{U}{E_t}, \quad (6)$$

який дозволяє ідентифікувати наближення матеріалу (структури, споруди) до втрати тримкості і є показником енергетичного стану стійкості структури. Фізично він є нормованою мірою пружної енергії масиву, що відображає структурну здатність матеріалу до пружного акумулювання докладеної зовнішньої роботи.

Проведені експерименти є частиною комплексного дослідження деформаційних процесів у закладальному масиві та охоронних спорудах з подрібненої породи [8, 14–17].

Результати оцінювання тримкості закладальних масивів на основі деформаційно-енергетичних показників за різних умов стиснення

Результати дослідження процесів деформування подрібненої породи в умовах одновісного стиснення.

У даному розділі наведено результати дослідження процесів деформування та ущільнення подрібненої породи в умовах одновісного стиснення на 7 моделях. Діаграму розмаху експериментальних даних (Δh) показано на рис. 1 (вусами позначено діапазон мінливості у 1,5 IQR – міжквартильного інтервалу, викиди позначені точками). Для подальшого аналізу використані медіанні значення Δh .

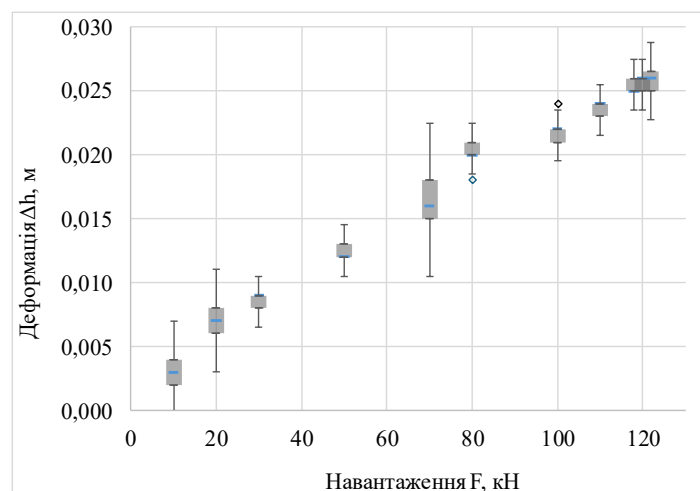


Рисунок 1 – Діаграма розмаху деформації зразків Δh , м, в умовах одновісного стиснення.

Таблиця 1 містить виміряні та розраховані показники деформування подрібненої породи за результатами експериментальних випробувань в умовах одновісного стиснення.

Таблиця 1 – Параметри одновісного стиснення подрібненої породи

F , кН	Δh , м	C , МН/м	λ	σ , МПа	E_b , МПа	U , МДж/м ³	R
10	0,003	3,33	0,075	3,1	34,55	0,129	0,00373
20	0,007	2,86	0,175	6,0	34,91	0,578	0,01656
30	0,009	3,33	0,225	8,4	61,56	0,933	0,01516
50	0,012	4,17	0,3	13,7	55,92	1,761	0,03149
70	0,016	4,38	0,4	18,1	25,04	3,373	0,13468
80	0,02	4,0	0,5	18,1	15,62	5,297	0,33902

100	0,022	4,55	0,55	20,5	25,86	6,212	0,24020
110	0,024	4,58	0,6	21,3	5,24	7,492	1,42922
118	0,025	4,72	0,625	20,9	-17,63	7,848	-0,44507
120	0,026	4,62	0,65	20,5	-51,91	8,958	-0,17256
122	0,026	4,69	0,65	19,6	-	8,960	-

На рис. 2 наведено графіки залежності напруження σ (МПа) та жорсткості C (МН/м) від відносної деформації λ закладального матеріалу.

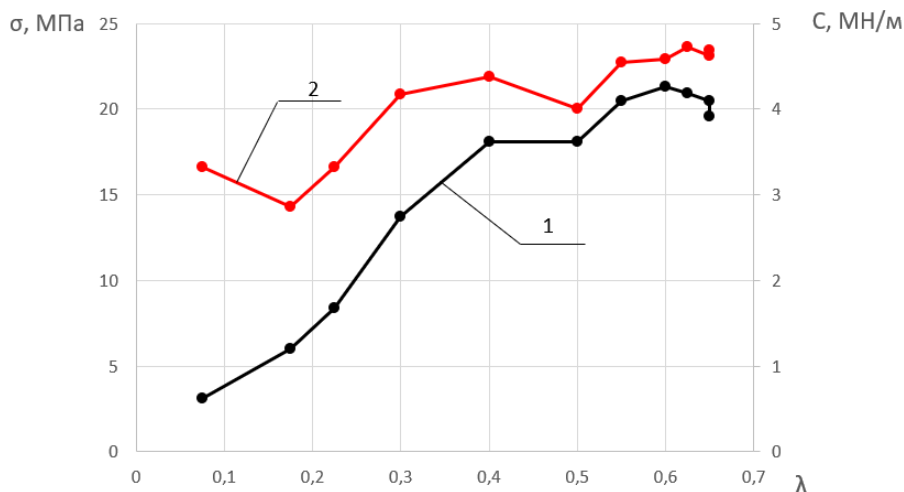


Рисунок 2 – Графіки залежності напруження σ (МПа) та жорсткості C (МН/м) від відносної деформації λ закладального матеріалу в умовах одновісного стиснення:
1 – σ (МПа); 2 – C (МН/м).

При одновісному стисненні подрібненої породи зміна величини напружень σ зі збільшенням відносної деформації λ (рис. 2, крива 1) відображає поетапний характер ущільнення подрібненої породи. На початковій стадії в діапазоні λ від 0,075 до 0,4 напруження відносно рівномірно зростає від 3,1 до 18,1 МПа, після чого уповільнюється (в діапазоні λ від 0,4 до 0,6 напруження зростають від 18,1 до 21,3 МПа). На заключній стадії, при $\lambda=0,6$, відбувається втрата тримкості, з остаточним руйнуванням при $\lambda=0,65$.

Зміна жорсткості закладального матеріалу C із зростанням відносної деформації λ має немонотонний характер (рис. 2, крива 2). На початковій стадії жорсткість зменшується з 3,33 до 2,86 МН/м, що відображає початкову стадію усадки подрібненої породи. Подальше зростання деформації супроводжується підвищенням жорсткості до 4,58–4,72 МН/м внаслідок поступового ущільнення масиву. На фінальній стадії деформування, в діапазоні λ від 0,55 до 0,65, жорсткість майже не змінюється (коливання $\pm 3\%$ відносно середнього значення).

На рис. 3 наведено графік зміни тангенціального модуля деформації E_t (МПа) залежно від рівня відносної деформації закладального матеріалу λ в умовах одновісного стиснення.

На початковому етапі ($\lambda=0,075$ – $0,175$) деформація породи супроводжується перерозподілом матеріалу в межах еластичної ємності (мішка), тангенціальний модуль деформації E_t стабільний (~ 35 МПа). При подальшому стисненні до $\lambda=0,225$ – $0,3$ відбувається інтенсивне заклинювання гострокутних фракцій, що супроводжується різким зростанням E_t – майже вдвічі (~ 63 МПа). Зростання навантаження призводить до поступової деградації опорної конструкції, що супроводжується невпинним зменшенням E_t майже до нуля в діапазоні λ від 0,3 до 0,6. Подальше навантаження супроводжується зменшенням напружень при зростанні деформацій – тангенціальний модуль деформації змінює знак.

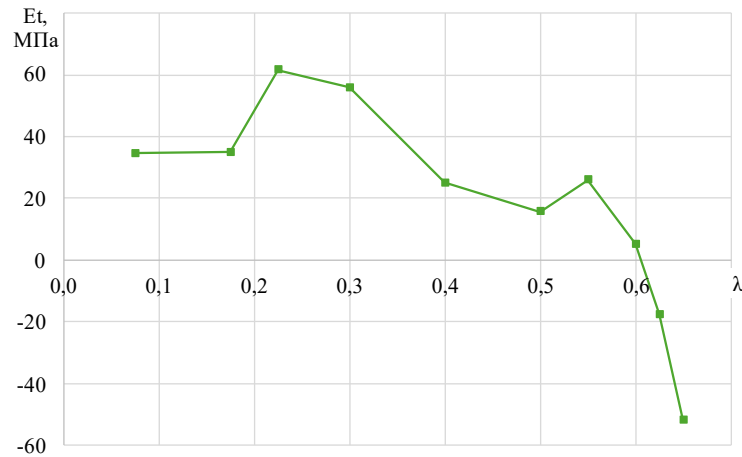


Рисунок 3 – Графік зміни тангенціального модуля деформації E_t (МПа) залежно від рівня відносної деформації закладального матеріалу λ в умовах одновісного стиснення.

Результати дослідження процесів деформування та ущільнення подрібненої породи в умовах компресійного стиснення.

У даному розділі наведено результати дослідження процесів деформування та ущільнення подрібненої породи в умовах компресійного стиснення на 9 моделях. Діаграму розмаху експериментальних даних (Δh) показано на рис. 4 (вусами позначено діапазон мінливості у 1,5 IQR – міжквартильного інтервалу, викиди позначені точками). Для подальшого аналізу використані медіанні значення Δh .

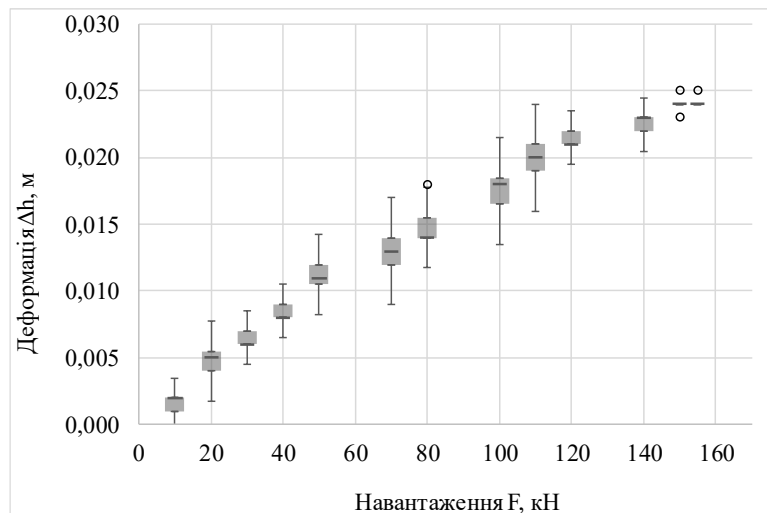


Рисунок 4 – Діаграма розмаху деформації зразків Δh , м, в умовах компресійного стиснення.

Таблиця 2 містить виміряні та розраховані показники деформування подрібненої породи за результатами експериментальних випробувань в умовах компресійного стиснення.

Таблиця 2 – Параметри компресійного стиснення подрібненої породи

F , кН	Δh , м	C , МН/м	λ	σ , МПа	E_t , МПа	U , МДж/м ³	R
10	0,002	5,0	0,032	2,26	57,4	0,046	0,00081
20	0,005	4,0	0,079	4,53	71,3	0,187	0,00262
30	0,006	5,0	0,095	6,79	95,07	0,278	0,00292
40	0,008	5,0	0,127	9,05	57,04	0,54	0,00947
50	0,011	4,55	0,175	11,32	85,56	1,014	0,01185
70	0,013	5,38	0,206	15,85	142,61	1,431	0,01003
80	0,014	5,71	0,222	18,11	85,56	1,703	0,01990
100	0,018	5,56	0,286	22,64	71,3	3,041	0,04265

110	0,02	5,5	0,317	24,90	95,07	3,766	0,03961
120	0,021	5,71	0,333	27,16	142,61	4,186	0,02935
140	0,023	6,09	0,365	31,69	142,61	5,040	0,03534
150	0,024	6,25	0,381	33,95	213,91	5,621	0,02628
155	0,024	6,46	0,381	35,09	—	5,638	—

На рис. 5 наведено графіки зміни напруження σ (МПа) та жорсткості C (МН/м) із зростанням відносної деформації λ закладального матеріалу.

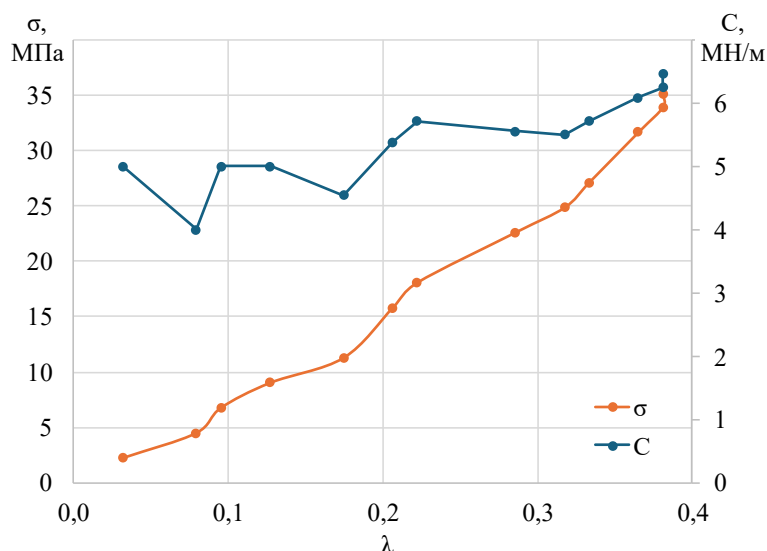


Рисунок 5 – Графіки зміни напруження σ (МПа) та жорсткості C (МН/м) від відносної деформації λ закладального матеріалу в умовах компресійного стиснення.

Наростання напружень при компресійному стисненні відбувається за близьким до квадратичного законом з переходом до експоненційного зростання при наближенні до граничної деформації (в діапазоні λ від 0,286 до 0,381). Водночас відбувається періодична зміна жорсткості C в діапазоні від 4 до 5,7 МПа внаслідок перепакування зерен матеріалу в процесі ущільнення. Максимальна жорсткість (від 6,09 до 6,46 МПа) досягається після вичерпання резерву ущільнення і перетворення матеріалу у конгломерат.

На рис. 6 наведено графік зміни тангенціального модуля деформації E_t (МПа) в процесі деформації закладального матеріалу в умовах компресійного стиснення.

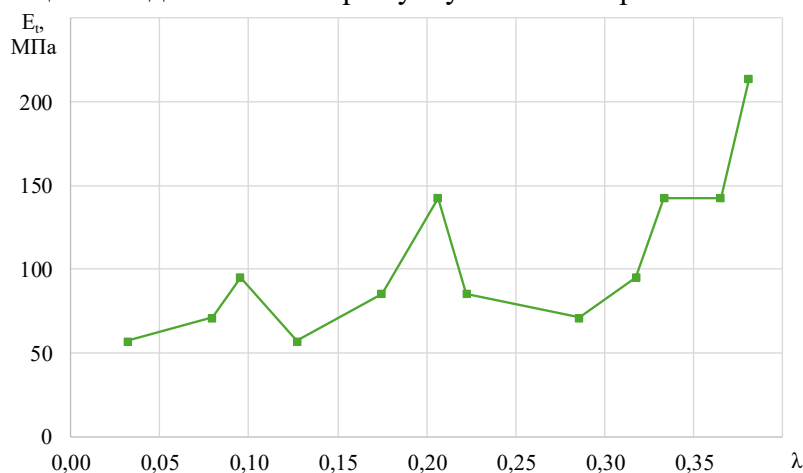


Рисунок 6 – Графік зміни тангенціального модуля деформації E_t (МПа) залежно від відносної деформації λ закладального матеріалу в умовах компресійного стиснення.

Періодичний характер зміни тангенціального модуля деформації E_t (рис. 6), подібний до періодичної зміни жорсткості (рис. 5), відображає послідовний процес перепакування зерен матеріалу. Досягши граничного ущільнення, матеріал перетворюється на щільний конгломерат, який поводить себе майже як моноліт, E_t сягає максимуму (214 МПа), що майже в чотири рази більше початкового значення (57 МПа).

Результати порівняльного аналізу енергетичного показника деформування в умовах одновісного та компресійного стиснення подрібненої породи.

Порівняльний аналіз механізмів деформування і тримкості закладальних масивів здійснено на основі запропонованого енергетичного показника деформування R , який є нормованою мірою пружної енергії масиву, що відображає структурну здатність матеріалу до пружного акумулювання докладеної зовнішньої роботи.

У табл. 3 наведені значення відносної деформації λ та енергетичного показника деформування R для порівняльного аналізу.

Таблиця 3 – Значення відносної деформації λ та енергетичного показника деформування R подрібненої породи за різних умов стиснення

Одновісне стиснення		Компресійне стиснення	
λ	R	λ	R
0,0750	0,00373	0,032	0,00081
0,1750	0,01656	0,079	0,00262
0,2250	0,01516	0,095	0,00292
0,3000	0,03149	0,127	0,00947
0,4000	0,13468	0,175	0,01185
0,5000	0,33902	0,206	0,01003
0,5500	0,24020	0,222	0,01990
0,6000	1,42922	0,286	0,04265
0,6250	-0,44507	0,317	0,03961
0,6500	-0,17256	0,333	0,02935
-	-	0,365	0,03534
-	-	0,381	0,02628

На рис. 7 наведено графіки еволюції енергетичного показника деформування R за різних умов стиснення закладального матеріалу.

Залежно від напружено-деформованого стану, еволюція енергетичного показника деформування R підпорядковується двом фундаментальним закономірностям:

1. Режим одновісного стиснення (з боковим розширенням) (рис. 7, а): при деформуванні масиву в умовах можливості бокового розширення зміна показника R відбувається за гіперболічним законом. Істинна точка макроскопічного руйнування та повної втрати тримкості ($E_t = 0$) математично ідентифікується як вертикальна асимптота цієї гіперболи ($R \rightarrow \infty$). Характер наближення до асимптоти дозволяє ідентифікувати наближення руйнування ще до досягнення граничного напруження.

Залежність показника R від відносної деформації можна апроксимувати у такому вигляді:

$$R(\lambda) = \frac{a}{\lambda - \lambda_c}, \quad (7)$$

де a – коефіцієнт пропорційності гіперболічної залежності, який має бути від'ємним, оскільки криві гіперболи мають бути розташовані в II та IV квадрантах координатної площини (якщо $\lambda_c = 0$);

λ_c – гранична відносна деформація, яка визначає положення вертикальної асимптоти.

Значенням R , наведеним у таблиці 3 для умов одновісного стиснення відповідає

гіперболічна залежність із $a = -0,0091$ та $\lambda_c = 0,606$ з коефіцієнтом детермінації 0,987. Значення λ_c корелює із наведеними вище результатами дослідження процесів деформування подрібненої породи в умовах одновісного стиснення.

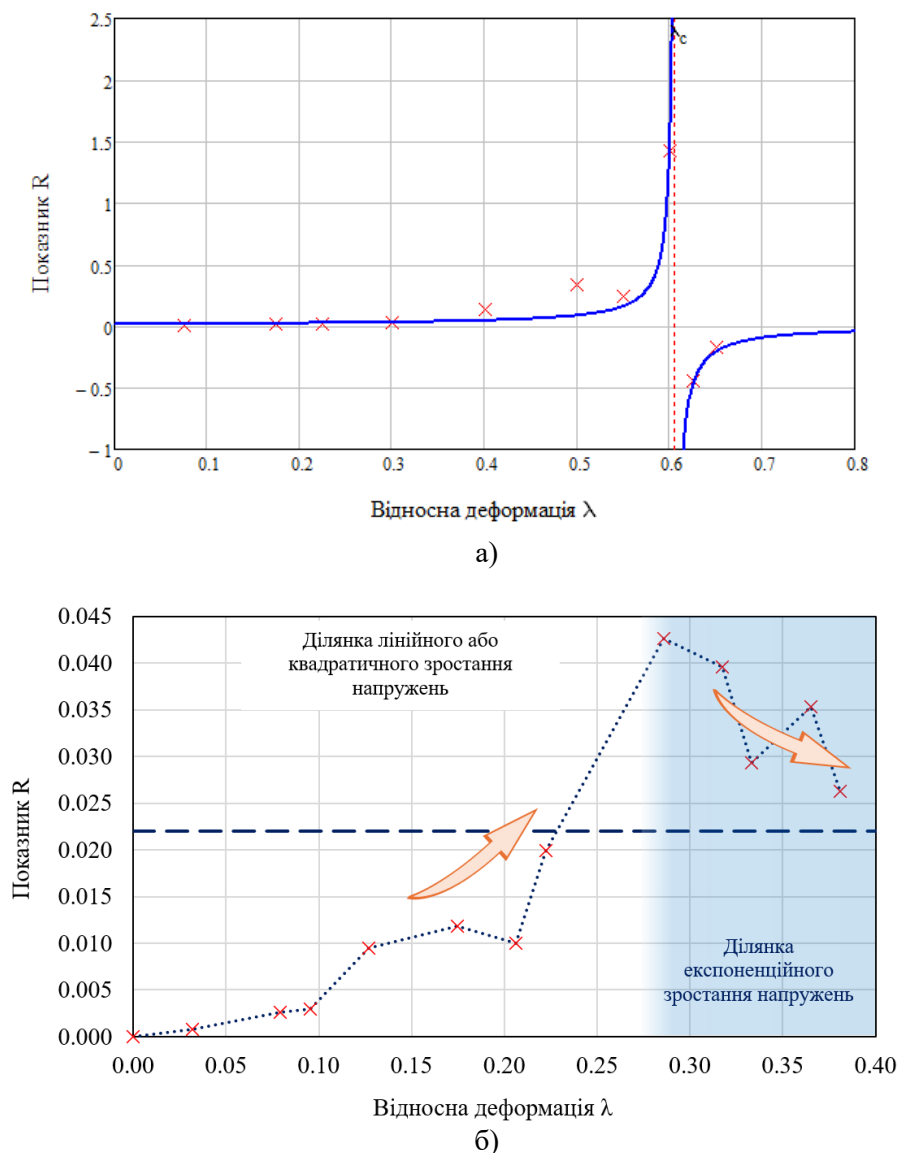


Рисунок 7 – Графіки зміни енергетичного показника деформування R із зростанням відносної деформації λ за різних умов стиснення закладального матеріалу: а) одновісного; б) компресійного.

2. При компресійному стисненні (рис. 7, б) на етапі ущільнення подрібненої породи показник R спочатку стрімко зростає, відображаючи інтенсивну дисипацію енергії на структурні перебудови (перепаккування зерен та закриття порожнин). Після досягнення матеріалом квазімонолітного стану (вичерпання резерву ущільнення) значення R , періодично коливаючись, поступово знижується.

Відомо, що зростання напружень при компресійному стисненні попередньо ущільнених ґрунтів та подрібненої породи відбувається експоненційно [18, 19]. В такому разі можна показати, що показник R в такому випадку має бути незмінним. Так, якщо залежність напружень від відносної деформації має вигляд

$$\sigma(\lambda) = a\sigma^{b\lambda}, \quad (8)$$

то можна отримати вираз для питомої потенційної енергії деформації U шляхом інтегрування залежності (8):

$$U = \int \sigma(\lambda) d\lambda = \frac{a}{b} \sigma^{b\lambda},$$

та вираз для тангенціального (дотичного) модуля деформації E_t шляхом диференціювання залежності (8):

$$E_t = \frac{d\sigma(\lambda)}{d\lambda} = ab\sigma^{b\lambda}.$$

Тоді, із співвідношення (6) отримаємо, що

$$R = \frac{\frac{a}{b} \sigma^{b\lambda}}{ab\sigma^{b\lambda}} = \frac{1}{b^2}.$$

Якщо прийняти, що не ущільнений попередньо матеріал може деформуватися з лінійним або квадратичним зростанням напружень, аналогічно можна визначити характер зміни показника R для початкової стадії ущільнення подрібненої породи.

Якщо залежність напружень від відносної деформації має вигляд полінома

$$\sigma(\lambda) = a\lambda^2 + b\lambda + c,$$

то

$$U = \int \sigma(\lambda) d\lambda = \frac{a}{3} \lambda^3 + \frac{b}{2} \lambda^2 + c\lambda,$$

$$E_t = \frac{d\sigma(\lambda)}{d\lambda} = b + 2a\lambda$$

і залежність R від λ також має вигляд квадратичного (якщо $b = 0$) або кубічного полінома:

$$R = \frac{\frac{a}{3} \lambda^3 + \frac{b}{2} \lambda^2 + c\lambda}{b + 2a\lambda}.$$

Якщо залежність напружень від відносної деформації є лінійною:

$$\sigma(\lambda) = a\lambda + b,$$

то

$$U = \int \sigma(\lambda) d\lambda = \frac{a}{2} \lambda^2 + b\lambda,$$

$$E_t = \frac{d\sigma(\lambda)}{d\lambda} = a$$

і залежність R від λ має вигляд квадратичного полінома:

$$R = \frac{\frac{a}{2} \lambda^2 + b\lambda}{a} = \frac{1}{2} \lambda^2 + \frac{b}{a} \lambda.$$

Таким чином, можна висувати, що еволюція енергетичного показника деформування (рис. 7, б) відображає перехід від квадратичного або лінійного зростання навантажень до експоненційного.

Обговорення результатів оцінювання тримкості закладальних масивів на основі деформаційно-енергетичних показників. В результаті проведених досліджень виконано оцінювання тримкості закладальних масивів з подрібненої породи на основі енергетичного показника деформування за різних умов стиснення. В експериментальних дослідженнях використано природний матеріал – подрібнену породу неоднорідного гранулометричного складу. Розглядалось одновісне стиснення подрібненої породи з можливістю бічного розширення первісного матеріалу від навантаження (табл. 1), що

відповідало частковому закладанню виробленого простору породою (в тому числі у вигляді бутових смуг). Компресійне стиснення подрібненої породи (табл. 2) відповідало повному закладанню виробленого простору. Порівняльний аналіз механізмів деформування та зміни тримкості закладальних масивів за різних умов стиснення виконано на основі безрозмірного енергетичного показника деформування R ((6), табл. 1, 2, 3, рис. 7). Характер зміни R відображає внутрішні закономірності деформування закладальних масивів і зберігають зміст незалежно від розмірів моделі.

Аналіз зміни напружень, жорсткості матеріалу і тангенціального модуля деформації в процесі навантаження демонструє характерну поведінку сипучих матеріалів в умовах можливості бокового розширення та в умовах компресійного стиснення.

В умовах одновісного стиснення напруження спочатку (до $\lambda=0,4$) наростають майже лінійно (рис. 2, крива 1, табл. 1). До остаточної втрати тримкості при $\lambda \sim 0,6$ зростання напружень відбувається повільніше. При цьому зміна жорсткості (рис. 2, крива 2, табл. 1) та зміна тангенціального модуля деформації E_t (рис. 3, табл. 1) відображають спочатку стадію формування опорного скелету в процесі перерозподілу матеріалу ($\lambda=0,075-0,175$), потім – стадію заклинювання гострокутних фракцій (опорний скелет сформований), що супроводжується різким зростанням E_t майже вдвічі ($\lambda=0,175-0,3$). Оскільки бокове розширення не обмежене, подальше зростання навантаження супроводжується поступовою деградацією опорного скелету, що супроводжується невинним зменшенням E_t майже до нуля в діапазоні λ від 0,3 до 0,6. Зміна знаку тангенціального модуля деформації відображає настання макроскопічного руйнування і остаточну втрату тримкості.

Зміна величини напружень, жорсткості матеріалу і тангенціального модуля деформації при компресійному стисненні подрібненої породи демонструє послідовний процес внутрішніх змін: відбувається періодична зміна жорсткості в діапазоні від 4 до 5,7 МПа внаслідок перепакування зерен матеріалу в процесі ущільнення. Синхронне зростання тангенціального модуля деформації відображає фази пружного стиснення сформованого скелета, падіння – момент «обвалу» структури всередині матриці, коли під тиском зерна породи знаходять нову, більш щільну упаковку, або зерна зазнають додаткового подрібнення. Максимальна жорсткість (від 6,09 до 6,46 МПа) досягається після вичерпання резерву ущільнення і перетворення матеріалу у конгломерат; тангенціальний модуль деформації сягає максимуму (214 МПа), що майже в чотири рази більше початкового значення (57 МПа).

Очевидно, що тримкість закладального масиву з подрібненої породи формується за двома принципово різними механізмами, зумовленими кінематикою його стиснення. Різниця між механізмами ущільнення полягає в тому, що при одновісному стисненні з вільним бічним розширенням енергія витрачається переважно на дилатансійні процеси (перекомпонування та руйнування частинок, тертя), що дозволяє розсіяти більший об'єм енергії, але не дозволяє забезпечити тривалий відпір. Повільне зростання напружень на фінальній стадії функціонування споруди ускладнює прогнозування величини критичної деформації, за якою настає остаточна втрата тримкості. При компресійному стисненні не ущільненого попередньо матеріалу відбувається послідовна зміна характеру деформування: від початкового перепакування із заповненням порожнин дрібними фракціями до додаткового подрібнення та утворення більш щільної поліфракційної суміші. Внаслідок ущільнення матеріалу більша частина енергії починає витрачатися на пружне деформування, що забезпечує більший відпір.

Порівняльний аналіз співвідношення повної потенційної енергії деформації та тангенціального модуля деформації (енергетичний показник деформування R) показав, що його можна використовувати як індикатор змін механізмів деформування подрібненого матеріалу. В умовах можливості бокового розширення зміна показника R

відбувається за гіперболічним законом. Вертикальна асимптота гіперболи ($R \rightarrow \infty$) відповідає критичному значенню відносної деформації, за яким настає остаточна втрата тримкості. Інтенсивне зростання показника R при наближенні до асимптоти дозволяє ідентифікувати критичний стан ще до досягнення граничного напруження. При компресійному стисненні енергетичний показник деформування R дозволяє відрізнити фази хаотичного ущільнення внаслідок перепакування зерен матеріалу (R зростає за квадратичним законом) та фазу наростання пружного відпору внаслідок вичерпання резерву ущільнення (R поступово зменшується до теоретичного постійного значення, що відповідає експоненційному закону зростання напружень при навантаженні ущільненого ґрунту або подрібненої породи). Коливання енергетичного показника деформування R відносно ідеалізованих кривих відображають дисипацію енергії на структурні перебудови всередині закладального масиву.

Оскільки запропонований показник деформування R є безрозмірним, його можна використовувати для порівняння результатів у абсолютно різних умовах – на зразках різного масштабу, за різних рівнів навантаження. Це дозволяє прогнозувати поведінку закладального матеріалу в реальних умовах за результатами лабораторних випробувань масштабних моделей.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та оптимізації параметрів закладальних масивів у глибоких вугільних шахтах з урахуванням їх деформаційно-енергетичних характеристик. Встановлені енергетичні закономірності деформації та зміни тримкості закладальних матеріалів дозволяють підвищити ефективність управління станом підготовчих виробок і обґрунтувати вибір раціональних конструктивних рішень. Водночас, для забезпечення повноти оцінки тримкості необхідно враховувати вплив циклічних і динамічних навантажень, які суттєво змінюють механізми деформування та енергетичні показники деформування. У зв'язку з цим подальші дослідження доцільно спрямувати на встановлення закономірностей формування тримкості охоронних споруд в умовах змінних і ударних навантажень.

Висновки. При компресійному стисненні (повна закладка) закладальний матеріал еволюціонує від пухкої поліфракційної суміші до псевдопружного конгломерату з експоненційним характером зростання напружень. Відношення повної потенціальної енергії деформування до тангенціального модуля деформації (енергетичний показник деформування R) спочатку зростає, відображаючи інтенсивну дисипацію на перепакування зерен та закриття порожнин, а потім, коли матриця повністю сформована і працює стабільно, знижується і лягає на горизонтальну асимптоту. Ця константа визначається параметрами «ідеальної» експоненційної залежності «напруження–деформація». В умовах одновісного стиснення (з можливістю бокового розширення) показник R відображає втрату тримкості сформованого масиву та досягнення стадії макроруйнування. Цей процес підпорядковується гіперболічному закону, де точка остаточної втрати тримкості є вертикальною асимптотою ($R \rightarrow \infty$). Для таких умов показник R стає індексом стійкості: поки R невеликий і стабільний – матеріал працює; початок різкого експоненційного зростання R позначає незворотні процеси в системі. Перехід R через нескінченність у область від'ємних значень – момент повного механічного розпаду тримальної структури.

Використання безрозмірного енергетичного показника деформування R дозволяє використовувати його як універсальний критерій подібності при переході від моделей до натурних об'єктів та виявляти характерні докритичні та критичні стадії навантаження.

Список літератури

1. Zhang, Q., Zhang, J., Wu, Z., Chen, Y. Overview of Solid Backfilling Technology Based on Coal-Waste Underground Separation in China. Sustainability, 2019. 11(7). <https://doi.org/10.3390/su11072118>
2. 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). <https://doi.org/10.3390/en15249522>
3. Witthaus, H. Gutberlet, K. Junker, M. (2013). Stowing on longwall faces on the basis of experience acquired in the German coal mining industry. *Mining Report*. 149(S1). <https://doi.org/10.1002/mire.201300422>
4. Junker, M. Witthaus, H. (2013). Progress in the research and application of coal mining with stowing. *International Journal of Mining Science and Technology*. Volume 23, Issue 1, 2013, P. 7-12 <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.01.002>
5. Zhang, Q., Zhang, J., Guo, S., Gao, R., & Li, W. (2015). Design and application of solid, dense backfill advanced mining technology with two pre-driving entries. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(1), 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.12.008>
6. СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони. - Наказ від 09.11.2007 р. № 494 «Про затвердження та надання чинності стандарту Мінвуглепрому України СОУ 10.1.00185790.011:2007». Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=51002
7. Chepiga, D., Podkopaiev, S., Kayun, O., Bielikov, A., Podkopaiev, Y., Kipko, O., & Pidhurna, O. (2024). Assessing the stability of protective structures in preparatory mining workings under conditions of static load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1 (129), 57–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304721>
8. Tkachuk, O., Chepiga, D., Bachurin, L., Podkopaiev, S., Bachurina, Y., Podkopaiev, 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>
9. 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.
10. Gong, F., Wang, Y. (2022). A New Rock Brittleness Index Based on the Peak Elastic Strain Energy Consumption Ratio. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(3), 1571–1582. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02738-y>
11. Rahimzadeh Kivi, I., Ameri, M., Molladavoodi, H. (2018). Shale brittleness evaluation based on energy balance analysis of stress-strain curves. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 167(March), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.061>
12. Li, L., Li, G., Gong, W., Wang, J., Deng, H. (2019). Energy Evolution Pattern and Roof Control Strategy in Non-Pillar Mining Method of Goaf-Side Entry Retaining by Roof Cutting—A Case Study. *Sustainability*, 11(24), 7029. <https://doi.org/10.3390/su11247029>
13. Benker, H. (1999). Integration. In: *Practical Use of Mathcad®*. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0539-8_20
14. Чепіга Д.А., Полій Д.В., Бачурін Л.Л., Подкопаєв С.В., Подкопаєв Є.С., Бачуріна Я.П. Оцінка жорсткості закладальних масивів на моделях з подрібненої породи поліфракційного складу в умовах компресійного стиснення. *Вісті Донецького гірничого інституту*. № 2, 2025. с.15-28. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2025-2-15-28>
15. Бачурін, Л. Л., Іорданов, І. В., Сімонова, Ю. І., Король, А. В., Подкопаєв, Є. С., & Каюн, О. П. (2020). Експериментальні дослідження деформаційних характеристик закладальних масивів. *Технічна інженерія*, (2(86)), 136–149. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-136-149](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-136-149)
16. Chepiga, D., Tkachuk, O., Bachurin, L., Bachurina, Y., Podkopaiev, 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/10.15587/1729-4061.2025.337172>
17. Tkachuk, O., Chepiga, D., Bachurin, L., Podkopaiev, S., Bachurina, Y., Podkopaiev, 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>
18. Pappas, D. M., & Mark, C. (1993). Behavior of simulated longwall gob material. *Report of Investigations*.
19. ДСТУ Б В.2.1-4-96. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості. Чинний від 1996-11-01. Вид. офіц. Київ : Держ. ком. України у справах містобудування і архітектури, 1997. 39 с.

References

1. Zhang, Q., Zhang, J., Wu, Z., Chen, Y. (2019). Overview of Solid Backfilling Technology Based on Coal-Waste Underground Separation in China. *Sustainability*, 11(7), 2118. <https://doi.org/10.3390/su11072118>.
2. 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>.
3. Witthaus, H., Gutberlet, K., Junker, M. (2013). Stowing on longwall faces on the basis of experience acquired in the German coal mining industry. *Mining Report*, 149(S1). <https://doi.org/10.1002/mire.201300422>.

4. Junker, M., Witthaus, H. (2013). Progress in the research and application of coal mining with stowing. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23(1), 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.01.002>.
5. Zhang, Q., Zhang, J., Guo, S., Gao, R., & Li, W. (2015). Design and application of solid, dense backfill advanced mining technology with two pre-driving entries. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(1), 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.12.008>
6. SOU 10.1.00185790.011:2007. (2007). Pidhotovchi vyrobky na polohykh plastakh. Vybir kriplennia, sposobiv i zasobiv okhorony. [Preparatory workings on flat seams. Choice of support, methods and means of protection]. Order of the Ministry of Coal Industry of Ukraine No. 494. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=51002 (in Ukrainian).
7. Chepiga, D., Podkopaiev, S., Kayun, O., Bielikov, A., Podkopayev, Y., Kipko, O., Pidhurna, O. (2024). Assessing the stability of protective structures in preparatory mining workings under conditions of static load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1(129)), 57–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304721>.
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>.
9. Shashenko, A. N., Maikherchuk, T., Sdvizhkova, E. A. (2005). Heomekhanichni protsesy u porodnykh masyvakh. Monohrafiia. [Geomechanical processes in rock masses. Monograph]. Dnipropetrovsk: National Mining University. (in Ukrainian).
10. Gong, F., Wang, Y. (2022). A New Rock Brittleness Index Based on the Peak Elastic Strain Energy Consumption Ratio. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(3), 1571–1582. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02738-y>.
11. Rahimzadeh Kivi, I., Ameri, M., Molladavoodi, H. (2018). Shale brittleness evaluation based on energy balance analysis of stress-strain curves. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 167, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.061>.
12. Li, L., Li, G., Gong, W., Wang, J., Deng, H. (2019). Energy Evolution Pattern and Roof Control Strategy in Non-Pillar Mining Method of Goaf-Side Entry Retaining by Roof Cutting – A Case Study. *Sustainability*, 11(24), 7029. <https://doi.org/10.3390/su11247029>.
13. Benker, H. (1999). Integration. In: Practical Use of Mathcad®. Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0539-8_20.
14. Chepiha, D. A., Polii, D. V., Bachurin, L. L., Podkopaiev, S. V., Podkopaiev, Ye. S., Bachurina, Ya. P. (2025). Otsinka zhorstkosti zakladalnykh masyviv na modeliakh z podribnenoї porody polifraktsiinoho skladu v umovakh kompresiiynoho stysnennia. [Assessment of backfill mass stiffness on polyfractional crushed rock models under compression]. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*, 2, 15–28. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2025-2-15-28> (in Ukrainian).
15. Bachurin, L. L., Iordanov, I. V., Simonova, Yu. I., Korol, A. V., Podkopaiev, Ye. S., Kaiun, O. P. (2020). Experimental studies of the deformation characteristics of filling massifs. *Technical Engineering*, (2 (86)), 136–149. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-136-149](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-136-149).
16. 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/10.15587/1729-4061.2025.337172>.
17. 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>.
18. Pappas, D. M., & Mark, C. (1993). Behavior of simulated longwall gob material. Report of Investigations.
19. Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Metody laboratornoho vyznachennia kharakterystyk mitsnosti i deformovanosti (DSTU B V.2.1-4-96). (1997). Derzhavnyi komitet Ukrainy u spravakh mistobuduvannia i arkhitektury.

Надійшла до редакції 02.04.2026

Bachurin L., Podkopaiev S., Chepiga D., Podkopayev Ye., Visyn O., Bachurina Ya.

ASSESSING THE BEARING CAPACITY OF CRUSHED-ROCK BACKFILL MASSES BASED ON DEFORMATION-ENERGY INDICATORS UNDER DIFFERENT COMPRESSION CONDITIONS

Purpose. To assess the bearing capacity of backfill masses under various compression conditions based on deformation-energy indicators to limit displacements and prevent wall rock caving during the maintenance of

mine workings in the goaf behind the longwall face.

Methods. Scale models subjected to gradual loading on a press were used to evaluate the bearing capacity of backfill masses. Modeling of uniaxial compression of crushed rock corresponded to partial backfilling, while confined compression testing corresponded to full backfilling of the goaf.

Findings. Under confined compression (full backfilling), the backfill material evolves from a loose polyfractional mixture to a pseudo-elastic conglomerate. The ratio of the total potential deformation energy to the tangential deformation modulus – deformation energy indicator R – initially increases, reflecting intensive dissipation on grain repacking and void closure. Subsequently, when the matrix is fully formed and operates stably, it decreases and levels off to a horizontal asymptote. This constant is determined by the parameters of an "ideal" exponential "stress-strain" relationship. Under uniaxial compression (with the possibility of lateral expansion), the R indicator reflects the loss of bearing capacity of the formed mass and the transition to the macro-failure stage. This process follows a hyperbolic law, where the point of ultimate loss of bearing capacity is a vertical asymptote ($R \rightarrow \infty$). Under such conditions, the R indicator becomes a stability index: if R is small and stable, the material continues to function; the onset of sharp exponential growth in R marks irreversible processes within the system. The transition of R through infinity into the range of negative values represents the moment of complete mechanical disintegration of the load-bearing structure.

Originality. A deformation energy indicator R is proposed, which equals the ratio of the total potential deformation energy to the tangential deformation modulus. Based on experimental data, the asymptotic nature of the R indicator's dependence on the material's relative deformation under different compression conditions is shown.

Practical implications. Analysis of the rate of change of the deformation energy indicator R allows for predicting the loss of bearing capacity even before the stresses reach limit values. The results can be used to justify ground control methods in coal mines and in the development of methods for monitoring the state of secondary support structures.

Keywords: backfill mass, specific strain energy, bearing capacity, deformation processes, secondary support structures.

Відомості про авторів

Бачурін Леонід Леонідович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління гірничим виробництвом і охорони праці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (вул. Шевченка, 9, м. Дрогобич, Львівська обл., 82100, Україна). E-mail: leonid.bachurin@donntu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2513-7284>

Подкопайєв Сергій Вікторович, д-р. техн. наук, проф., професор кафедри цивільної безпеки, Луцький національний технічний університет, (вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018). E-mail: s.podkopaiev@lntu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6051-4719>

Чепіга Дар'я Анатоліївна, канд. техн. наук, доцент, Івано-Франківський обласний навчально-курсний комбінат, (вул. С. Бандери, 77, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000). Email: da.chepiga@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3331-9128>

Подкопайєв Євген Сергійович – доктор філософії, технічний директор ТОВ «ВК ЕЛТЕКО» (вул. О. Тихого, 2, м. Костянтинівка, 85105, Україна). E-mail: podkopayev96@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2217-3017>

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

Бачуріна Ярослава Павлівна, старший викладач кафедри управління гірничим виробництвом і охорони праці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (вул. Шевченка, 9, м. Дрогобич, Львівська обл., 82100, Україна). E-mail: yaroslava.bachurina@donntu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-040X>

Bachurin Leonid, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining Management and Labor Protection, Donetsk National Technical University (9 Shevchenko Str., Drohobych, Lviv Oblast, 82100, Ukraine). E-mail: leonid.bachurin@donntu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2513-7284>

Podkopaiev Serhii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Civil Security, Lutsk National Technical University (Lvivska str., 75, Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43018). E-mail: s.podkopaiev@lntu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6051-4719>

Chepiga Daria, Candidate of Technical Sciences, Ivano-Frankivsk Regional Training and Course Complex (S. Bandery str. 77, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76000). Email: da.chepiga@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3331-9128>

Podkopayev Yevgen, Doctor of Philosophy, Technical Director LLC MC ELTEKO, Kostyantynivka, Ukraine. E-mail: podkopayev96@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2217-3017>

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

Bachurina Yaroslava, Senior Lecturer at the Department of Mining Management and Labor Protection, Donetsk National Technical University (9 Shevchenko Str., Drohobych, Lviv Oblast, 82100, Ukraine). E-mail: yaroslava.bachurina@donntu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-040X>