ISSN 2664-4304

UDC 622.268:622.831:334.45
DOI: 10.36804/nndipbop.41-3-4.2025.63-71
RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ОЦІНКА ТРИМКОСТІ ОХОРОННИХ СПОРУД ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК ТА ЗАПОБІГАННЯ ОБВАЛЕНЬ

С. В. Подкопаєв[1], Л. Л. Бачурін[2,3], Д. В. Полій[2], Д. А. Чепіга[4*], Я. П. Бачуріна[2], Є. С. Подкопаєв[5]

[1] Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна
[2] ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Дрогобич, Україна,
[3] ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна
[4] Івано-Франківський обласний навчально-курсовий комбінат *житлово-комунального господарства*, Івано-Франківськ, Україна
[5] ТОВ «ВК ЕЛТЕКО», Kostiantynivka, Україна

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

Отримано: 03 листопада 2025; ***Прийнято:*** 01 грудня 2025

Цитувати як: Подкопаєв, С. В., Бачурін, Л. Л., Полій, Д. В., Чепіга, Д. А., Бачуріна, Я. П., Подкопаєв, Є. С. (2025). Оцінка тримкості охоронних споруд для підтримання підготовчих виробок та запобігання обвалень. *Проблеми охорони праці в Україні*, 41(3–4), 63-71

Мета. Оцінити тримкість охоронних споруд підготовчих виробок, підтримуваних у виробленому просторі вуглепородного масиву, для збереження їх стійкості та підвищення безпеки праці гірників на робочих місцях виїмкової ділянки вугільної шахти, шляхом запобігання обвалень бічних порід.

Методологія. Для оцінки тримкості охоронних споруд використовувалися масштабні моделі, що піддавалися навантаженню на пресі. Моделювання носило якісний характер, спрямований на вивчення механізму деформації, зміни форми та послідовності руйнування охоронних споруд.

Висновки. Для охоронних споруд у вигляді цілків вугілля, в межах їх деформаційного ресурсу (відносна деформація $\lambda \leq 0{,}1$) забезпечується достатня тримкість, яка дозволяє короткочасно обмежити переміщення бічних порід при поступовому навантаженні. При подальшому зростанні відносної деформації охоронних споруд ($\lambda > 0{,}1$) наступає втрата їх тримкості, а рівень загрози обвалень покрівлі наближається до критичного. Для накатних кострів із дерев'яних шпал у межах деформаційного ресурсу відбувається ущільнення елементів конструкції, що призводить до зростання їх жорсткості. В таких умовах тримкість охоронних споруд дозволяє обмежити переміщення розшарованої товщі порід. Цілики вугілля та накатні костри з дерев'яних шпал мають обмежений запас міцності. Деформаційний ресурс споруд з подрібненої породи визначається досягненням максимального ущільнення первісного матеріалу, що дозволяє зменшити відносну деформацію конструкції та забезпечити її жорсткість.

Наслідки досліджень. Збереження стійкості підготовчих виробок та запобігання обвалень покрівлі на виїмкових ділянках вугільних шахт, відбувається при застосуванні охоронних споруд з деформаційним ресурсом, в межах якого забезпечується тримкість конструкцій, здатна обмежити переміщення бічних порід у виробленому просторі вуглепородного масиву.

Оригінальність. Охоронні споруди розглядаються як опорні конструкції із змінною жорсткістю. Характер цієї зміни дозволяє оцінити їх деформаційний ресурс для визначення умов оптимального застосування.

Ключові слова: підготовча виробка, охоронна споруда, відносна деформація, обвалення, безпека праці.

ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF SECONDARY SUPPORT STRUCTURES FOR MAINTAINING MINE ROADWAYS AND PREVENTING ROOF COLLAPSE

S. Podkopaiev[1], L. Bachurin[2,3], D. Polii[2], D. Chepiga[4*], Ya. Bachurina[2], Y. Podkopayev[5]

[1] Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
[2] Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine
[3] TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC», LLC, Zaporizhzhia, Ukraine
[4] Ivano-Frankivsk Regional Educational and Course Combine of Housing and Communal Services, Ivano-Frankivsk, Ukraine
[5] MS ELTEKO, LLC, Ukraine

*E-mail for correspondence: daria.chepiha@donntu.edu.ua

Received: 03 November 2025; ***Accepted:*** 01 December 2025

Cite as: Podkopaiev, S., Bachurin, L., Polii, D., Chepiga, D., Bachurina, Ya., Podkopayev Y. (2025). Assessment of the bearing capacity of secondary support structures for maintaining mine roadways and preventing roof collapse. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 41(3–4), 63-71

Purpose. To evaluate the bearing capacity of secondary support structures for mine roadways maintained within the goaf area, aimed at ensuring their stability and improving occupational safety in longwall mining operations by preventing roof and sidewall collapses.

Methodology. The bearing capacity of the secondary support structures was examined using scaled physical models subjected to loading in a hydraulic press. The modelling was qualitative, focused on investigating the deformation mechanism, shape transformation, and sequence of failure of the secondary support structures.

Conclusions. For coal pillars, within their deformation range (relative strain $\lambda \leq 0.1$), sufficient bearing capacity is maintained, enabling short-term restriction of side-rock movement under progressive loading. As the relative deformation increases ($\lambda > 0.1$), the structures lose their bearing capacity, and the risk of roof collapse approaches a critical level.

For timber packs made of wooden sleepers, compaction of structural elements occurs within their deformation range, increasing stiffness. Under these conditions, the bearing capacity of the support structures limits the movement of stratified rock layers.

Both coal pillars and timber packs have a limited strength reserve. The deformation capacity of structures made from crushed rock is governed by the achievement of maximum compaction of the initial material, which reduces the relative deformation and enhances stiffness.

ISSN 2664-4304

Practical implications. The stability of mine roadways maintained within the goaf area and the prevention of roof collapse in longwall panels can be achieved by employing secondary support structures with a deformation capacity sufficient to provide the bearing resistance required to limit side-rock movement within the goaf area.

Originality. The secondary support structures are considered as load-bearing systems with variable stiffness. The nature of stiffness variation enables the assessment of their deformation capacity and the identification of optimal operating conditions.

Keywords: mine roadway, support structure, relative deformation, roof collapse, occupational safety

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка вугільних пластів стимулює розвантаження вуглепородного масиву, яке призводить до розшарування та обвалення бічних порід і супроводжується погіршенням стійкості підготовчих виробок, зниженням безпеки праці гірників на виїмкових ділянках вугільних шахт. Процеси зрушення бічних порід у виробленому просторі виймальних ділянок спричиняють їх обвалення, кріплення підготовчих виробок по довжині виїмкової ділянки деформується, експлуатаційний стан виробок погіршується. Це підвищує ризик механічного травмування гірників та ускладнює виробничі процеси на робочих місцях. Незадовільний стан підготовчих виробок створює труднощі провітрювання виїмкових ділянок і роботи підземного транспорту. Тому досліджувалась проблема збереження стійкості виробок і підвищення безпеки праці гірників через запобігання обваленню бічних порід на виїмкових ділянках вугільних шахт завдяки забезпеченню тримкості охоронних споруд.

Розшарування бічних порід при розвантаженні вуглепородного масиву та при досягненні певної критичної площі оголення спричиняє обвалення покрівлі у виробленому просторі, або, в окремих випадках, плавне її опускання [1]. Трапляється, що обвалення покрівлі поширюється на привибійний простір, що супроводжується частковим завалом очисного вибою. При комбінованих системах розробки, які передбачають залишення однієї або двох виробок у виробленому просторі для забезпечення прямоточного провітрювання та/або для повторного використання, неконтрольоване обвалення покрівлі за лавою може спричинити критичні деформації та навіть призвести до завалу підготовчої виробки. Все це знижує безпеку праці та пов'язане з підвищенням травматизму гірників внаслідок обвалень [2].

Враховуючи шарувату структуру вуглепородного масиву і перерозподіл напружень у ньому, для забезпечення експлуатаційного стану підготовчих виробок використовують, як правило, різноманітні штучні охоронні споруди або цілики вугілля [3].

Відомо [1], що характер руйнування ціликів багато в чому визначається їх напружено-деформованим станом і структурою, зокрема, наявністю пластичних прошарків на контакті із вміщуючими породами. У тріщинуватому вуглепородному масиві цілики перебувають у граничному напружено-деформованому стані, а їх тримкість не завжди достатня для обмеження конвергенції бічних порід навколо підготовчих виробок, що не виключає деформування кріплення та обвалення покрівлі [4].

Практика використання безціликових способів охорони підготовчих виробок показала, що при невідповідності деформаційних характеристик охоронних споруд величині тиску, спричиненого зрушеннями підроблених порід, кріплення виробок деформується і потребує ремонту або заміни, а покрівля руйнується [5, 6]. У таких ситуаціях безпека робіт знижується, а ймовірність травмування гірників зростає.

При використанні закладання виробленого простору шахтною породою обвалення бічних порід і завали підготовчих виробок можуть бути повністю виключені. Закладальний масив запобігає розвитку інтенсивного тріщиноутворення навколо виробок [7]. Слід зазначити, що досвід роботи вугільних шахт із закладанням виробленого простору, вказує на поліпшення геомеханічної обстановки у виробленому просторі вуглепородного масиву [8]. Галузеві нормативні документи [9] передбачають, що при застосуванні повної закладки може не бути потреби у застосуванні інших способів охорони виробок.

Ефективне вирішення проблеми збереження стійкості підготовчих виробок та підвищення безпеки праці гірників від обвалень, може бути здійснено із залученням методів геомеханіки та додаткового вивчення деформаційних властивостей охоронних споруд, які дозволяють оцінити їх тримкість. Тому наукові дослідження з цієї проблеми є важливими. Використання результатів дозволить вдосконалити заходи щодо збереження експлуатаційного стану підготовчих виробок та створення безпечних умов праці гірників на виїмкових ділянках вугільних шахт за рахунок запобігання обвалень бічних порід.

Мета дослідження. Постановка завдання дослідження.

Метою дослідження є оцінка тримкості охоронних споруд підготовчих виробок для збереження їх стійкості та підвищення безпеки праці шляхом запобігання обвалень бічних порід на виїмкових ділянках вугільних шахт. Це дасть змогу розробити заходи зниження травматизму гірників на робочих місцях від обвалень.

Для досягнення мети було поставлено завдання – оцінити деформаційні властивості охоронних споруд та їх тримкість, що дозволяє забезпечити функціональне призначення тримальних конструкцій.

Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є деформаційні процеси у охоронних спорудах, що забезпечують підтримання підготовчих виробок у виробленому просторі, або використовуються для управління покрівлею на виїмкових ділянках вугільних шахт.

Функціональне призначення охоронних споруд полягає у збереженні стійкості підготовчих виробок позаду очисного вибою шляхом обмеження зрушень та запобігання обвалень бічних порід по довжині виїмкової ділянки, що дозволяє створити безпечні умови праці гірників на робочих місцях за умови достатньої тримкості конструкцій.

Охоронні споруди, що розглядаються, виконують однакову функцію – підтримання підготовчих виробок в умовах активних зрушень підробленого породного масиву позаду очисного вибою. З огляду на це їх можна аналізувати за спільними критеріями деформаційної поведінки. Відмінності у фізико-механічних властивостях матеріалів відображають різний механізм накопичення енергії деформації та втрати стійкості, що дозволяє оцінити вплив матеріальної структури на загальну тримкість охоронних споруд. Моделювання носило якісний характер, спрямований на вивчення механізму деформації, зміни форми та послідовності руйнування охоронних споруд. Цей експеримент є частиною комплексного дослідження деформаційних процесів у навантажених охоронних спорудах для оцінки їх тримкості [10–13].

ISSN 2664-4304

Для вивчення деформаційних властивостей охоронних споруд та оцінки їх тримкості були проведені дослідження на моделях. Експериментальні моделі були представлені цілiками вугілля (модель № 1), накатними кострами з дерев'яних шпал (модель № 2-1 і модель № 2-2) та закладальним масивом з подрібненої породи неоднорідного гранулометричного складу (модель № 3). Геометричний масштаб моделювання М 1:25.

Розміри моделей № 1, № 2-1 та № 2-2: висота 0,04 м, ширина 0,04 м, довжина 0,04 м. Модель № 3 передбачала компресійне стиснення порції подрібненої породи (піщано-глинистий сланець) у сталевому циліндрі діаметром 0,075 м та висотою 0,075 м; товщина шару породи 0,063 м.

Моделі № 1, № 2-1 та № 2-2 розміщували між плитками, що імітували шари покрівлі та підошви. Плитки були виготовлені з піщано-цементної суміші з межею міцності на стиснення 38 МПа. Цілики вугілля (модель №1) по периметру огороджувалися дерев'яними стрижнями як дерев'яними стояками додаткового кріплення.

Компресійне стиснення первинного матеріалу в моделі № 3 розглядалось для моделювання повного закладання виробленого простору. Гранулометричний склад подрібненої породи відповідав рекомендаціям [14].

Випробовування моделей здійснювались на пресі ГП-50 з постійною швидкістю навантаження. Деформація моделей Δh (м) та відповідне навантаження F (кН) фіксувалось з кроком 10 кН.

Відносну деформацію моделей визначали за виразом

$$\lambda = \frac{\Delta h}{h_0}, \qquad (1)$$

де h_0 – початкова висота моделі, м.

Відносну зміну об'єму моделі в умовах одновісного стиснення визначали як

$$\delta V = (1 - 2\nu)\lambda, \qquad (2)$$

а в умовах компресійного стиснення

$$\delta V = \frac{\Delta h}{h_0} = \lambda, \qquad (3)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона.

Жорсткість моделей С (МН/м) визначали за виразом

$$C = \frac{F}{\Delta h}. \qquad (4)$$

Питому потенціальну енергію деформації або густину енергії деформації U (МДж/м³) моделей визначали за співвідношенням [15]

$$U = \frac{\sigma^2}{2E_g}, \qquad (5)$$

σ – механічне напруження, Па;

E_g – модуль деформації, Па.

Жорсткість моделей є інформативним показником тримкості, тобто здатності охоронних споруд протидіяти переміщенням підробленого масиву гірських порід у виробленому просторі виїмкових ділянок вугільних шахт.

Результати дослідження

За експериментальними даними, наведеними у табл. 1–3, встановлені деформаційні властивості охоронних споруд підготовчих гірничих виробок.

У табл. 1 наведено експериментальні дані поступового навантаження моделі № 1 в умовах одновісного стиснення. У табл. 2 наведено експериментальні дані поступового навантаження моделі № 2-1 та № 2-2 в умовах одновісного стиснення

Таблиця 1 – Експериментальні дані навантаження моделі № 1 (цілик вугілля) при поступовому навантаженні в умовах одновісного стиснення

F, кН	*Δ*, м	*λ*	*δV*	*σ*, МПа	*C*, МН/м	*U, МДж/м³*
5	0,0007	0,0175	0,007	3,13	7,14	0,03
10	0,0014	0,0350	0,014	6,18	7,14	0,11
15	0,002	0,0500	0,020	9,18	7,50	0,23
20	0,0025	0,0625	0,025	12,12	8,00	0,38
25	0,0035	0,0875	—	15,02	7,14	0,66
30	0,0045	0,1125	—	17,11	6,67	0,96
35	0,0056	0,1400	—	19,41	6,25	1,36
40	0,008	0,2000	—	21,50	5,00	2,15
50	0,0116	0,2900	—	25,00	4,31	3,63
60	0,0157	0,3925	—	26,63	3,82	5,23
70	0,022	0,5500	—	26,58	3,18	7,31

Таблиця 2 – Експериментальні дані навантаження моделей № 2-1 та №2-2 (накатні костри з дерев'яних шпал) при поступовому навантаженні в умовах одновісного стиснення

F, кН	*Δ*, м	*λ*	*δV*	*σ*, МПа	*C*, МН/м	*U, МДж/м³*
модель № 2-1						
10	0,0032	0,08	0,048	6,25	3,125	0,25
20	0,009	0,225	0,135	12,08	2,2	1,36

ISSN 2664-4304

F, кН	*Δ*, м	*λ*	*δV*	*σ*, МПа	*C*, МН/м	*U, МДж/м³*
30	0,011	0,275	0,165	16,80	2,72	2,31
40	0,013	0,325	0,195	21,71	3,076	3,53
50	0,015	0,375	0,225	26,20	3,33	4,91
60	0,017	0,425	0,255	30,24	3,52	6,43
70	0,018	0,45	0,27	33,77	3,88	7,60
80	0,019	0,475	0,285	37,67	4,2	8,95
90	0,02	0,5	0,3	41,30	4,5	10,33
95	0,021	0,525	0,315	42,41	4,52	11,13
модель № 2-2						
10	0,0035	0,088	0,053	6,25	2,857	0,27
20	0,008	0,200	0,120	12,04	2,50	1,20
30	0,01	0,250	0,150	17,05	3,00	2,13
40	0,012	0,300	0,180	22,06	3,33	3,31
50	0,014	0,350	0,210	26,68	3,57	4,67
60	0,018	0,450	0,270	30,85	3,33	6,94
70	0,02	0,500	0,300	32,96	3,50	8,24
80	0,021	0,525	0,315	35,71	3,81	9,38
90	0,022	0,550	0,330	39,01	4,09	10,73
100	0,022	0,550	0,330	41,98	4,55	11,54

У табл. 3 наведено експериментальні дані поступового навантаження моделі № 3 в умовах компресійного стиснення модельного матеріалу.

Таблиця 3 – Експериментальні дані навантаження моделі № 3 з подрібненої породи в умовах компресійного стиснення

F, кН	*Δ*, м	*λ*	*δV*	*σ*, МПа	*C*, МН/м	*U, МДж/м³*	$k_{ущ}$
10	0,001	0,016	0,016	2,26	10,0	0,020	1,02
20	0,005	0,079	0,079	4,53	4,0	0,180	1,09
30	0,006	0,095	0,095	6,79	4,0	0,323	1,11
40	0,009	0,143	0,143	9,05	4,44	0,647	1,17
50	0,012	0,190	0,190	11,32	4,16	1,078	1,24
70	0,013	0,206	0,206	15,84	5,38	1,635	1,26
80	0,014	0,222	0,222	18,11	5,71	2,012	1,29
100	0,019	0,302	0,302	22,64	5,26	3,413	1,43
110	0,021	0,333	0,333	24,90	5,23	4,150	1,50
120	0,022	0,349	0,349	27,16	5,45	4,743	1,54
140	0,023	0,365	0,365	31,69	6,08	5,785	1,58
150	0,024	0,381	0,381	33,95	6,25	6,467	1,62
155	0,024	0,381	0,381	35,08	6,45	6,683	1,62

На рис. 1 наведено графіки зміни відносної деформації експериментальних моделей від величини навантаження.

Зафіксовано, що при поступовому навантаженні моделі № 1 від 5 до 70 кН відносна деформація зростає від 0,0175 до 0,55.

При поступовому навантаженні моделі № 2-1 відносна деформація зростає від 0,08 до 0,525 при збільшенні навантаження від 10 до 95 кН. Для моделі № 2-2 відносна деформація зростає від 0,088 до 0,55 при збільшенні навантаження від 10 до 100 кН.

При поступовому навантаженні від 10 до 155 кН відносна деформація моделі № 3 в умовах компресійного стиснення зростає від 0,016 до 0,381.

На рис. 2 наведено графіки зміни жорсткості експериментальних моделей у процесі зростання відносної деформації при поступовому навантаженні.

ISSN 2664-4304

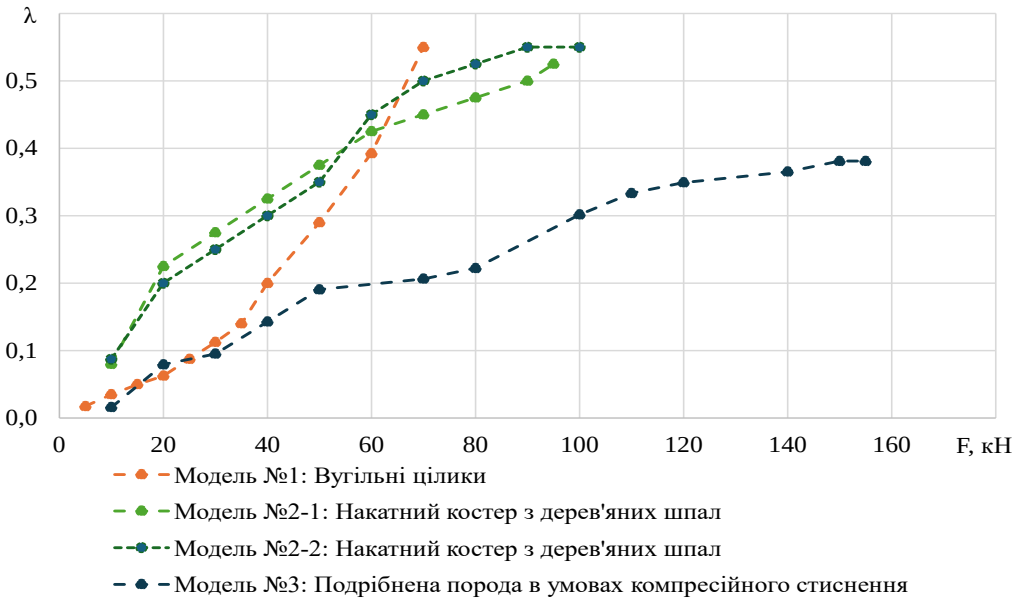


Рисунок 1 – Графіки зміни відносної деформації λ експериментальних моделей від величини навантаження F *(кН)*

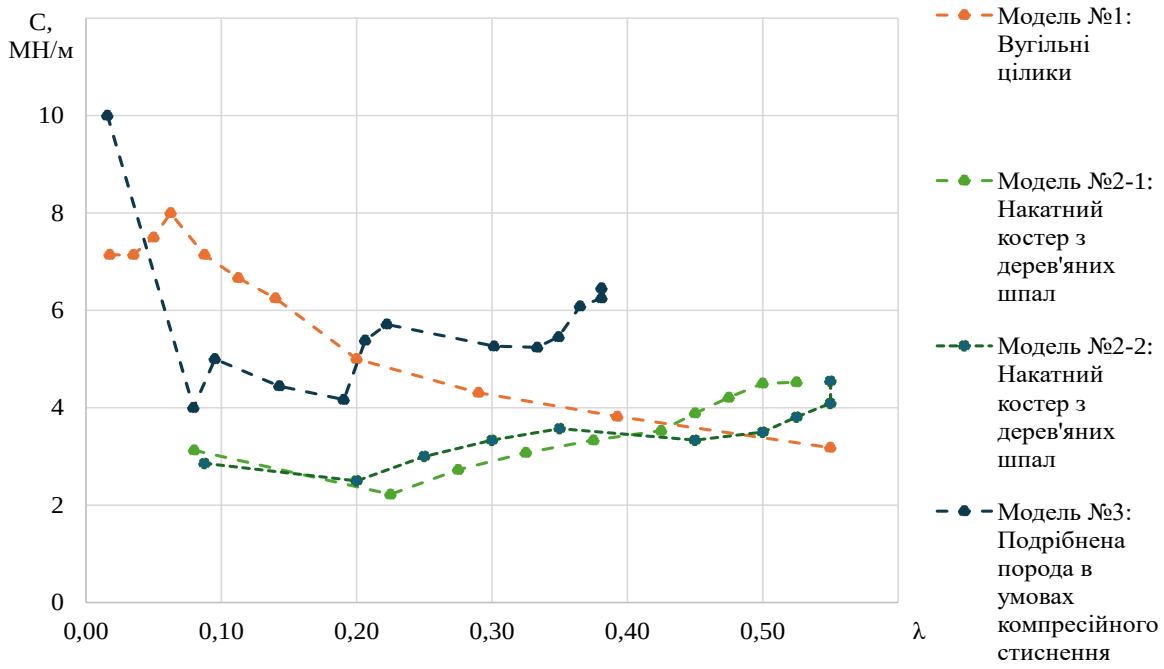


Рисунок 2 – Графіки зміни жорсткості C (МН/м) експериментальних моделей у процесі зростання відносної деформації λ при поступовому навантаженні

Для моделі № 1 у діапазоні значень відносної деформації від 0,0175 до 0,0625 фіксується зростання жорсткості від 7,14 до 8,00 МН/м. Подальше збільшення навантаження до 70 кН призводить до зменшення жорсткості моделі до 3,18 МН/м, що пов'язано з поступовим руйнуванням та втратою тримкості.

Для моделі № 2-1 при зростанні відносної деформації від 0,08 до 0,225 жорсткість зменшується від 3,125 до 2,22 МН/м, що пов'язано з ущільненням складових елементів моделі. Подальше зростання відносної деформації до 0,525 супроводжується збільшенням жорсткості до 4,52 МН/м.

Для моделі № 2-2 зростання жорсткості від 2,875 до 3,57 МН/м відбувається у діапазоні значень відносної деформації від 0,088 до 0,35. Подальше зростання відносної деформації моделі до 0,55 призводить до збільшення жорсткості охоронної споруди 4,55 МН/м.

В умовах компресійного стиснення моделі № 3 у діапазоні значень відносної деформації від 0,079 до 0,381 жорсткість матеріалу зростає з 4,0 до 6,45 МН/м, що пов'язано з подрібненої породи внаслідок перепакування зерен різного розміру. Відповідно, зростання жорсткості супроводжується ущільненням.

На рис. 3 наведено графіки зміни питомої потенціальної енергії деформації експериментальних моделей від їх відносної деформації при поступовому навантаженні.

ISSN 2664-4304

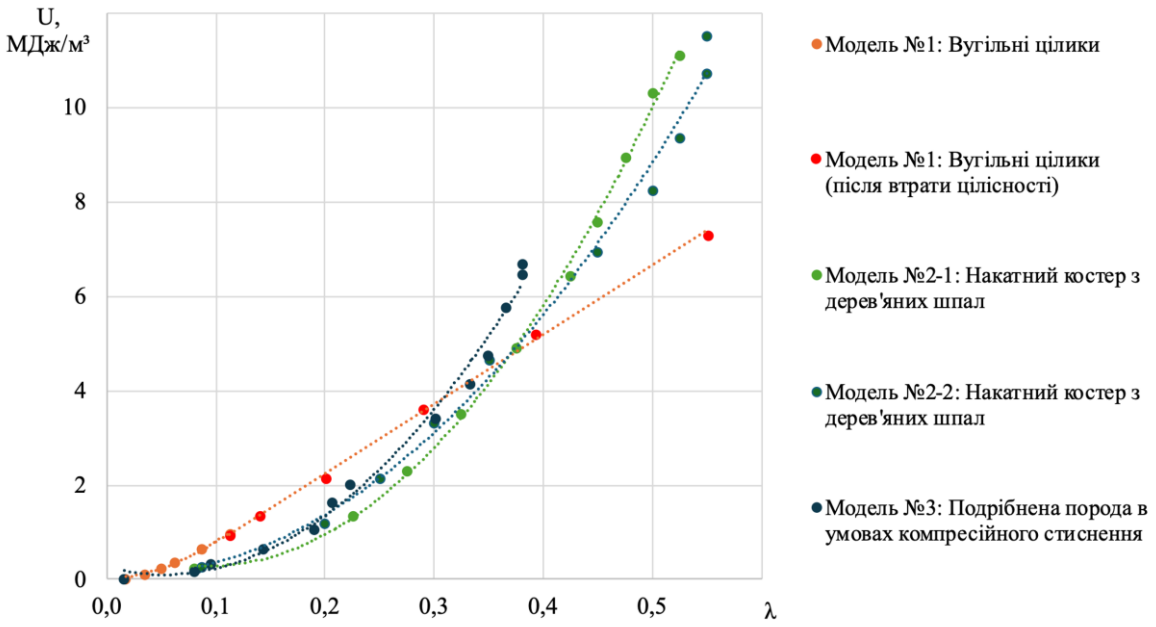


Рисунок 3 – Графіки зміни питомої потенціальної енергії деформації U (МДж/м³) експериментальних моделей від їх відносної деформації λ при поступовому навантаженні

При поступовому навантаженні в умовах одновісного стиснення моделі № 1 зі зростанням її відносної деформації відбувається збільшення густини енергії деформації. В діапазоні відносної деформації до 0,1125 цілик ще зберігає відносну цілісність, характер зростання густини енергії деформації квадратичний. Апроксимаційна залежність має вид:

$$U = 62,47\lambda^2 + 1,71\lambda \quad (6)$$

з коефіцієнтом детермінації 0,995. Надалі, у процесі поступового руйнування цілика, подальше зростання густини енергії деформації відбувається лінійно. Апроксимаційна залежність має вид:

$$U = 14,722\lambda - 0,696 \quad (7)$$

з коефіцієнтом детермінації 0,9986.

При поступовому навантаженні в умовах одновісного стиснення моделі № 2-1 збільшення густини енергії деформації від 0,25 до 11,13 МДж/м³ відбувається при зростанні відносної деформації від 0,08 до 0,525. Апроксимаційна залежність є квадратичною:

$$U = 58,918\lambda^2 - 11,072\lambda + 0,81 \quad (8)$$

з коефіцієнтом детермінації 0,9979.

При поступовому навантаженні моделі № 2-2 зростання відносної деформації охоронної споруди від 0,088 до 0,55 супроводжується зростанням густини енергії деформації від 0,27 до 11,54 МДж/м³. Апроксимаційна залежність є квадратичною:

$$U = 37,094\lambda^2 - 1,0447\lambda + 0,0924 \quad (9)$$

з коефіцієнтом детермінації 0,9905.

В умовах компресійного стиснення та поступового навантаження закладального матеріалу моделі № 3 зі зростанням відносної деформації від 0,016 до 0,381 густина енергії деформації збільшується від 0,018 до 6,683 МДж/м³. Апроксимаційна залежність також є квадратичною:

$$U = 57,041\lambda^2 - 5,9553\lambda + 0,258 \quad (10)$$

з коефіцієнтом детермінації 0,9891.

Квадратичний характер взаємозв'язку між питомою потенціальною енергією деформації та відносною деформацією охоронних споруд відображає лінійний характер зростання напружень у процесі зростання відносної деформації в межах деформаційного ресурсу охоронної споруди. Втрата тримкості спорудою призводить до зростання дисипації енергії, яка вже не накопичується у вигляді енергії пружного деформування, а переважно витрачається на руйнування матеріалу споруди.

Обговорення результатів

У результаті проведених досліджень виконано оцінку тримкості охоронних споруд підготовчих гірничих виробок, підтримуваних у виробленому просторі виймальних ділянок. Дослідження деформаційних властивостей виконувалось у лабораторних умовах на експериментальних моделях. Розглядались моделі у вигляді цілків вугілля, накатних кострів з дерев'яних шпал та закладального масиву з подрібненої породи неоднорідного гранулометричного складу. Оцінка тримкості охоронних споруд виконана на підставі аналізу експериментальних даних (табл. 1–3). Враховувалась відносна деформація охоронних споруд (1), відносна зміна їх об'єму (2, 3) при поступовому навантаженні та жорсткість (4). Потенціальна енергія деформації або густина енергії деформації (5) розглядалась як еквівалент роботи, що витрачається на стиснення експериментальних зразків при поступовому навантаженні. При деформуванні експериментальних зразків відбувалась зміна їх розмірів. Тобто частина роботи зовнішніх сил витрачалась на зміну форми і об'єму.

В умовах одновісного стиснення експериментальної моделі № 1 у вигляді цілика вугілля при малих навантаженнях ($F < 20$ кН) відбувається пружне стиснення модельного матеріалу. У таких умовах опірність моделі зростає, що призводить до концентрації в ній напружень. З підвищенням навантаження ($F > 20$ кН) досягається межа міцності матеріалу на одновісне стиснення, модель починає поступово руйнуватися (рис. 1, 2). Енергія деформації витрачається на руйнування та пружно-пластичне деформування моделі (рис. 3). При цьому питома потенціальна енергія деформації спрямована на руйнацію (рис. 3). Тримкість

ISSN 2664-4304

моделі втрачається. Частково характер деформування за межею міцності визначається наявністю додаткових стояків підсилення по периметру цілика, за відсутності яких втрата тримкості була б більш швидкою.

При поступовому навантаженні експериментальних моделей № 2-1 та № 2-2 у вигляді накатних кострів із дерев'яних шпал, відбувається ущільнення елементів конструкції ($F < 10$ кН). Тримкість споруди на цьому етапі низька. Зростання навантаження ($F > 10$ кН) призводить до локального зминання волокон деревини у місцях контакту шпал. Жорсткість моделі плавно зростає (рис. 1, 2). Споруда працює як опора із помірно зростаючим опором. Подальше зростання навантаження може призвести до розщеплення або руйнування окремих шпал. Характер зміни густини енергії деформації свідчить про накопичення пружної енергії деформації (рис. 3).

В умовах компресійного стиснення моделі № 3 з подрібненої породи, механізм формування тримкості закладального масиву залежить від гранулометричного складу первісного матеріалу та насипної густини [12, 13]. При навантаженні $F < 20$ кН зерна первісного матеріалу зміщуються і перепаковуються, займаючи більш компактне положення. Тримкість моделі зменшується. Зростання навантаження ($F > 20$ кН) призводить до поступового ущільнення подрібненої породи і відповідне зростання жорсткості у процесі вичерпання можливості перепакування зерен. Коли навантаження перевищує межу міцності, відбувається додаткове подрібнення частинок з подальшим додатковим перепакуванням внаслідок заповнення порожнин більш дрібними фракціями. Відповідно, збільшення навантаження зумовлює подальше ущільнення подрібненої породи (рис. 1, 2). Зміна густини енергії деформації відображає накопичення пружної деформації та зміну об'єму закладального матеріалу. Закладальний масив працює як опора із зростаючим опором, яка перетворюється на жорстку при досягненні граничного ущільнення, що дозволяє ефективно обмежувати переміщення бокових порід.

Експериментально встановлено залежність між питомою потенціальною енергією деформації охоронних споруд та їх відносною деформацією, яка дозволяє оцінити тримкість конструкцій при поступовому навантаженні (рис. 3). Густина енергії деформації (5) характеризує накопичення, розсіювання та вивільнення енергії в умовах одновісного стискання тримальних конструкцій.

Для циліків вугілля в межах їх деформаційного ресурсу, коли $\lambda \le 0{,}08\ldots0{,}1$, забезпечується достатня тримкість, яка дозволяє обмежити переміщення при поступовому навантаженні. При $\lambda > 0{,}1$, коли активізуються процеси руйнування, відбувається зниження жорсткості. Зміна густини енергії деформації відображає зростання опірності, а при перевищенні межи міцності – руйнування циліків вугілля (рис. 3). Цілики вугілля мають обмежений ресурс міцності, що пов'язано з переважно крихким характером деформування матеріалу.

Для накатних кострів із дерев'яних шпал у процесі зростання відносної деформації відбувається поступове зростання жорсткості в широкому діапазоні деформування, що характеризується квадратичним зростанням потенціальної енергії деформації. Це дозволяє забезпечити тримкість конструкцій при великих значеннях відносних переміщень із зростаючим опором (рис. 1–3). Втім, слід зазначити, що перевищення межі міцності призводить до розщеплення складових елементів конструкції та втрату тримкості.

Деформаційний ресурс охоронних споруд із подрібненої породи обмежується максимальним значенням коефіцієнта ущільнення первісного матеріалу (табл. 3). Зростання густини енергії деформації також відбувається за квадратичною залежністю, яка відображає дещо більший обсяг накопичення енергії порівняно із накатними кострами, що відповідає більшій жорсткості матеріалу та швидшому зростанню жорсткості у процесі ущільнення. Спочатку податливий, закладальний масив при досягненні граничного ущільнення перетворюється на жорстку опору, що забезпечує ефективну протидію зрушенням породного масиву. Використання повного закладання практично виключає обвалення покрівлі.

Таким чином, збереження стійкості підготовчих виробок та створення безпечних умов праці гірників на виїмкових ділянках вугільних шахт відбувається при застосуванні охоронних споруд з широким деформаційними ресурсом, у межах якого забезпечується достатній рівень тримкості, здатний зменшити або обмежити переміщення бічних порід у виробленому просторі вуглепородного масиву.

Висновки

Збереження стійкості підготовчих виробок та підвищення безпеки праці шляхом запобігання обвалень покрівлі на виїмкових ділянках вугільних шахт забезпечується при застосуванні охоронних споруд із деформаційним ресурсом, в межах якого зберігається їх функціональне призначення. При поступовому навантаженні охоронних споруд експериментально встановлено квадратичну залежність між питомою потенціальною енергією деформації та відносною деформацією, яка відбувається в умовах одновісного стиснення. Цілики вугілля при відносних деформаціях $\lambda \le 0{,}1$ працюють як опори зростаючого опору, що забезпечує ефективне обмеження переміщень бічних порід у виробленому просторі вуглепородного масиву. При $\lambda > 0{,}1$ внаслідок втрати цілісності та поступового руйнування спостерігається зниження жорсткості циліків вугілля та перетворення їх на піддатливу опору. Лінійне зростання густини енергії деформації після втрати тримкості циліків відображає витрати енергії переважно на їх руйнування. У таких умовах рівень загрози обвалення покрівлі наближається до критичного стану.

Тримкість піддатливих охоронних споруд із зростаючим опором (накатних кострів із дерев'яних шпал, споруд із подрібненої породи) збільшується при ущільненні в процесі навантаження, що супроводжується зростанням їх жорсткості. Такий режим деформування забезпечує умови для розвантаження породного масиву з поступовим обмеженням переміщень. При цьому закладальний масив, досягши граничного ущільнення, перетворюється на жорстку опору, що дозволяє запобігти обваленню бічних порід у виробленому просторі виїмкових ділянок та уникнути механічного травмування гірників.

Конфлікт інтересів

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

ЛІТЕРАТУРА

1. Шашенко О. М., Майхерчик Т., Сдвижкова О. О. Геомеханічні процеси у породних масивах : монографія. Дніпропетровськ : Нац. гірн. ун-т, 2005. 319 с.

ISSN 2664-4304

2. Снижение травматизма от проявлений горного давления : монография / В. И. Николин и др. Донецк : Норд-Пресс, 2005. 232 с.

3. Galvin J. M. Ground Engineering - Principles and Practices for Underground Coal Mining. Cham : Springer International Publishing, 2016. 684 p. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-25005-2

4. Jacobi O. Praxis der Gebirgsbeherrschung. Essen : Verlag Glückauf, 1976. 496 s.

5. Study on the new layout pattern about the gob-side entry under dynamic pressure and its surrounding rock stability control / M. Wang et al. *Energy Science & Engineering*. 2024. Vol. 12, no. 4. 1389–1410. URL: https://doi.org/10.1002/ese3.1667

6. 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. URL: https://doi.org/10.31474/1999-981x-2023-1-16-28

7. Impact law of the bulk ratio of backfilling body to overlying strata movement in fully mechanized backfilling mining / J. Zhang et al. *Journal of Mining Science*. 2011. Vol. 47, no. 1. P. 73–84. URL: https://doi.org/10.1134/s1062739147010096

8. Research into impact of leaving waste rocks in the mined-out space on the geomechanical state of the rock mass surrounding the longwall face / A. Smoliński et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 24. URL: https://doi.org/10.3390/en15249522

9. СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони. Вид. офіц. Київ : Мінвуглепром України, 2007. 113 с.

10. Дослідження стійкості виробок глибоких шахт з крутим заляганням вугільних пластів / І. В. Іорданов та ін. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2021. Т. 1, № 6. 68–82. URL: https://doi.org/10.31474/2415-7902-2021-1(6)-2(7)-68-82

11. Комплексне дослідження стійкості відкотних штреків крутих вугільних пластів при різних способах охорони / Л. Л. Бачурін та ін. *Вісник НУВГП. Серія «Технічні науки»*. 2021. Т. 1, № 93. 217–236. URL: https://doi.org/10.31713/vt1202116

12. Evaluation of deformation characteristics and bearing capacity assessment of crushed-rock backfill with various grain size distributions / D. Chepiga et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4, no. 7 (136). P. 32–41. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.337172.

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

14. Karfakis M. G., Bowman C. H., Topuz E. Characterization of coal-mine refuse as backfilling material. *Geotechnical and Geological Engineering*. 1996. Vol. 14, no. 2. 129–150. URL: https://doi.org/10.1007/BF00430273

15. Sadd M. H. Elasticity. Elsevier, 2009. 536 p. URL: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374446-3.X0001-6.

REFERENCES

1. Shashenko O. M., Maikherchyk T., Sdvyzhkova O. O. Heomekhanichni protsesy u porodnykh masyvakh : monohrafiia. Dnipropetrovsk : Nats. hirn. un-t, 2005. 319 s.

2. Snyzhenye travmatyzma ot proiavlenyi hornoho davlenyia : monohrafyia / V. Y. Nykolyn y dr. Donetsk : Nord-Press, 2005. 232 s.

3. Galvin, J. M. (2016). *Ground Engineering - Principles and Practices for Underground Coal Mining*. Cham: Springer International Publishing. 684 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25005-2

4. Jacobi, O. (1976). *Praxis der Gebirgsbeherrschung*. Essen: Verlag Glückauf. 496 s.

5. Wang, M., Wang, W., Xu, Y., Xie, G., Qin, J., Liu, H., Wei, S., & Xu, Q. (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(4), 1389–1410. https://doi.org/10.1002/ese3.1667

6. Volkov, S. V., Boichenko, H. Ye. (2023). Otsinka stiikosti vidkatnoho shtreku z vykorystanniam statystychnoho analizu vidmov arkovoho podatlyvoho kriplennia. Visti Donetskoho hirnychoho instytutu, (1), 16–28. https://doi.org/10.31474/1999-981x-2023-1-16-28

7. Zhang, J., Zhou, N., Huang, Y., & Zhang, Q. (2011). Impact law of the bulk ratio of backfilling body to overlying strata movement in fully mechanized backfilling mining. *Journal of Mining Science*, 47(1), 73–84. https://doi.org/10.1134/s1062739147010096

8. 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

9. SOU 10.1.00185790.011:2007. Pidhotovchi vyrobky na polohykh plastakh. Vybir kriplennia, sposobiv i zasobiv okhorony (2007). Kyiv: Minvuhleprom Ukrainy. 113 s.

10. Iordanov, I. V., Bessarab, I. M., Boichenko, H. Ye., Dovhal, V. Yu., Kaiun, O. P., & Podkopaiev, Ye. S. (2021). Doslidzhennia stiikosti vyrobok hlybokykh shakht z krutym zaliahanniam vuhilnykh plastiv. Naukovyi visnyk DonNTU, 1(6)-2(7), 68–82. https://doi.org/10.31474/2415-7902-2021-1(6)-2(7)-68-82

11. Bachurin, L. L., Iordanov, I. V., Bessarab, I. M., Korol, A. V., Kaiun, O. P., Podkopaiev, Ye. S., Demchenko, O. V., & Tkachuk, O. M. (2021). Kompleksne doslidzhennia stiikosti vidkotnykh shtrekiv krutykh vuhilnykh plastiv pry riznykh sposobakh okhorony. Visnyk NUVHP. Seriia «Tekhnichni nauky», 1(93), 217–236. https://doi.org/10.31713/vt1202116

12. 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

ISSN 2664-4304

13. 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

14. Karfakis, M. G., Bowman, C. H., & Topuz, E. (1996). Characterization of coal-mine refuse as backfilling material. *Geotechnical and Geological Engineering*, 14(2), 129–150. https://doi.org/10.1007/bf00430273

15. Sadd M.H. (2009). *Elasticity*. Elsevier. 536 p.