

УДК 622.273.21

<https://doi.org/10.37101/ftpgp24.01.005>

**ГЕОМЕХАНІЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗАКЛАДНОГО МАСИВУ  
НА СТІЙКІСТЬ ВИЙМКОВОГО ШТРЕКУ ПРИ РОЗРОБЦІ  
ТОНКИХ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ**

М.В. Петльованій<sup>1\*</sup>, Д.С. Малашкевич<sup>1</sup>, К.С. Сай<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро,  
Україна

\*Відповідальний автор: e-mail: petlyovany@ukr.net

**GEOMECHANICAL EVALUATION OF THE BACKFILLING MASSIF  
INFLUENCE ON THE GATE ROAD STABILITY  
WHILE THIN COAL SEAM MINING**

M.V. Petlovanyi<sup>1\*</sup>, D.S. Malashkevych<sup>1</sup>, K.S. Sai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

\*Corresponding author: e-mail: petlyovany@ukr.net

**ABSTRACT**

**Purpose.** The investigation of the influence formation rock backfilling massif into longwall gob area on the geomechanical situation of the rock massif around the gate road.

**Methods.** Numerical modeling using the finite element method by applying the SolidWorks software was used to achieve the goal. The geomechanical situation around the gate road which is reused, was studied under traditional mining technology with full roof collapse behind the longwall face with protective construction and mining technology with gob backfilling. The geomechanical assessment was provided based on the study of the vertical stress component.

**Findings.** The geomechanical models for the study of the stress state of the massif around the gate roads in the case of comparative variants of working out the coal seam are substantiated. The formation of the backfilling massif in comparison with the variants “full collapse + protective construction” significantly reduces the amount of tensile stresses in the roof of the gate road, tensile stresses in the floor of gate road, and the amount of stresses in the roof and floor above the protective construction was established. During the formation of the backfilling massif, the size of the unloading zone in the rocks of the roof and floor of the gate road and the size of the zone of compressive stresses in the rocks above and below the protective construction significantly increases to the level of the undisturbed massif was obtained.

**Originality.** The features of the nature of the distribution stresses in the rock massif under the formation of the rock backfilling are revealed, which indicates more

favorable conditions for maintaining gate road behind the stope than the variant with full caving and the protective construction.

**Paratactical implication.** The formation of rock backfilling massif in the mined-out area makes it possible to reduce the intensity of rock pressure and keep the gate roads in a satisfactory condition for its reuse.

**Keywords:** gate road, geomechanical model, numerical modelling, stresses, rock massif, backfilling massif, full caving, protective construction

## 1. ВСТУП

Функціонування гірничодобувної галузі, у тому числі вугільної, призводить до негативної трансформації верхнього шару літосфери – земної кори. Внаслідок вилучення корисної копалини з надр утворюються підземні пустоти, які сприяють просіданню та руйнівним деформаціям земної поверхні [1, 2]. При цьому технологічні процеси гірничого виробництва характеризуються значним відходоутворенням. Наслідками є відчуження значних земельних площ денної поверхні під складування пустих шахтних порід і відходів збагачення. Для попередження виникнення цих негативних явищ у світовій гірничій практиці розповсюдження набули методи видобутку корисних копалин із застосуванням закладання виробленого простору. Призначенням цієї технології є збереження цілісності земної поверхні й інфраструктурних об'єктів та утилізації багатотоннажних накопичень промислових відходів [3, 4]. При розробці рудних родовищ поширення набуло пастове й твердіюче закладання [5-7], вугільних родовищ – механічне породне і пастове закладання [8, 9]. Крім вищезазначених основних завдань закладання пустот супутньо вирішує низку інших корисних завдань – зберігає цілісність водоносних горизонтів та поліпшує умови ведення підземних гірничих робіт.

Для стійкого та ритмічного процесу вуглевидобутку в межах гірничого підприємства вельми важливою умовою є збереження в достатньому експлуатаційному стані гірничих виробок (особливо виїмкових) і мінімізація випадків їх перекріплень. Умовно стійкий стан контуру виробки зберігається, коли її підтримання здійснюється в масиві вугілля чи порід. Проте, коли вугільний пласт виймається з одного з боків виїмкового штреку спостерігаються руйнівні деформації порід на його контурі, руйнуючи аркове кріплення. Як показує досвід відпрацювання тонких вугільних пластів, виїмкові штреки досить складно втримати в експлуатаційному стані, навіть незважаючи на застосування прогресивного рамно-анкерного кріплення [10-12].

Для підвищення стійкості виїмкових виробок й ефективного «обрізання» породної консолі на сполученні лави зі штреком застосовують різні способи охорони на основі штучних споруд з підвищеними міцнісними властивостями [13, 14]. Проте, зі збільшенням глибини розробки та враховуючи низьку стійкістю порід, формування штучних споруд не завжди є достатнім для попередження руйнівних геомеханічних процесів. Більшого ефекту надає закладання виробленого простору за рахунок створення підпору та недопущення інтенсивного розшарування й розбивання на блоки порід основної покрівлі, що опускаються вслід за пересуванням секцій механізованого кріплення.

На сьогодні дослідження геомеханічних процесів як у лаві, так і навколо виїмкових штреків при закладанні виробленого простору в умовах українських шахт майже не виконуються, адже відсутні конкретні ефективні технології. Відомі технологічні рішення характеризуються трудоємністю процесів та, здебільшого, частковим формуванням закладного масиву [15, 16], тому науковий інтерес у проведенні досліджень є незначним.

Авторами даного дослідження розроблено новий перспективний спосіб закладання виробленого простору [17], особливостями якого є можливість формування ущільненого суцільного закладного масиву за довжиною лави на висоту, що менше виїмкової потужності, та можливість формування закладних породних смуг «через одну» на висоту близько виїмкової потужності пласта. Деталізація висоти формування закладного масиву залежить від геологічної потужності пласта і, відповідно, величини порід присікання підшви, які є безпосереднім закладним матеріалом у запропонованому способі. Крім того, є можливість варіації різних видів формування закладного масиву – ущільнений породний масив або ін'єктований в'язучою речовиною ущільнений породний масив.

Представлене дослідження спрямоване на вивчення геомеханічної ситуації у масиві гірських порід навколо виїмкових виробок в умовах шахт Західного Донбасу, коли у виробленому просторі очисного вибою формується ущільнений закладний породний масив.

## **2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ**

Вирішення сучасних геомеханічних завдань при освоєнні родовищ корисних копалин здійснюється із застосуванням різноманітних методів моделювання. Метод скінчених елементів дозволяє при адекватній постановці завдання і наборі вихідних даних відобразити аналогічно натурним умовам формування напруженого стану масиву [18-20].

Найбільш складна геомеханічна ситуація в масиві гірських порід навколо виїмкових штреків, що повторно використовуються, спостерігається позаду очисного вибою [10], що, зазвичай, в складних умовах розробки призводить до найбільшого обсягу ремонтних робіт, таких як піддирання порід підшви та заміна деформованих елементів рамного кріплення. Тому в дослідженні вивчається геомеханічна ситуація позаду лави, коли відбулось опускання породних шарів на обвалені породи (при традиційному варіанті) та на закладний масив (при варіанті із закладанням виробленого простору).

Чисельне моделювання напруженого стану гірського масиву навколо виїмкової виробки при різних технологіях видобування вугілля виконано на прикладі ділянки вугільного пласта  $C_{10}^B$  шахти «Ім. Героїв Космосу». Для порівняння кількісно-якісної зміни полів напружень гірського масиву при закладанні виробленого простору моделюється також традиційний спосіб відпрацювання з охоронною конструкцією та повним обваленням порід. Аналіз гірничо-геологічної та гірничотехнічної характеристик шахтного поля і паспортів виїмкових ділянок шахти по пласту  $C_{10}^B$  у східному крилі дозволив встановити усереднені параметри, які є вихідними даними до моделювання:

– літологічний склад порід (усереднені літологічні потужності);

- фізико-механічні властивості гірських порід (Таблиця 1);
- середня глибина розробки – 300 м;
- величина навантаження, що прикладається до моделі – 6,0 МПа (відповідає глибині залягання виробки 300 м);
- виїмкова виробка – переріз 13,1 м<sup>2</sup>, спосіб охорони – дерев’яна конструкція шириною 1,0 м (накатний костер).

Літологічний склад порід навколо виробки наступний: вугільний пласт – 0,75 м; покрівля: аргіліт – 3,5 м, аргіліт – 1,3 м, пісковик – 1,2 м; вугільний прошарок – 0,3 м; алевроліт – 2,5 м; пісковик – 1,5 м; підшва: алевроліт – 1,5 м, пісковик – 1,0 м, алевроліт – 4,5 м, аргіліт – 3,5 м, аргіліт – 3,0 м.

Фізико-механічні властивості гірських порід визначені за результатами випробування проб при виконанні гірничо-геологічного прогнозу шахтою і представлені в Таблиці 1.

**Таблиця 1. Усереднені фізико-механічні властивості гірських порід східної ділянки пласта С<sub>10</sub><sup>6</sup>**

Назва	Аргіліт	Алевроліт	Пісковик	Вугілля
Модуль деформації, $E$ , МПа	6400	8900	20000	3700
Коефіцієнт Пуассона, $\mu$	0,24	0,31	0,35	0,27
Щільність, $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	2500	2400	2,6	1250
Межа міцності на стиск, $\sigma_c$ , МПа	20,0	15,0	40,0	37,0
Межа міцності на розтяг, $\sigma_p$ , МПа	1,7	1,5	2,7	3,7

Фізико-механічні властивості інших елементів з урахуванням аналізу наукових праць прийняті наступними [21-24]:

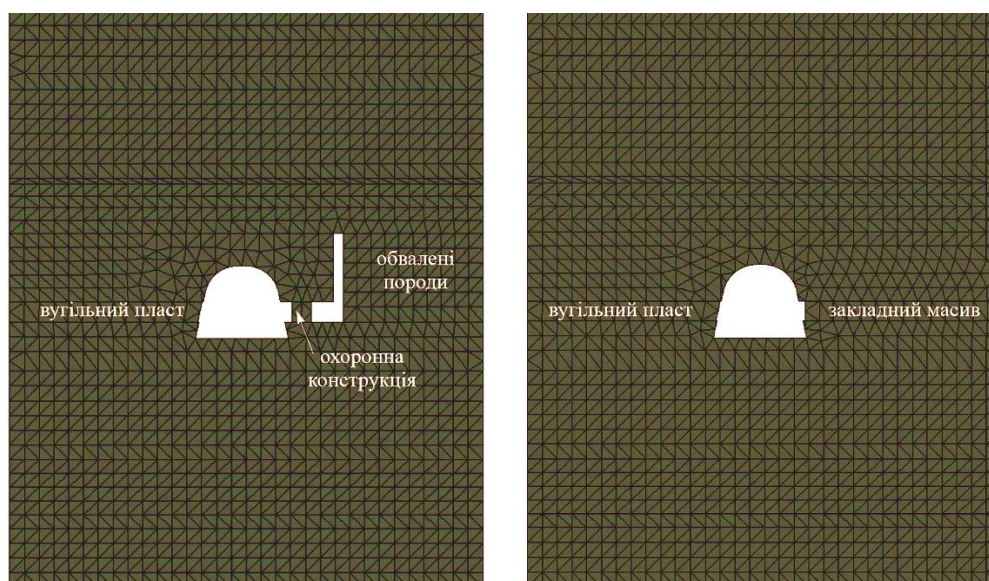
1) обвалені породи у виробленому просторі: модуль деформації  $E = 50$  МПа; коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,4$ ; насипна щільність – 1,6 т/м<sup>3</sup>; міцність на розтяг  $\sigma_p = 0,0$  МПа; міцність на стиск  $\sigma_{cm} = 5,0$  МПа;

2) закладна породна смуга: модуль деформації  $E = 250$  МПа; коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,35$ ; насипна щільність – 1,8 т/м<sup>3</sup>; міцність на розтяг  $\sigma_p = 0,0$  МПа; міцність на стиск  $\sigma_{cm} = 10,0$  МПа;

3) охоронне дерев’яне кріплення (накатний костер): модуль деформації  $E = 11000$  МПа; коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,4$ ; щільність – 0,52 т/м<sup>3</sup>; міцність на розтяг  $\sigma_p = 100,0$  МПа; міцність на стиск  $\sigma_{cm} = 50,0$  МПа.

Моделюється напружений стан масиву гірських порід навколо виїмкової виробки, що повторно використовується для 2 варіантів: із закладним масивом згідно способу [17] та при традиційній технології з охоронною конструкцією і повним обваленням порід. Для виключення впливу крайового ефекту на формування напружень навколо виїмкової виробки дотримані граничні умови. Розмір геомеханічної моделі прийнятий наступний: по вертикалі – 28 м; по горизонталі – 24 м. Після побудови об’ємної геомеханічної моделі створюється сітка скінчених елементів (рис. 1), причому чим дрібнішою є сітка, тим точніше обчислювальний експеримент і триваліший час розрахунку. Після створення сітки згідно з розробленою розрахунковою схемою прикладається навантаження на зафіксовану з усіх боків геомеханічну модель масиву та виконується розрахунок напруженого стану з подальшим аналізом

епюр напружень. У даному дослідженні оцінюється вертикальна компонента напружень.



**Рисунок 1. Побудова сітки скінчених елементів при традиційній технології з повним обваленням порід та охоронною конструкцією (а) та технології з формування закладного масиву (б)**

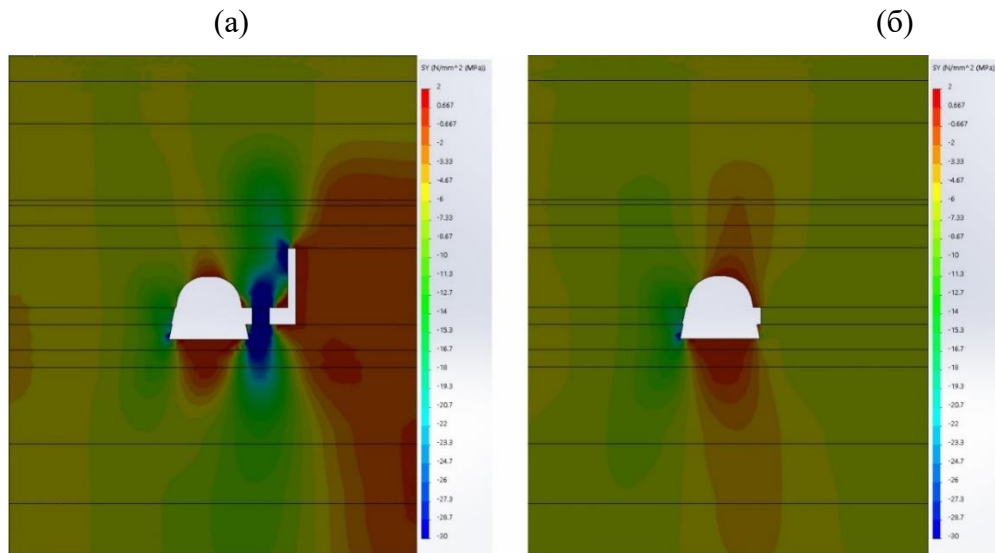
В цьому дослідженні застосовано чисельне моделювання методом скінчених елементів у програмному пакеті SolidWorks 2016. Геомеханічна задача вирішувалась в пружній постановці, отримані значення напружень порівнювались з гранично допустимими міцнісними значеннями гірських порід. З досвіду проведення чисельного моделювання напруженого стану масиву навколо виїмкових виробок методом скінчених елементів розміри зон напруженого стану, що розвиваються від контуру виробки вглиб у боках, у покрівлі та підшві масиву, зазвичай, не перевищують розмір її ширини і висоти, відповідно, тому прогнозуємо достатність вжитих геометричних розмірів моделі.

Якщо за результатами аналізу отриманих епюр напружень уздовж верхньої та нижньої меж моделі компоненти  $\sigma_y$ , що відповідають напруженню ( $\gamma H$ ) неторканого масиву розподілені рівномірно, а в боках покрівлі та підшви виїмкової виробки напруження  $\sigma_y$  згасають на відстані, набагато меншій бічних меж моделі, то геометричні розміри геомеханічної моделі прийняті правильно. В результаті моделювання отримуємо епюри вертикальних і горизонтальних компонент напружень  $S_Y$ ,  $S_X$ . Аналіз формування полів напружень дозволить дослідити характер зміни областей концентрацій напружень навколо виробки при традиційній технології та технології видобутку з формуванням закладного масиву.

Таким чином, розроблено та обґрунтовано геомеханічні моделі для дослідження напруженого стану масиву гірських порід навколо виїмкової виробки при варіантах розробки вугільного пласта, що порівнюються.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті чисельного моделювання отримано епюри вертикальних напружень  $\sigma_y$  навколо виїмкового штреку при традиційній технології відпрацювання з повним обваленням порід та варіанту із закладанням шахтних порід у вироблений простір, що наведено на рис. 2. При традиційній технології розглядається виїмковий штрек, де з лівого боку вугільний масив, а з правого – вироблений простір, що містить обвалені породи та дерев'яне кріплення (накатний костер) як охоронна конструкція, яка «обрізає» породи покрівлі пласта і зменшує навантаження породної консолі на її рамне кріплення. При варіанті із закладним масивом розглядається виїмковий штрек, де з лівого боку вугільний масив, а з правого – вироблений простір, що містить закладену породну полосу, зашивання вікна лави можливо здійснити, наприклад, металевою сіткою.



**Рисунок 2. Епюра вертикальних напружень  $\sigma_y$  навколо виїмкового штреку при традиційній технології відпрацювання з повним обваленням порід (а) та закладанні шахтних порід у вироблений простір (б)**

При аналізі епюри вертикальних напружень  $\sigma_y$  на глибині 300 м на обох рисунках 2 (а і б) видно, що уздовж верхньої та нижньої меж моделі встановлюється майже рівномірний розподіл незначних стискаючих напружень  $\sigma_y$ , що, відповідно, не перевищує величини  $\gamma H$  непорушеного масиву (6,0 МПа), а це в свою чергу вказує на достатність вжитих вертикальних розмірів моделі. У боках моделі діють також слабкі стискаючі напруження  $\sigma_y$  в межах 1,0 – 5,0 МПа.

Характер розподілу поля вертикальних напружень показує, що основні області концентрації напружень навколо виїмкового штреку розташовуються:

- покрівля виїмкового штреку;
- підшва виїмкового штреку;
- вугільний масиві у лівому боці виробки;

- охоронна конструкція та гірський масив, що з нею контактує;
- закладний та гірський масив, що контактують.

*Покрівля виїмкового штреку.* При традиційній технології з повним обваленням порід та охороною штреку дерев'яною конструкцією в центральній частині покрівлі формується зона розвантаження. Безпосередньо на контурі покрівлі на відстань до 0,3 м діють розтягуючі напруження 0,4 – 0,9 МПа, які переходять в слабкі стискаючі напруження на рівні 1,0 – 4,0 МПа і розповсюджуються на відстань від контуру вглиб масиву порід покрівлі до 1,2 м. Загалом зона розвантаження простягається від контуру вглиб масиву на 1,5 м. При формуванні закладного масиву у покрівлі штреку також формується зона розвантаження, проте її розмір складає 4,5 м, що в 3 рази більше, ніж при традиційній технології. Змінюється також і форма зони розвантаження – асиметрична в сторону виробленого простору, адже жорсткість закладного масиву менше, ніж вугільного пласта з правого боку і тиск порід покрівлі на піддатливий закладний масив зумовлює зміну форми зони. На контурі порід покрівлі на відстань до 0,4 м діють незначні розтягуючі напруження 0,2 – 0,5 МПа, які переходять в стискаючі 2,0 – 5,0 МПа і розповсюджуються вглиб на 4,0 м до рівня напружень непорушеного масиву. При обох технологіях концентрації розтягуючих напружень не призведуть до руйнування покрівлі, адже міцність на розтяг аргіліту складає 1,7 МПа, що має запас міцності.

*Підощва виїмкового штреку.* При традиційній технології з повним обваленням порід і охоронною конструкцією на контурі підощви в її центрі напруження близькі до 0,0 МПа, проте ближче до правого та лівого боку виробки в підощві є концентрації розтягуючих напружень до 2,5 МПа, які швидко затухають на відстань вглиб підощви до 0,4 м. В центрі підощви виробки також формується зона розвантаження вглиб порід на відстань 3,3 м до величини напружень непорушеного масиву. Отже в правому та лівому боці підощви виробки з часом слід очікувати незначне здимання порід підощви, адже міцність на розтяг алевроліту складає 1,5 МПа. При формуванні закладного масиву у підощві виробки формується також зона розвантаження вглиб від контуру на 6,0 м. На контурі підощви виникають напруження близькі до 0,0 МПа. Зондування величини напружень показує значення 0,0 – 0,1 МПа. У варіанті із закладним масивом здимання порід підощви не прогнозується.

*Вугільний масив у лівому боці виробки.* При традиційній технології з повним обваленням порід у вугільному масиві зліва виникає область стискаючих напружень зі значеннями від контуру боку виробки (вугільний пласт) від 17,0 до 6,0 МПа. Зона стискаючих напружень затухає на відстані вглиб масиву до 3,0 м. На контурі порід підощви вугільного пласта у лівому боці виникає концентрація стискаючих напружень 35,0 МПа, яка через 6,0 м вглиб масиву стрімко зменшується і складає вже 6,0 МПа. При закладному масиві геомеханічна ситуація в лівому боці виробки є аналогічною традиційній технології. При обох технологіях концентрації стискаючих напружень не призведуть до руйнування вугільного пласта у боці виробки, адже міцність на стиск вугілля складає 37,0 МПа, що має запас міцності. На контурі алевроліту підощви вугільного пласта слід очікувати незначне його руйнування, адже його міцність на стиск складає 15,0 МПа і, як наслідок, можливість деформації нижньої частини стійки аркового кріплення.

*Охоронна конструкція (закладний масив) та гірський масив, що з нею контактує.* Як видно з епюру (рис. 2), в охоронній дерев'яній конструкції, а також у породах покрівлі та підшви кріплення виникають найбільші стискаючі напруження в досліджуваній області всієї моделі. В охоронній конструкції при традиційній технології з обваленням виникають критичні стискаючі напруження з величиною до 55,0 МПа, що дещо перевищує межу міцності на стиск вздовж волокон (50,0 МПа) вертикальних дерев'яних стійок накатного костра. Прогнозується поступове вдавлювання накатного костра у підшви пласта та зменшення висоти виїмкової виробки. Проте, за рахунок змінання деревини та конструкції накатного костра виконання функції відпірної системи буде спостерігатись і надалі.

В породах покрівлі та підшви навколо охоронної конструкції внаслідок відпору виникають також концентрації стискаючих напружень в 45,0 – 50,0 МПа на відстань вглиб 1,5 м (покрівля) та 2,0 м (підшва), що призведе до повного руйнування порід, адже величина аргіліту на стиск складає 20,0 МПа, а алевроліту – 15,0 МПа. Внаслідок руйнування порід над та під охоронною конструкцією вірогідним є формування бокового тиску зруйнованих порід на рамне кріплення та асиметричну деформацію правої стійки, що встановлена поблизу охоронної конструкції. Це з часом призведе до необхідності перекріплення.

При варіанті із закладним масивом стискаючі напруження у закладному масиву з правого боку виробки сягають 8,0 МПа, поступово зменшуючись за довжиною лави. Так, величина напружень у закладному масиві бокової правої межі моделі складає 6,5 МПа. Слід зазначити задовільний стан порід покрівлі пласта, де стискаючі напруження не перевищують 7,0 МПа і зменшуються вглиб покрівлі по вертикалі до рівня непорушеного масиву. В правому боці виробки безпосередньо на контурі порід покрівлі пласта діють незначні розтягуючі напруження 0,0 – 0,3 МПа, а у породах підшви пласта по висоті піддривки також виникає незначна локальна концентрація допустимих розтягуючих напружень до 1,3 МПа.

Сприятливі геомеханічні умови підтримання правого боку виробки обумовлені тим, що ущільнені пусті породи у виробленому просторі виконують піддатливу функцію і не допускають значних осідань породних шарів покрівлі. Вагома частина гірського тиску передається на закладний масив, що нівелює виникнення критичних напружень, які здатні призвести до знеміцнення порід та утворити навантаження на кріплення виробки.

При традиційній технології вирішальним є виймальна потужність пласта, на яку опускаються породи покрівлі, що сприяє більшому тиску на охоронну конструкцію, відпір якої формує в області порід над ним область критичних руйнівних напружень, що знеміцнює породні шари. Суттєве зниження концентрації напружень в породах покрівлі зі сторони закладного масиву є дуже позитивним ефектом при повторному використанні виробки, коли вона існує досить тривалий час.

На основі проведених досліджень пропонується узагальнення отриманих даних щодо геомеханічної ситуації в масиві гірських порід навколо виїмкового штреку. Формування концентрацій напружень у породах від контуру виробки вглиб масиву враховано до появи величини напружень, що дорівнює



гірському тиску непорушеного масиву ( $\gamma H = 6,0$  МПа). Аналітичні дані зведено у таблицю 2.

Таблиця 2. Узагальнена геомеханічна оцінка напруженого стану контуру виїмкового штреку при різних технологіях управління покрівлею

Область контуру виїмкового штреку	Варіант управління покрівлею			
	Повне обвалення + охоронна конструкція		Формування закладного масиву	
	Напруження, МПа	Розмір зони, м	Напруження, МПа	Розмір зони, м
Покрівля штреку	0,0 – 0,9 («+»)	0,3	0,0 – 0,5 («+»)	0,4
	0,0 – 6,0 («-»)	1,2	0,0 – 0,6 («-»)	4,5
Підошва штреку	0,0 – 2,5 («+»)	0,4	0,0 – 0,1 («+»)	0,2
	0,0 – 6,0 («-»)	3,3	0,0 – 6,0	6,0
Вугільний пласт (лівий бік)	6,0 – 17,0 («-»)	3,0	6,0 – 17,0 («-»)	3,0
Охоронна конструкція (породна полоса):	55,0 («-»)	–	8,0	–
	6,0 – 45,0 («-»)	11,0	6,0 – 7,0	0,5
	6,0 – 45,0 («-»)	> 13,0	6,0 – 7,0	1,0

Примітка: «+» – розтягуюче напруження; «-» – стискаюче напруження

Аналіз величин напружень з даних таблиці 2 вказує, що формування закладного масиву в порівнянні з варіантом «повне обвалення + охоронна конструкція» зменшує на 55% величину розтягуючих напружень у покрівлі штреку, на 95% – розтягуючі напруження у підошві штреку та на 85% величину напружень у покрівлі і підошві над охоронною конструкцією. Щодо розміру зон концентрацій напружень, то вони наступні: в 2 – 3 рази збільшується розмір зони розвантаження в породах покрівлі та підошві виїмкового штреку, що позитивно впливає на геомеханічну ситуацію та до 13 разів розмір зони стискаючих напружень в породах над і під охоронною конструкцією.

Таким чином, можна стверджувати, що при формуванні породного закладного масиву у виробленому просторі лав суттєво змінюється та покращується поле напружень навколо виїмкового штреку, що повторно використовується. Особливо це важливо, тому що з правого боку виробки над та під охоронною конструкцією виникає область розвитку руйнівних концентрацій напружень, що при традиційному видобуванні вугілля призводить до руйнування правої стійки і верхняка рамного кріплення та ремонту виробки. Закладання шахтних порід у вироблений простір лави створює умови, при яких знижуються концентрації напружень у породах зі сторони виїнятого вугільного пласта, адже породні шари опускаються на закладний масив, при цьому їх прогин до появи критичних напружень припиняється.

#### 4. ВИСНОВКИ

В представленому дослідженні вивчено геомеханічну ситуацію в масиві гірських порід навколо виїмкової виробки, що повторно використовується, в умовах шахт Західного Донбасу, коли у виробленому просторі очисного вибою формується ущільнений закладний породний масив. Обґрунтовано геомеханічні моделі для вивчення напруженого стану масиву навколо виїмкових штреків при порівнювальних варіантах відпрацювання вугільного пласта – традиційному з повним обваленням порід та спорудженням охоронної конструкції штреку та формуванням закладного масиву.

Встановлено, що формування закладного масиву в порівнянні з варіантом «повне обвалення + охоронна конструкція» суттєво зменшує величину розтягуючих напружень у покрівлі штреку, розтягуючих напружень у підшві штреку та величину напружень у покрівлі й підшві над охоронною конструкцією. Встановлено, що при формуванні закладного масиву значно збільшується до рівня непорушеного масиву розмір зони розвантаження в породах покрівлі та підшві штреку, а також розмір зони стискаючих напружень в породах над та під охоронною конструкцією.

Закладання шахтних порід у вироблений простір лави створює умови, при яких знижуються концентрації напружень над та під охоронною конструкцією внаслідок того, що породи опускаються на закладний масив і їх прогин до появи критичних напружень припиняється.

Напрямами подальших досліджень повинні стати дослідження напруженого стану масиву при різних фізико-механічних властивостях, які змінюються внаслідок впливу ущільненням або зміцненням закладного масиву різними способами.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhou, B., Yan, Y., Dai, H., Kang, J., Xie, X., & Pei, Z. (2022). Mining subsidence prediction model and parameters inversion in mountainous areas. *Sustainability*, 14(15), 9445. <https://doi.org/10.3390/su14159445>
2. Petlovanyi, M.V., Zubko, S.A., Popovych, V.V., & Sai, K.S. (2020). Physicochemical mechanism of structure formation and strengthening in the backfill massif when filling underground cavities. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (6), 142-150. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-133-6-142-150>
3. Zhu, W., Xu, J., Xu, J., Chen, D., & Shi, J. (2017). Pier-column backfill mining technology for controlling surface subsidence. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (96), 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.04.014>
4. Петльований, М.В., & Гайдай, О.А. (2017). Аналіз накопичення і систематизація породних відвалів вугільних шахт, перспективи їх розробки. *Геотехнічна механіка*, (136), 147-158.
5. Ghirian, A., & Fall, M. (2017). Properties of cemented paste backfill. *Paste Tailings Management*, 59-109. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8_4)
6. Kuzmenko O., & Petlovanyi, M. (2015). Substantiation the expediency of fine gridding of cementing material during backfill works. *Mining of Mineral Deposits*, 9(2), 183-190. <https://doi.org/10.15407/mining09.02.183>

7. Кузьменко, А.М., Петлёванный, М.В., & Усатый, В.Ю. (2015). *Твердеющая закладка при отработке рудных крутых залежей в сложных горно-геологических условиях*. Днепропетровск: Национальный горный университет, 140 с.
8. Малашкевич, Д.С., Петльований, М.В., & Сай, К.С. (2021). Визначення раціональних параметрів зведення закладних масивів при селективній технології виймання тонких вугільних пластів. *Наукові праці ДонНТУ. Серія Гірничо-геологічна*, 1(25)-2(26), 28-36. [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2021-1\(25\)-2\(26\)-28-36](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2021-1(25)-2(26)-28-36)
9. Zhou, N., Zhang, J., Ouyang, S., Deng, X., Dong, C., & Du, E. (2020). Feasibility study and performance optimization of sand-based cemented paste backfill materials. *Journal of Cleaner Production*, (259), 120798. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120798>
10. Бондаренко, В.І., Ковалевська, І.А., Симанович, Г.А., Вівчаренко, О.В., Малихін, О.В., & Гусев, О.С. (2014). *Геомеханіка навантаження і розрахунок параметрів кріпильної й охоронної систем підготовчих виробок шахт Західного Донбасу*. Дніпропетровськ: ЛізуновПрес, 228 с.
11. Солодянкін, О.В., Дудка, І.В., Терещук, Р.М., & Григор'єв, О.Є. (2017). *Охорона підготовчих виробок, що використовують повторно, в умовах антрацитових шахт*. Дніпро: Національний гірничий університет, 161 с.
12. Грін'юв, В.Г., Хорольський, А.О., & Виноградов, Ю.О. (2019). Технологічні аспекти спорудження виробок у складних гідрогеологічних умовах. *Геотехнічна механіка*, (149), 132-141.
13. Sakhno, I.G., Sakhno, S.V., & Kamenets, V.I. (2022). Stress environment around head entries with pillarless gobside entry retaining through numerical simulation incorporating the two type of filling wall. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012011>
14. Курносів, С.А., Осенний, В.Я., Задерий, В.В., Цикра, А.А., & Аверкін, Д.І. (2015). Исследование влияния способов сооружения бетонных околоштрековых полос на их прочностные и деформационные параметры. *Геотехнічна механіка*, (122), 95-106.
15. Бузило, В.І., Сулаєв, В.І., Кошка, А.Г., & Яворський, А.В. (2013). *Технологія отработки тонких пластов с закладкой выработанного пространства*. Днепропетровск: Национальный горный университет, 124 с.
16. Petlovanyi, M.V., Malashkevych, D.S., & Sai, K.S. (2020). The new approach to creating progressive and low-waste mining technology for thin coal seams. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(4), 765-775. <https://doi.org/10.15421/112069>
17. Малашкевич, Д.С., Петольований, М.В., & Пойманов, С.М. (2021). *Спосіб закладки виробленого простору*. Патент на корисну модель № 147810.
18. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Cawood, F., Husiev, O., Snihur, V., & Jimu, D. (2021). Development and testing of an algorithm for calculating the load on support of mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 15(1), 1-10. <https://doi.org/10.33271/mining15.01.001>
19. Петльований, М.В., & Сай, К.С. (2021). Моделирование напряженного stanu закладного масиву при різних фізико-механічних властивостях. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 1(48), 7-18. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2021-1-7-18>
20. Liu, H., Xiao, Y., Liu, K., Zhu, Y., & Zhang, P. (2022). Numerical simulation on backfilling of buried pipes using controlled low strength materials. *Applied Sciences*, 12(14), 6901. <https://doi.org/10.3390/app12146901>
21. Симанович, А.М. (1973). *Совершенствование способов охраны подготовительных выработок*. Донецк: Донбасс, 121 с.

22. Shashenko, A., Gapieiev, S., & Solodyankin, A. (2009). Numerical simulation of the elastic-plastic state of rock mass around horizontal workings. *Archives of Mining Sciences*, 54(2), 341-348.

23. Iordanov, I., Novikova, Y., Simonova, Y., Yefremov, O., Podkopayev, Y., & Korol, A. (2020). Experimental characteristics for deformation properties of backfill mass. *Mining of Mineral Deposits*, 14(3), 119-127. <https://doi.org/10.33271/mining14.03.119>

24. Petlovanyi, M., Malashkevych, D., Sai, K., Bulat, I., & Popovych, V. (2021). Granulometric composition research of mine rocks as a material for backfilling the mined-out area in coal mines. *Mining of Mineral Deposits*, 15(4), 122-129. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.122>

## REFERENCES

1. Zhou, B., Yan, Y., Dai, H., Kang, J., Xie, X., & Pei, Z. (2022). Mining subsidence prediction model and parameters inversion in mountainous areas. *Sustainability*, 14(15), 9445. <https://doi.org/10.3390/su14159445>

2. Petlovanyi, M.V., Zubko, S.A., Popovych, V.V., & Sai, K.S. (2020). Physicochemical mechanism of structure formation and strengthening in the backfill massif when filling underground cavities. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (6), 142-150. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-133-6-142-150>

3. Zhu, W., Xu, J., Xu, J., Chen, D., & Shi, J. (2017). Pier-column backfill mining technology for controlling surface subsidence. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (96), 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.04.014>

4. Petlovanyi, M.V., & Haidai, O.A. (2017). Analiz nakoplychennia i systematyzatsiia porodnykh vidvaliv vuhilnykh shakht, perspektyvy yikh rozrobky. *Heotekhnichna mekhanika*, (136), 147-158.

5. Ghirian, A., & Fall, M. (2017). Properties of cemented paste backfill. *Paste Tailings Management*, 59-109. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8_4)

6. Kuzmenko O., & Petlovanyi, M. (2015). Substantiation the expediency of fine gridding of cementing material during backfill works. *Mining of Mineral Deposits*, 9(2), 183-190. <https://doi.org/10.15407/mining09.02.183>

7. Kuzmenko, A.M., Petlevanyy, M.V., & Usatyy, V.Yu. (2015). Tverdeyushchaya zakladka pri otrabotke rudnykh krutykh zalezhey v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh. Dnepropetrovsk: Natsionalnyy gornyy universitet, 140 s.

8. Malashkevych, D.S., Petlovanyi, M.V., & Sai, K.S. (2021). Vyznachennia ratsionalnykh parametriv zve-dennia zakladnykh masyviv pry selektyvniy tekhnolohii vyimannia tonkykh vuhilnykh plastiv. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya Hirnycho-heolohichna*, 1(25)-2(26), 28-36. [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2021-1\(25\)-2\(26\)-28-36](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2021-1(25)-2(26)-28-36)

9. Zhou, N., Zhang, J., Ouyang, S., Deng, X., Dong, C., & Du, E. (2020). Feasibility study and performance optimization of sand-based cemented paste backfill materials. *Journal of Cleaner Production*, (259), 120798. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120798>

10. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A., Symanovych, H.A., Vivcharenko, O.V., Malykhin, O.V., & Husiev, O.S. (2014). *Heomekhanika navantazhennia i rozrakhunok parametriv kripylnoi y okhoronnoi system pidhotov-chykh vyrobok shakht Zakhidnoho Donbasu*. Dnipropetrovsk: LizunovPres, 228 s.

11. Solodiankin, O.V., Dudka, I.V., Tereshchuk, R.M., & Hryhor'iev, O.Ye. (2017). *Okhorona pidhotovchykh vyro-bok, shcho vykorystovuiut povtorno, v umovakh antratsytovykh shakht*. Dnipro: Natsionalnyi hirnychiy universytet, 161 s.

12. Hrinov, V.H., Khorolskyi, A.O., & Vynohradov, Yu.O. (2019). Tekhnolohichni aspekty sporudzhenia vyrobok u skladnykh hidroheolohichnykh umovakh. *Heotekhnichna mekhanika*, (149), 132-141.
13. Sakhno, I.G., Sakhno, S.V., & Kamenets, V.I. (2022). Stress environment around head entries with pillarless gobside entry retaining through numerical simulation incorporating the two type of filling wall. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012011>
14. Kurnosov, S.A., Osenniy, V.Ya., Zaderiy, V.V., Tsikra, A.A., & Averkin, D.I. (2015). Issledovanie vliyaniya sposobov sooruzheniya betonnykh okoloshtrekovykh polos na ikh prochnostnye i deformatsionnye parametry. *Heotekhnichna mekhanika*, (122), 95-106.
15. Buzilo, V.I., Sulaev, V.I., Koshka, A.G., & Yavorskiy, A.V. (2013). *Tekhnologiya otrabotki tonkikh plastov s zakladkoy vyrabotannogo prostranstva*. Dnepropetrovsk: Natsional'nyy gornyy universitet, 124 s.
16. Petlovanyi, M.V., Malashkevych, D.S., & Sai, K.S. (2020). The new approach to creating progressive and low-waste mining technology for thin coal seams. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(4), 765-775. <https://doi.org/10.15421/112069>
17. Malashkevych, D.S., Petlovanyi, M.V., & Poimanov, S.M. (2021). *Sposib zakladky vyroblenoho pro-storu*. Patent na korysnu model № 147810.
18. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Cawood, F., Husiev, O., Snihur, V., & Jimu, D. (2021). Development and testing of an algorithm for calculating the load on support of mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 15(1), 1-10. <https://doi.org/10.33271/mining15.01.001>
19. Petlovanyi, M.V., & Sai, K.S. (2021). Modeliuvannia napruzhenoho stanu zakladnoho masyvu pry riz-nykh fizyko-mekhanichnykh vlastyvostiakh. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*, 1(48), 7-18. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2021-1-7-18>
20. Liu, H., Xiao, Y., Liu, K., Zhu, Y., & Zhang, P. (2022). Numerical simulation on backfilling of buried pipes using controlled low strength materials. *Applied Sciences*, 12(14), 6901. <https://doi.org/10.3390/app12146901>
21. Simanovich, A.M. (1973). *Sovershenstvovanie sposobov okhrany podgotovitel'nykh vyrabotok*. Do-netsk: Donbass, 121 s.
22. Shashenko, A., Gapiyev, S., & Solodyankin, A. (2009). Numerical simulation of the elastic-plastic state of rock mass around horizontal workings. *Archives of Mining Sciences*, 54(2), 341-348.
23. Iordanov, I., Novikova, Y., Simonova, Y., Yefremov, O., Podkopayev, Y., & Korol, A. (2020). Experimental characteristics for deformation properties of backfill mass. *Mining of Mineral Deposits*, 14(3), 119-127. <https://doi.org/10.33271/mining14.03.119>
24. Petlovanyi, M., Malashkevych, D., Sai, K., Bulat, I., & Popovych, V. (2021). Granulometric composition research of mine rocks as a material for backfilling the mined-out area in coal mines. *Mining of Mineral Deposits*, 15(4), 122-129. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.122>

## ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

**Мета.** Дослідження впливу формування закладного породного масиву у виробленому просторі лави на геомеханічну ситуацію масиву гірських порід навколо виїмкового штреку.

**Методика.** Для досягнення мети використано чисельне моделювання методом скінченних елементів за допомогою програмного комплексу SolidWorks.

Досліджувалась геомеханічна ситуація навколо виїмкового штреку, що повторно використовується, при традиційній технології видобутку з повним обваленням порід покрівлі й охоронною конструкцією та технологія з формуванням закладного масиву у виробленому просторі лави. Геомеханічна оцінка надавалась на основі вивчення вертикальної компоненти напружень.

**Результати.** Обґрунтовано геомеханічні моделі для вивчення напруженого стану масиву навколо виїмкових штреків при порівнювальних варіантах відпрацювання вугільного пласта. Встановлено, що формування закладного масиву в порівнянні з варіантом «повне обвалення + охоронна конструкція» суттєво зменшує величину розтягуючих напружень у покрівлі штреку, розтягуючих напружень у підшві штреку та величину напружень у покрівлі й підшві над охоронною конструкцією. Встановлено, що при формуванні закладного масиву значно збільшується до рівня непорушеного масиву розмір зони розвантаження в породах покрівлі та підшві штреку і розмір зони стискаючих напружень в породах над та під охоронною конструкцією.

**Наукова новизна.** Виявлено особливості характеру розподілу напружень в масиві гірських порід при формуванні закладного масиву з шахтних порід у виробленому просторі лави, що свідчить про більш сприятливі умови підтримання виїмкових штреків позаду очисного вибою, ніж варіант з повним обваленням порід та спорудженням охоронної конструкції.

**Практична значимість.** Формування породної закладної смуги у виробленому просторі очисних вибоїв дозволяє зменшити інтенсивність гірського тиску та зберегти виїмкову виробку у задовільному стані для повторного її використання.

**Ключові слова:** виїмкових штрек, геомеханічна модель, чисельне моделювання, напруження, гірський масив, закладний масив, повне обвалення, охоронна конструкція

## **ABOUT AUTHORS**

Petlovanyi Mykhailo, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dnipro University of Technology, Associate Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, E-mail: petlyovany@ukr.net

Malashkevych Dmytro, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dnipro University of Technology, Associate Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, E-mail: malashkevychnm@gmail.com

Sai Kateryna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dnipro University of Technology, Associate Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, E-mail: kateryna.sai@gmail.com