

© О.Л. Шепель<sup>1</sup><sup>1</sup>Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ЗАХИСНОГО ЕКРАНА З ПОДРІБНЕНОЇ РУДИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТРУКТУРНОЇ МІЦНОСТІ БАР'ЄРНИХ ЦІЛИКІВ ПРИ ПЕРЕХОДІ З ВІДКРИТОЇ НА ПІДЗЕМНУ РОЗРОБКУ РОДОВИЩ

О. Shepel<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4581-5441><sup>1</sup>Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

### RESEARCH AND DETERMINATION OF THE THICKNESS OF THE PROTECTIVE SCREEN MADE OF CRUSHED ORE FOR ENSURING STRUCTURAL INTEGRITY OF BARRIER PILLARS DURING THE TRANSITION FROM OPEN-PIT TO UNDERGROUND MINING OF DEPOSITS

**Мета.** Дослідження, розроблення та вивчення захисних екранів з подрібненої руди на межі з штучними або природними бар'єрними ціликами в умовах переходу з відкритого на підземний спосіб видобутку.

**Методологія.** Застосовано багатосторонній дослідницький підхід, що включав: систематичний огляд літературних джерел для узагальнення знань про безпечні буропідливні роботи; аналіз фізики руйнування захисного екрана з подрібненої руди на межі з бар'єрним ціликом; чисельне моделювання за допомогою методу скінченних елементів; статистична обробка даних із застосуванням регресійного аналізу.

**Результати досліджень.** Розроблено та досліджено утворення захисних екранів, що значно покращують умови переходу з відкритого на підземний спосіб видобутку, забезпечуючи довговічність і надійність штучних і природних бар'єрних ціликів. Визначено параметри захисного екрана з подрібненої руди. Досліджено коефіцієнт послаблення амплітуди хвиль напружень під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана з подрібненої руди на межі з бар'єрним ціликом, що розділяє відкриті та підземні гірничі роботи.

**Наукова новизна.** Обґрунтовано залежність величини коефіцієнта послаблення амплітуди хвиль напружень під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана з подрібненої руди від проєктної товщини захисного екрана. Встановлено кількісну характеристику залежності товщини захисного екрана з подрібненої руди від основних впливових факторів. Вперше встановлено залежність величини коефіцієнта гранулометричного складу подрібненої руди захисного екрана від діаметра глибоких свердловин, якими формується захисний екран.

**Практичне значення.** Полягає у розробленні та обґрунтуванні параметрів захисних екранів з подрібненої руди, що забезпечують довговічність і надійність штучних і природних бар'єрних ціликів в умовах переходу з відкритого на підземний спосіб видобутку. Визначені залежності дають змогу гірничим підприємствам науково обґрунтувати та оптимізувати технологічні рішення, необхідні для безпечного ведення буропідливних робіт на межі відкритих і підземних гірничих робіт.

**Ключові слова:** буропідливні роботи, глибокі свердловини, захисний екран, масова відбійка, бар'єрні цілики, коефіцієнт послаблення, амплітуда хвиль напружень, гранулометричний склад.

**Вступ.** Однією з головних проблем при формуванні захисних бар'єрних ціликів, які використовують при переході з відкритих на підземні гірничі роботи, є проблема збереження цілісності природного або штучного бар'єрного цілика. Особливо важливою ця проблема постає при виконанні буропідричних робіт (БПР) при підземному відпрацюванні запасів блока, який відпрацьовують під прикриттям таких ціликів.

Підземні вибухи створюють значні динамічні навантаження й сейсмічні ефекти, які можуть спричинити пошкодження, деформації або навіть руйнування бар'єрного цілика. З огляду на його захисну функцію при відокремленні відкритих гірничих робіт від підземних, будь-яке порушення його цілісності несе серйозні ризики для безпеки та ефективності подальших підземних гірничих робіт.

Відомо, що відбійка свердловинних зарядів вибухових речовин (ВР) призводить до руйнування масиву в радіусі дії свердловинного заряду, який визначають, як правило, лінією найменшого опору (ЛНО). Коли вибухає заряд ВР, у масиві створюється ударна хвиля, яка поширюється від центру вибуху. Енергія цієї хвилі зосереджується та направляється вздовж шляху найменшого опору. Саме тут відбувається найбільш інтенсивне подрібнення та відкидання руди або гірської породи. За межами цієї лінії або на більшій відстані від заряду руйнування поступово зменшується, переходячи від повного подрібнення до утворення тріщин і незначних деформацій [1–6].

За межами радіусу руйнування рудного масиву розташовується зона тріщиноутворення. Величина й характер цієї зони залежать від параметрів БПР і фізико-механічних характеристик прилеглої рудного або штучного масиву [7–9]. Важливо враховувати ці чинники при проектуванні БПР, щоб мінімізувати негативний вплив на захисні бар'єрні цілики та забезпечити загальну безпеку гірничих робіт.

З погляду фізики, оптимальним варіантом БПР можна вважати технологію відбійки, коли заряд свердловин на контакті з масивом захисного бар'єрного цілика буде мати мінімальну енергетичну величину, яка дозволить відбити руду по контакту з майбутнім ціликом, але буде мати мінімальний вплив на структурну міцність рудного або штучного масиву [10–11].

Однак таку фізику вибуху можна отримати лише при підриві одного або кількох шарів руди з відповідними уповільненнями між шарами. На практиці при відбійці значного обсягу міцних магнетитових кварцитів застосовують технології масової відбійки руди з підриванням одночасно десятків, а іноді й сотень вибухових свердловин [12–17]. Сейсмічний ефект від дії таких масових вибухів може бути дуже шкідливим і призвести до значного тріщиноутворення в рудному або штучному масиві захисного бар'єрного цілика.

Саме тут і виникає потреба в глибоких дослідженнях, що дозволять, з одного боку, продовжувати використовувати ефективні технології масової відбійки, а з іншого – розробляти заходи для мінімізації їхнього негативного впливу на захисні цілики. Це може бути як оптимізація параметрів відбійки поблизу цілика або використання спеціальних типів ВР, так і інженерні рішення щодо самого цілика.

У практиці ведення гірничих робіт підземним способом дуже мало відомостей про застосування захисного екрана, особливо для захисту структурної міцності рудного або штучного цілика [10–11].

Наприклад, для захисту будівель на денній поверхні від сейсмічного впливу можуть застосовуватися демпфери та інші екрани. Але спостерігається значна відсутність стандартних рішень для ведення підземних гірничих робіт, або такі рішення рідко розробляються та не публікуються.

Отже, розроблення та вивчення таких захисних екранів може значно покращити умови переходу з відкритого на підземний спосіб видобутку, забезпечуючи довговічність і надійність штучних і природних бар'єрних ціликів.

**Основна частина.** Було запропоновано варіант технології, зміст якої полягає в тому, що утворений захисний екран подрібненої руди відображає в бік незайманого гірського масиву енергію хвиль напружень від вибуху основного заряду глибоких свердловин. Механізм відображення полягає в тому, що подрібнена руда, особливо з неоднорідною структурою та великою кількістю порожнин, може слугувати ефективним вибуховим дзеркалом. Різниця у вибуховому імпедансі між подрібненою зоною руди та більш щільним, монолітним ціликом сприяє відображенню хвилі. Це схоже на принципи роботи демпфувальних зон або амортизувальних шарів, але з акцентом на відбиття.

Захисний екран, штучно створений у масиві, є зоною розвантаження. Відомо, що відбивний екран для вибухових хвиль виникає на стику зони, де руда розвантажена, та зони, де діють підвищені стискальні напруження [6].

Ефективність захисного екрана, що відбиває вибухові хвилі, зростає разом із збільшенням різниці в абсолютних значеннях напружень між розвантаженою та стиснутою зонами. На цю здатність також позитивно впливають високочастотна складова падаючої хвилі та пористість подрібнених вибухом порід у межах самого екрана. Отже, для створення оптимального захисного екрана необхідно забезпечити значний контраст у напруженому стані прилеглих зон і врахувати характеристики вибухової хвилі та зруйнованого масиву.

Вибух у гірському масиві руди без розвантажених зон спричиняє його різке обвалення за напрямком свердловин. Але коли є зони розвантаження, вони функціонують як захисний екран, відбиваючи енергію вибухових хвиль.

Для цілеспрямованого формування зон розвантаження та опорного тиску ефективно застосовується технологія контурного підривання [18]. Її поширення з часом у гірничій справі є логічним продовженням пошуку способів ефективного та безпечного управління гірським тиском.

Принцип контурного підривання полягав у бурінні серії близько розташованих паралельних свердловин по периметру майбутньої виробки. Ці свердловини заряджалися невеликими, часто роз'єднаними або декупольованими зарядами ВР, і підривалися з дуже невеликими затримками або одночасно, залежно від конкретної техніки підривання. Це створювало площину тріщин або лінію відриву вздовж проєктного контуру, відокремлюючи основний обсяг породи, який потім виймався більш масовими вибухами.

Використовуючи контурне підривання, досягається мета, щоб основний вибух зруйнував породу лише в межах проектного контуру виробки або цілика, залишаючи навколишні породи та законтурний масив порід максимально цілими, непошкодженими та стійкими. Це досягається завдяки тому, що контурний вибух створює лінію відриву, яка запобігає поширенню руйнівних тріщин та надмірних динамічних напружень у бік законтурного масиву.

Утворення лінії відриву полягає у взаємодії хвиль напружень. Кожен заряд створює компресійну стискальну  $P$ -хвилю, яка радіально поширюється від свердловини. Коли ці стискальні хвилі від сусідніх свердловин зустрічаються між собою, вони інтерферують. У площині, що проходить між осями свердловин, компресійні хвилі відбиваються одна від одної, створюючи хвилі розтягнення. Тому ці створені тензійні напруження є достатніми для ініціювання тріщин [19].

Після проходження ударної хвилі високий тиск газів вибуху діє на стінки свердловин. Ці гази проникають у щойно утворені мікротріщини, посилюючи їхнє розкриття та поширення. Тиск газів розриває породу, створюючи протяжну тріщину, яка з'єднує сусідні свердловини, формуючи таким чином єдину площину розколу [20]. У результаті цих процесів утворюється чітка, відносно гладка площина тріщини, що проходить вздовж ряду свердловин. Ця тріщина діє як демпферна зона або екран.

Загальна формула для розрахунку питомих витрат  $ВР$ , що базується на підходах контурного підривання для масових вибухів, має вигляд:

$$q = \frac{K \cdot Q_{дин}}{B \cdot S \cdot H} \text{ кг/м}^2, \quad (1)$$

де  $q$  – питомі витрати  $ВР$ ,  $\text{кг/м}^3$  або  $\text{кг/т}$ ;  $K$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує характеристики гірської породи та  $ВР$ ;  $Q_{дин}$  – динамічний коефіцієнт якості  $ВР$ ;  $B$  – лінія найменшого опору, м;  $S$  – відстань між свердловинами, м;  $H$  – висота частини блока, що підривається, або висота заряду, м.

Сутність запропонованої технології представлено на рис. 1. Формування захисного екрана подрібненої руди на границі з бар'єрним ціликом, здійснюється за допомогою комплекта глибоких свердловин 5, які розбурюються з бурового штреку 6, розташованого у висячому боці покладу.

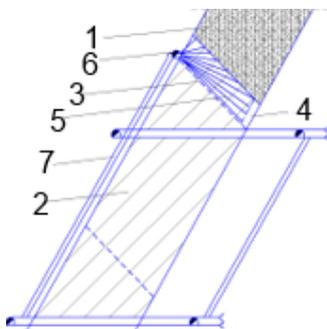


Рис. 1. Формування захисного екрана подрібненої руди на границі з бар'єрним ціликом: 1 – бар'єрний цілик; 2 – майбутня камера II черги відпрацювання; 3 – контур захисного екрана; 4 – відрізна щілина; 5 – комплект глибоких свердловин; 6 – буровий штрек; 7 – вентиляційно-ходовий підняттявий

У першу чергу, у нижній частині майбутнього захисного екрана проходять відрізну щілину 4 в лежачому боці покладу. Далі з бурового штреку 6 висячого боку розбурюють комплект глибоких свердловин 5 для формування майбутнього захисного екрана. Здійснюють торцеву відбійку глибоких свердловин 5 на відрізну щілину 4 з уповільненням для зниження сейсмічного ефекту й ударної дії вибуху свердловинних зарядів на бар'єрний цілик 1. Після формування захисного екрана здійснюють відбійку основного запасу руди камери II черги відпрацювання традиційними технологіями.

Отже, формування захисного екрана подрібненої руди, який рекомендовано застосовувати на границі з бар'єрним ціликом, знижує сейсмічний ефект і ударну дію продуктів вибуху свердловинних зарядів, які застосовують для відбійки основного запасу руди очисної камери II черги і які негативним чином впливають на запобіжний бар'єрний цілик.

Параметри захисного екрана з подрібненої руди розраховуються за методикою, заснованою на теорії акустичного імпедансу. Для оцінювання величини загасання амплітуди хвилі стиснення  $A\sigma_{еш}$ , яка проходить через захисний екран з подрібненої руди, застосовується така формула:

$$A\sigma_{еш} = A\sigma_n \frac{4^{J_1} J_2}{J_1 J_2 + 1} \quad (2)$$

де  $A\sigma_n$  – амплітуда падаючої хвилі стиснення;  $J_1$  – акустична жорсткість масиву руди;  $J_2$  – акустична жорсткість подрібненої руди в захисному екрані.

Проходячи через шар подрібненої вибухом руди в захисному екрані, хвиля напружень втрачає частину своєї енергії. Механізмами цих втрат є тертя між окремими частинами шматків руди та їхнє подальше руйнування. Щоб відобразити цей ефект, необхідно врахувати коефіцієнт послаблення амплітуди хвиль напружень під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана з подрібненої руди,  $K_n$ .

Коефіцієнт послаблення амплітуди хвиль напружень  $K_n$  у частках одиниць під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана з подрібненої руди залежить насамперед від товщини захисного екрана,  $M_{зе}$ .

З погляду фізики, оптимальним варіантом БПР можна вважати технологію відбійки, коли захисний екран з подрібненої руди на контакт з масивом захисного бар'єрного цілика буде забезпечувати мінімальну енергетичну величину впливу на структурну міцність масиву бар'єрного цілика.

Для визначення величини послаблення амплітуди хвиль напружень під час їхнього поширення в екранувальному шарі було виконано чисельне моделювання в динамічній системі розрахунку програмного забезпечення «Ansys, Inc. Products 2019 R3» на експериментальній моделі.

Проведено п'ять послідовних етапів чисельного моделювання поширення хвилі напружень від вибуху заряду ВР ігданіту в гірничому масиві, що складається з трьох різних шарів: магнетитового кварциту 1, захисного екрана 2 з відбитої розпушеної руди товщиною 1 м, 5 м, 10 м, 13 м, 15 м та бар'єрного цілика

3. Цілик розділяє відкриті гірничі роботи та підземні. Таким чином отримано наочні результати впливу дії вибуху під дном кар'єру.

Встановлено, що створені вибухові хвилі поширюються крізь тіло магнетитового кварциту до межі із захисним екраном з відбитої розпушеної руди. На контакті тіла магнетитового кварциту та захисного екрана з відбитої розпушеної руди частина хвиль відбивається назад у тіло магнетитового кварциту, а частина проходить у захисний екран. Розповсюдження напружень вибухових хвиль у рудному масиві у вигляді ізоповерхні відповідно при товщині 1 м та 15 м захисного екрана з відбитої розпушеної руди зображено на рис. 2.

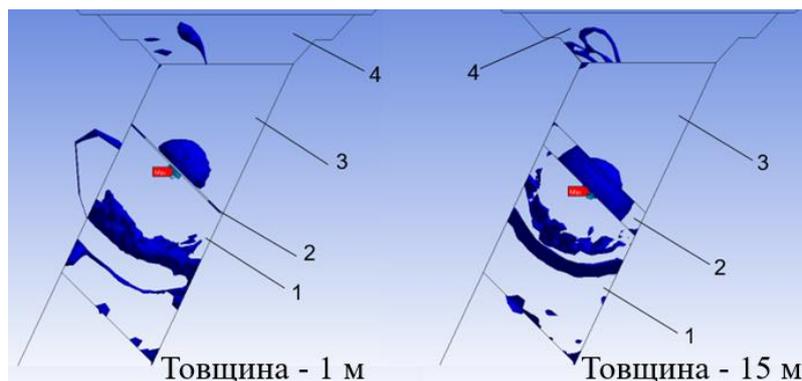


Рис. 2. Розповсюдження напружень вибухових хвиль у рудному масиві у вигляді ізоповерхні відповідно при товщині 1 м та 15 м захисного екрана: 1 – тіло магнетитового кварциту; 2 – захисний екран з відбитої розпушеної руди; 3 – бар'єрний цілик; 4 – кар'єр.

Вибухові хвилі, що пройшли через екран, досягають меж із ціликом. Тут також відбувається взаємодія й подальші хвилі поширюються в цілику, але вже зі значно меншою амплітудою. Також видно, що амплітуда хвилі падає нелінійно, про що свідчать складні форми поширення напружень.

Вибухові хвилі, що пройшли в захисний екран з відбитої розпушеної руди, починають затухати. Це загасання є ключовим аспектом дослідження.

На підставі результатів моделювання розповсюдження напружень вибухових хвиль на рис. 2 установлено, що товщий захисний екран забезпечує значно краще послаблення амплітуди хвиль напружень. Це означає, що через товщий захисний екран проходить набагато менша амплітуда й, відповідно, енергія хвиль, ніж через тонший. Захисний екран стає ефективнішим у захисті цілика при збільшенні його товщини, оскільки він поглинає більшу частку енергії ударної хвилі.

Було проаналізовано пікові амплітуди напружень в точках моделі до та після захисного екрана, що наведені у таблиці. При вибуху в рудному масиві переважають стискальні напруження. Стискальні напруження зазвичай позначаються від'ємними значеннями в «Ansys, Inc. Products 2019 R3».

Таблиця  
Значення амплітуди напружень в точках моделі до та після захисного екрана

Товщина екрана, $x$ , м	Пікова амплітуда до екрана, $A_0$ , МПа	Пікова амплітуда після екрана, $A_x$ , МПа	Відсоток ослаблення амплітуди (0 до 1)	Накопичений ефект загасання, $N_p$
1	-2,1647	-0,95063	0,56084	0,8229
5	-1,2688	-0,30159	0,76230	1,4368
10	-11,928	-1,2382	0,89619	2,2652
13	-2,3277	-0,070423	0,96975	3,4981
15	-3,1766	-0,057895	0,98177	3,9904

На підставі даних таблиці можна розрахувати: 1) коефіцієнт послаблення амплітуди хвиль напружень  $K_n$  у частках одиниць під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана з подрібненої руди; 2) коефіцієнт загасання амплітуди хвиль напружень, що пройшли через захисний екран; 3) коефіцієнт втрат енергії вибухових хвиль напружень; 4) накопичений ефект загасання вибухових хвиль.

Отже, проведено систематичне дослідження впливу товщини захисного екрана з подрібненої руди на загасання вибухових хвиль, щоб знайти оптимальні параметри для захисту бар'єрного цілика.

Відсоток послаблення амплітуди вимірюється в десяткових дробах та знаходиться в діапазоні від 0 до 1. Цей коефіцієнт чітко показує, яка частка амплітуди була втрачена, і він зростає від 0 до 1, відображаючи посилення загасання вибухових хвиль у захисному екрані.

Фактично коефіцієнт послаблення амплітуди хвиль напружень  $K_n$  у частках одиниць під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана з подрібненої руди показує, яка частка початкової амплітуди хвиль була втрачена або зменшилася після проходження через певний матеріал або відстань.

Для визначення коефіцієнта послаблення амплітуди хвиль напружень  $K_n$  у частках одиниць під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана з подрібненої руди застосовується така формула:

$$K_n = 1 - (|A_0| / |A_x|), \quad (3)$$

де  $A_0$  – амплітуда хвиль до проходження через захисний екран, МПа;  $A_x$  – амплітуда хвиль після проходження через екран на відстані  $x$ , МПа.

Установлено, що коефіцієнт послаблення амплітуди хвиль напружень  $K_n$  під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана з подрібненої руди та накопичений ефект загасання збільшуються зі збільшенням товщини екрана, що показує зростання загального загасання хвиль напружень.

На рис. 3 представлено залежність величини коефіцієнта послаблення амплітуди хвиль напружень  $K_n$  під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана з подрібненої руди від проектної товщини захисного екрана.

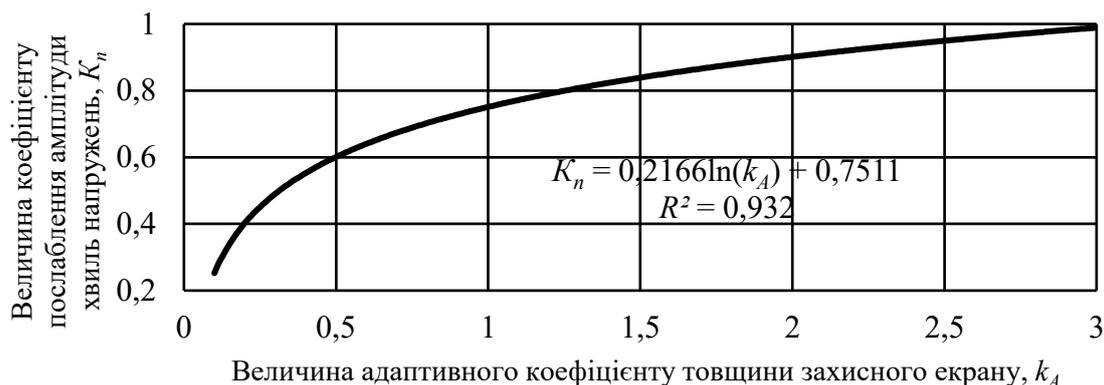


Рис. 3. Залежність величини коефіцієнта послаблення  $K_n$  амплітуди хвиль напружень під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана з подрібненої руди від адаптивного коефіцієнта  $k_A$  товщини захисного екрана:  
 $R^2$  – достовірність апроксимації

З урахуванням отриманих результатів досліджень наведено удосконалену формулу визначення величини коефіцієнта послаблення амплітуди хвиль напружень під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана:

$$K_n = 0,2166 \ln \frac{M_{ze}}{k_n \cdot C_0 \cdot d \cdot \bar{\Delta} \cdot \delta} + 0,7511,$$

де  $M_{ze}$  – товщина захисного екрана з подрібненої руди, м;  $k_n$  – коефіцієнт, який урахує неоднорідність масиву гірських порід,  $k_n = 0,9 \dots 1,0$ ;  $d$  – діаметр свердловин, м;  $\bar{\Delta}$  – коефіцієнт відносної працездатності ВР;  $\delta$  – щільність заряджання, г/см<sup>3</sup>;  $C_0$  – показник підриваємості гірських порід:

$$C_0 = 20 + 56 \cdot e^{-0,2 \cdot f}, \quad (4)$$

де  $f$  – коефіцієнт міцності руди.

Товщину захисного екрана з подрібненої руди більш доцільно визначати в метрах. Тому для цього замість товщини шару відбитої руди застосовується технологічний параметр, який використовують при розрахунку параметрів БПР, а саме величину ЛНО. При використанні глибоких свердловин для визначення ЛНО застосовується методика проф. Капленка Ю.П., яку затверджено як галузеву для залізорудних шахт України [21].

Отже, товщина захисного екрана з подрібненої руди буде визначатися з такого виразу:

$$M_{ze} = k_A \cdot W = k_A \cdot k_n \cdot C_0 \cdot d \cdot \bar{\Delta} \cdot \delta, \text{ м,}$$

де  $k_A$  – адаптивний коефіцієнт товщини захисного екрана.

Адаптивний коефіцієнт товщини захисного екрана з подрібненої руди  $k_A$  визначають за умови досягнення необхідної величини послаблення амплітуди хвиль напружень під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана з подрібненої руди й безпечного впливу на бар'єрний цілик. Формула має такий вигляд:

$$k_A = 0,0312e^{(4,6168 K_n)}.$$

Отже, маючи регламентовані технологічні вимоги до величини коефіцієнта послаблення амплітуди хвиль напружень під час їхнього поширення в захисному екрані з подрібненої руди, які діють на масив бар'єрного цілика, можна визначити необхідну товщину захисного екрана  $M_{ze}$  за такою формулою:

$$M_{ze} = (0,0312 e^{4,6168 K_n}) \cdot k_n \cdot C_0 \cdot d \cdot \bar{\Delta} \cdot \delta, \text{ м.}$$

Отже, захисний екран з подрібненої руди дозволяє досягти значного загасання енергії хвиль напружень, які діють на масив бар'єрного цілика, і підвищити його стійкість.

Установлено, що, проходячи через шар подрібненої вибухом руди в захисному екрані, вибухові хвилі напружень втрачають частину своєї енергії. Механізмами цих втрат є тертя між окремими частинами шматків руди та їхнє подальше руйнування. Ці втрати тим більші, чим менші частинки руди.

У той же час при технологічно грамотному розрахунку параметрів БПР розмір шматка подрібненої вибухом руди буде залежати від діаметра свердловин, яким формують захисний екран з подрібненої руди. Чим менший діаметр свердловин, тим краще подрібнення відбитої вибухом руди, тим рівномірніший гранулометричний склад відбитої руди.

У результаті виконаних досліджень встановлено залежність товщини захисного екрана від коефіцієнта гранулометричного складу  $K_{zc}$  подрібненої руди, а відповідно, від діаметра глибоких свердловин, якими формується захисний екран.

Проведено п'ять етапів чисельного моделювання подрібнення тіла магнетитового кварциту від вибуху свердловин завдовжки 5 м та різного діаметра 60 мм, 80 мм, 105 мм, 120 мм та 150 мм. Оцінено ступінь подрібнення, що корелює з гранулометричним складом за допомогою аналізу параметрів руйнування та деградації магнетитового кварциту в моделі (рис. 4).

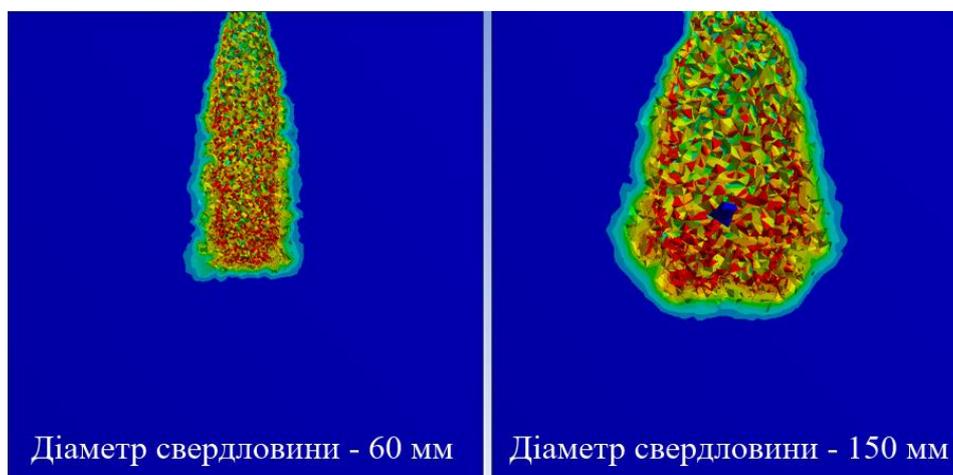


Рис. 4. Епюри подрібнення магнетитового кварциту у вигляді градієнтної кольорової діаграми на розрізі моделі по центру свердловини відповідно діаметром 60 мм та 150 мм і завдовжки 5 м після вибуху

В областях моделі було виявлено проміжні значення індексу пошкодження, що вказує на часткове подрібнення або деградацію властивостей шматків магнетитового кварциту. За межами дії вибухової свердловини пошкодження мінімальне, що відповідає холодним кольорам (синій) та означає, що існують області моделі, які не зазнали жодного впливу від вибуху свердловини.

При наочному порівнянні результатів моделювання (див. рис. 4) доведено твердження, що при вибуху свердловин з меншим діаметром відбувається краще подрібнення відбитої вибухом руди, а також отримується рівномірний гранулометричний склад відбитої руди.

За допомогою виконаних досліджень встановлено величину коефіцієнта гранулометричного складу подрібненої руди захисного екрана, який становить  $K_{zc} = 1,0 - 1,04$  для діаметра свердловин  $d = 60 - 80$  мм, збільшуючись до величин  $K_{zc} = 1,16 - 1,33$  при діаметрі свердловин  $d = 120 - 150$  мм.

На рис. 5 представлено залежність величини коефіцієнта гранулометричного складу подрібненої руди захисного екрана  $K_{zc}$  від діаметра глибоких свердловин, якими формується захисний екран.

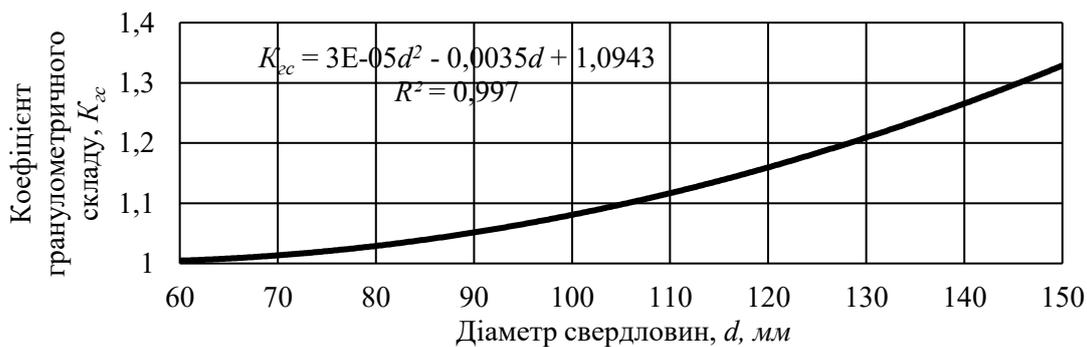


Рис. 5. Залежність величини коефіцієнта гранулометричного складу подрібненої руди захисного екрана  $K_{zc}$  від діаметра  $d$  глибоких свердловин, якими формується захисний екран:  $R^2$  – достовірність апроксимації.

Отже, необхідну товщину захисного екрана з подрібненої руди  $M_{ze}$  з урахуванням коефіцієнта гранулометричного складу подрібненої руди захисного екрана можна визначити за такою формулою:

$$M_{ze} = (0,0312 e^{4,6168K_n}) \cdot k_n \cdot C_0 \cdot d \cdot \bar{\Delta} \cdot \delta \cdot K_{zc}, \text{ м.}$$

Отже, розрахункові дані надають кількісну характеристику залежності товщини захисного екрана з подрібненої руди від основних впливових факторів, що є критично важливим для безпечної та ефективної реалізації переходу до підземної розробки.

**Висновки.** Згідно результатів досліджень встановлено, що захисні властивості екрана з подрібненої руди покращуються пропорційно його товщині, що виражається у підвищенні коефіцієнта послаблення амплітуди вибухових хвиль напружень  $K_n$  під час їхнього поширення в екранувальному шарі захисного екрана та загального рівня накопиченого ефекту загасання напружень.

Практичними дослідженнями встановлено, що при оптимальному діаметрі глибоких свердловин і коефіцієнті гранулометричного складу подрібненої руди захисного екрана  $K_{zc} = 1,0 - 1,04$  формується гранулометричний склад подрібненої руди, який дозволяє утворювати захисний екран мінімальної товщини при одночасному досягненні максимального загасання енергії вибухових хвиль у захисному екрані. Таким чином досягається зниження впливу енергії вибухових хвиль на масив бар'єрного цілика до мінімальних значень.

Визначено, що відповідність технологічним регламентам щодо допустимого рівня послаблення амплітуди вибухових хвиль напружень у захисному екрані дозволяє математично обґрунтувати його параметри. Зокрема, запропонований підхід дає змогу визначити необхідну товщину екрана  $M_{ze}$  з урахуванням основних впливових факторів, що забезпечує ефективний захист масиву бар'єрного цілика від динамічних навантажень.

#### Перелік посилань

1. Jiang, J.J. (2020). Study of pre-split blasting using fracture mechanics. *Rock Fragmentation by Blasting*, 201–206. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003078104-28>.
2. Xiong, J., Si, J., & Zheng, Y. (2020). Analysis of controlled blasting for Large-span Tunnel Passing beneath Cultural Relics Building. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 741, 012105. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/741/1/012105>.
3. Ткачук, К.Н. (1974). *Руйнування гірських порід вибухом*. Техніка.
4. Person, P.A., Holmberg, R., & Lee, J. (1994). *Rock Blasting and Explosive Engineering*. New York: CRC Press.
5. Шевцов, М.Р., Таранов, П.Я., Левіт, В.В., & Гудзь, О.Г. (2003). *Руйнування гірських порід вибухом*. Покровськ: ДВНЗ ДонНТУ.
6. Капленко, Ю.П., & Колосов, В.А. (1997). Закономірності поширення хвиль у середовищі, що перебуває під впливом неоднорідного поля статичних напружень. *Розроб. рудн. родовищ*, (61), 5–54.
7. Римарчук, Б.І. (1997). Вдосконалення методів вибухового роздроблення уступів з попереднім відділенням їх від масиву гірничих порід. *Відомості Академії гірничих наук України*, (3), 98–103.
8. Єфремов, Е.І., Пономарьов, А.В., & Нікіфорова, В.А. (2001). Вплив властивостей ВР на розміри зони переподрібнення при руйнуванні твердих середовищ. *Науковий вісник Національної гірничої академії України*, 24–26.
9. Капленко, Ю.П., Клевцов, І.В., Кузнєцов, В.В., Груєнко, В.М., Гірін, В.С., & Сігнаєвський, Ф.П. (1975). Ефективність підривання глибоких свердловин в умовах збільшення гірничого тиску. *Бюлетень*, 6(746), 35–37.
10. Римарчук, Б.І. (1998). Визначення параметрів екранувального шару при вибуховому подрібненні породних блоків. *Придніпровський науковий вісник (Технічні науки)*, 36(103), 86–95.
11. *Технологія відбійки руди за допомогою концентрованих зарядів у масиві, оконтуреному екрануючими щілинами*. (1997). (Звіт про НДР Кривбаспроект № 1796). Кривий Ріг.
12. Єфремов, Е.І. (2001). Найпростіші ВР та особливості їхнього застосування на кар'єрах. *Металургійна та гірничорудна промисловість*, (2), 72–75.
13. Римарчук, Б.І., Шварцер, В.Я., & Биков, Є.К. (2005). Порівняльна оцінка подрібнювальної дії деяких промислових ВР. *Вісник КТУ*, (9), 10–13.
14. Римарчук, Б.І. (2006). Параметри відбійки покладів міцних руд і магнетитових кварцитів великомасштабними зарядами ВР. *Металург. та гірничоруд. пром.*, (2), 72–75.
15. Rymarchuk, B., & Shepel, O. (2020). Ways of increase of efficiency of drilling-and-blasting. *E3S Web of Conferences*, 166, 03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016603001>.

16. You, Y., Yang, R., Zuo, J., Yang, Z., Li, J., Zhao, Y., & Yi, H. (2025). Mechanism of iron ore blasting fracture using axial uncoupled charges. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 32(4), 788–801. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-3038-x>.
17. Stupnik, M., & Kalinichenko, V. (2013). Magnetite quartzite mining is the future of Kryvyi Rig iron ore basin. *Mining of Mineral Deposits*, 49–52. <https://doi.org/10.1201/b16354-10>.
18. Gregory, C.E. (1973). *Explosives for North American Engineers*. Trans Tech., Cleveland.
19. Carrasco, L.G., & Saperstein, L.W. (1977). Surface morphology of pre-split fractures in plexi-glas models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 14(5–6), 261–275. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(77\)90737-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(77)90737-9).
20. Paine, R., Holmes, D., & Clark, H. (1961, June). Presplit Blasting at the Niagara Power Project. *The Explosives Engineer*, 72–91.
21. Капленко, Ю.П. (1977). *Управління вибухами при підземному видобутку руд у Кривбасі*. Київ-Донецьк: Вища школа.

### ABSTRACT

**Purpose.** Research, development, and study of protective screens made of crushed ore at the boundary with artificial or natural barrier pillars during the transition from open-pit to underground mining.

**The methods.** A multilateral research approach was applied, which included: a systematic review of literature sources to generalize knowledge about safe drilling and blasting operations; analysis of the physics of failure of the crushed ore protective screen at the boundary with the barrier pillar; numerical modeling using the finite element method; and statistical data processing using regression analysis.

**Findings.** The formation of protective screens was developed and studied, which significantly improve the conditions for the transition from open-pit to underground mining, ensuring the durability and reliability of artificial and natural barrier pillars. The parameters of the crushed ore protective screen were determined. The attenuation coefficient of stress wave amplitude during their propagation in the screening layer of the crushed ore protective screen at the boundary with the barrier pillar, which separates open-pit and underground mining operations, was investigated.

**The originality.** The dependence of the stress wave amplitude attenuation coefficient during their propagation in the screening layer of the crushed ore protective screen on the design thickness of the protective screen was substantiated. A quantitative characteristic of the dependence of the protective screen thickness made of crushed ore on the main influencing factors has been established. For the first time, the dependence of the granulometric composition coefficient of the crushed ore protective screen on the diameter of deep boreholes used to form the protective screen was established.

**Practical implementation.** Consists in the development and substantiation of the parameters of crushed ore protective screens that ensure the durability and reliability of artificial and natural barrier pillars during the transition from open-pit to underground mining. The determined dependencies enable mining enterprises to scientifically substantiate and optimize technological solutions required for the safe conduct of drilling and blasting operations at the boundary of open-pit and underground mining.

**Keywords:** *drilling and blasting operations, deep boreholes, protective screen, mass blasting, barrier pillars, attenuation coefficient, stress wave amplitude, granulometric composition.*

дата першого надходження статті до видання	06.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	08.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025