

© В.Є. Колесник¹, А.В. Павличенко¹, Т.Ф. Холоденко², О.Л. Кириченко²

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² ДП «НВО «Павлоградський хімічний завод», Павлоград, Україна

РАЦІОНАЛЬНЕ ДРОБЛЕННЯ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ СВЕРДЛОВИННИМИ ЗАРЯДАМИ ЯК ЧИННИК ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДРИВНИХ РОБІТ В КАР'ЄРАХ

© V. Kolesnik¹, A. Pavlychenko¹, T. Kholodenko², A. Kirichenko²

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² State Enterprise «SPA «Pavlograd Chemical Plant», Pavlograd, Ukraine

RATIONAL CRUSHING OF MINERAL RAW MATERIALS BY WELL CHARGES AS A FACTOR OF ENVIRONMENTAL SAFETY OF BLASTING WORKS IN QUARRIES

Мета. Підвищення рівня екологічної безпеки підривних робіт в кар'єрах з видобутку нерудних і будівельних матеріалів на основі їх раціонального вибухового дроблення, спрямованого на зниження ефекту переподрібнення, що супроводжується утворенням тонких фракцій матеріалів та значними викидами пилу в атмосферу.

Методика дослідження передбачала теоретичний аналіз процесів руйнування масивів гірських порід свердловинними зарядами вибухових речовин (ВР) на основі розрахунків ударних адиабат вибухової хвилі в породах при різній швидкості детонації ВР. Експериментальну перевірку виявлених закономірностей виконано шляхом оцінювання якості вибухопідготовки за гранулометричним складом породи в розвалі.

Результати дослідження. Вирішена науково-практична задача забезпечення раціонального вибухового дроблення матеріалів в кар'єрах із застосуванням подовжених свердловинних зарядів ВР. Встановлено механізми руйнування масивів гірських порід та особливостей розподілу зон руйнування за дисперсним складом, що сприяє зниженню викидів пилу в атмосферу до прийняттого рівня екологічної безпеки підривних робіт в кар'єрах. Отримано порівняльні оцінки ударного навантаження під час вибуху заряду ВР для основних гірських порід при різному рівні швидкості детонації зарядів. Встановлено залежність об'єму переподрібненої породи в зоні її примикання до заряду від швидкості детонації ВР. Виконано експериментальну перевірку виявлених закономірностей в умовах діючого кар'єру шляхом оцінювання якості вибухових робіт за гранулометричним складом гірської маси у її розвалі після дослідних вибухів з різними параметрами.

Наукова новизна. Шляхом розрахункового визначення параметрів ударних адиабат вибухової хвилі у різних породах та при різних швидкостях детонації ВР досліджено багатофазовий процес руйнування порід вибухом. Показано, що при руйнуванні гірського масиву вибухом подовженого свердловинного заряду ВР утворюються декілька специфічних зон руйнування, характеристики яких відрізняються за гранулометричним складом. Виділено область регульованого дроблення, де інтенсивність руйнування породи можна змінювати шляхом регулювання параметрів вибухового навантаження та область мало або практично нерегульованого дроблення. Обґрунтована можливість управління процесом пилоутворення та відповідно рівнем екологічної безпеки підривних робіт в кар'єрах з видобутку нерудних та будівельних матеріалів.

Практичне значення. Виявленні закономірності і положення щодо зменшення ефекту переподрібнення мінеральної сировини використані при розробленні заходів з підвищення рівня екологічної безпеки підривних робіт в умовах кар'єру, що зокрема передбачали збільшення міжсвердловинних відстаней у діапазоні до 3,0-3,4 м та зниження питомих енерговитрат з $1,27 \text{ г/см}^3$ до $0,97 \text{ г/см}^3$.

Ключові слова: екологічна безпека підривних робіт в кар'єрах; вибухове дроблення мінеральної сировини; гранулометричний склад гірської породи в розвалі.

Вступ. На сучасному етапі і в середньотривалій перспективі розвитку гірничої промисловості використання енергії вибуху для руйнування гірських порід займає домінуючу позицію і є найбільш ефективним методом вибухопідготовки гірничої маси. Якість останньої суттєво впливає на ефективність подальших процесів переробки мінеральної сировини та їх екологічну безпеку. Тому гірничі підприємства приділяють цій фазі суттєву увагу при вирішенні питань, з одного боку, ефективності технології дроблення матеріалів із застосуванням вибухових речовин (ВР), а з іншого, - забезпечення прийняттого рівня екологічної безпеки викидів пилу в атмосферу.

Указана вище технологічна і екологічна складові обумовлені недостатньо раціональним дробленням мінеральної сировини під час вибуху, тобто з утворенням негабаритів або навпаки – переподрібненням матеріалу, що супроводжується утворенням значної маси тонких та ультратонких фракцій матеріалу, що дробиться. Саме тому проблемі підвищення ефективності дроблення матеріалів вибухом присвячено багато теоретичних та експериментальних наукових робіт [1-7].

Постановка задачі. На кар'єрах найбільш поширеним методом руйнування гірських порід є використання подовжених свердловинних зарядів різних діаметрів і конструкцій. Використання таких свердловинних зарядів дозволяє розподіляти енергію вибуху в масиві та керувати напруженим станом з урахуванням фізико-механічних властивостей гірничих порід, а значить, впливати на ступінь дроблення матеріалів та рівень екологічної безпеки.

Керування якістю підготовки вибуху, а отже і напруженим станом гірського масиву, засновано на закономірностях, що описують взаємодію продуктів детонації (ПД) заряду ВР з оточуючим його середовищем – гірським масивом і матеріалом вибою [8-10]. Існуючі засоби і методи управління якістю вибухової підготовки розкривних порід поширюються, головним чином, на зону регульованого дроблення, що піддається активному, сукупному впливу всіх компонентів вибуху – ударних хвиль, прямих і відбитих хвиль напруження, а також газоподібних ПД, що зрештою надходять в атмосферу, знижуючи екологічну безпеку вибухових робіт [1-5].

Саме тому поліпшення екологічного стану за пиловим чинником на територіях, прилеглих до кар'єрів, може бути досягнуто за рахунок розробки способів управління якістю вибухової підготовки нерудних і будівельних матеріалів, що видобуваються, саме за рахунок їх раціонального дроблення. Це дозволить забезпечити рівномірність подрібнення та мінімізувати вихід, як негабаритної, так і переподрібненої фракції, найбільш дрібна частина якої

частково переходить у зважений стан у вигляді пилу і може перебувати в повітрі досить тривалий час, забруднюючи атмосферу та прилеглі до кар'єру території.

На сьогоднішній день визначення якості вибухопідготовки гірської маси в кар'єрах проводиться шляхом візуальної оцінки крупності шматків або за результатами екскавації. При цьому, відсутність системного підходу з обліку негабаритних фракцій не дозволяє в повній мірі виявити залежність якості підготовки гірської маси і величини витрати ВР, необхідних для її ефективного подрібнення за показниками виходу нормальних фракцій. Також в повній мірі є труднощі з визначення показників виходу переподрібнених фракцій, які призводять до інтенсивного пилоутворення і формування пилогазової хмари після масового вибуху в кар'єрі, розсіювання пилу з якої обумовлює приземні концентрації твердих суспендованих часток, що перевищують ГДК в середньому у 20 разів протягом 10-20 хвилин після вибуху [6].

Отже **метою роботи** є підвищення рівня екологічної безпеки підривних робіт в кар'єрах з видобутку нерудних і будівельних матеріалів на основі їх раціонального вибухового дроблення, спрямованого на зниження переподрібнення мінеральної сировини та відповідно викидів пилу в атмосферу.

Основні результати. Для досягнення поставленої мети вирішувалася задача забезпечення раціонального дроблення матеріалів із свердловинними зарядами ВР на основі встановлення механізмів руйнування масивів гірських порід та особливостей розподілу зон руйнування за дисперсним складом, спрямованих на зменшення ефекту переподрібнення мінеральної сировини та відповідного зниження викидів пилу в атмосферу при масових вибухах до прийняттого рівня екологічної безпеки підривних робіт в кар'єрах.

Спочатку встановлювалися механізми руйнування масивів гірських порід та особливості розподілу зон руйнування за дисперсним складом, спрямовані на зменшення ефекту переподрібнення мінеральної сировини. Так, відомо, що при вибуху свердловинного заряду змінюється напружено-деформований стан масиву гірських порід, за рахунок чого і відбувається його руйнування [7-11]. Навколо заряду виникають декілька специфічних зон руйнування, характер яких змінюється з віддаленням від осі заряду. Загальний масштаб і інтенсивність руйнування в цілому залежить від фізико-механічних властивостей гірських порід, рівня енергонасиченості, часу прикладання навантаження вибухового імпульсу, конструктивних особливостей зарядів, умов та способу їх підривання.

У випадку вибуху свердловинного заряду при наявності хоча б однієї площини оголення гірничого масиву загальний характер його руйнування може бути представлений у вигляді схеми, яка наведена на рис. 1.

На відміну від швидкоплинного процесу детонації ВР, який відбувається фактично миттєво і для стандартних свердловин не перевищує 1-2 мс, процес руйнування гірських порід є більш розтягнутим у часі і триває не менше 15-25 мс. Тому при вирішенні питань руйнування гірничих порід вибухом більш зручно розглядати його як багатофазовий процес.

Виходячи з сучасної уяви про механізм руйнування гірських порід, перша його фаза починається внаслідок різкого стрибка тиску і температури в момент

детонації заряду вибухових речовин (ВР), генеруючи при цьому ударну хвилю. Якщо параметри ударного стиснення перевищуватимуть межу плинності породи, це призведе до її дезінтеграції у ближній зоні заряду. Розповсюдження ударної хвилі у такому середовищі може бути описано лінійним рівнянням, що засновано на її ударній адіабаті:

$$D_{вд} = c_0 + \lambda \cdot U, \quad (1)$$

де c_0 – швидкість розповсюдження звуку у породі; λ – постійна для даного середовища; U – масова швидкість часток середовища за фронтом ударної хвилі.

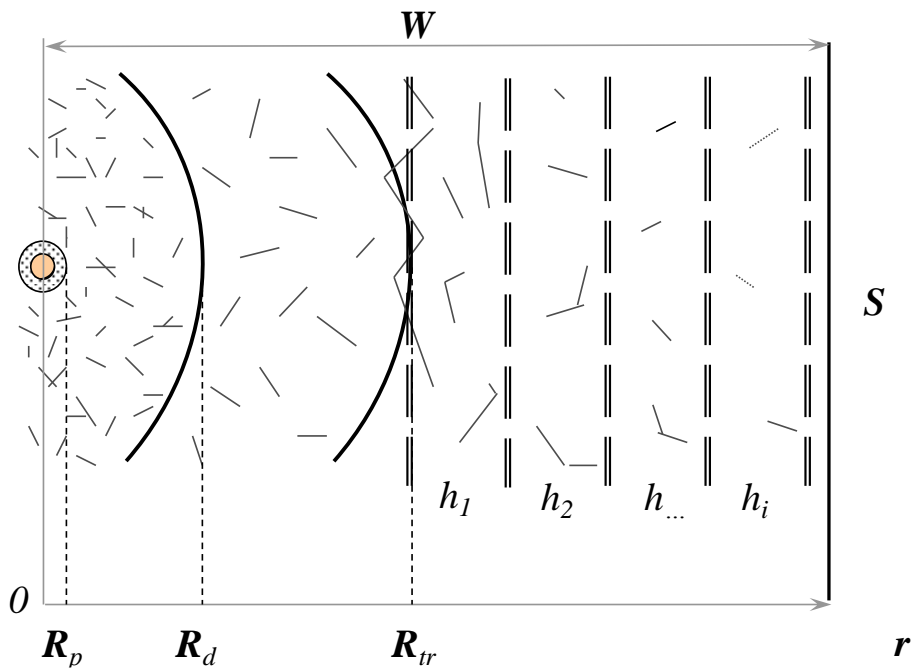


Рис. 1. Схема утворення специфічних зон руйнування масиву гірничих порід при вибуху свердловинного заряду ВР: R_p – зона переподрібнення (стиснення) породи; R_d – зона дроблення породи; R_{tr} – зона тріщиноутворення; h_i – зона відкольних шарів; W – величина опору породного масиву по підосві уступу; S – межа уступу (площина оголення)

Для отримання порівняльної оцінки ударного навантаження для деяких гірничих порід під час вибуху заряду ВР при різному рівні швидкості детонації було виконано розрахунок ударної адіабати за методикою [12].

Основні рівняння даної методики, що необхідні для визначення параметрів рівняння (1), наведено нижче:

$$c_0 = \frac{c_{o2} \cdot \left[\alpha_1 \cdot \left(\frac{\rho_{o2}}{\rho_{o1}} - 1 \right) + 1 \right]}{\sqrt{\alpha_1 \cdot \left(\rho_{o2}^2 \cdot \frac{c_{o2}^2}{c_{o1}^2} - 1 \right) + 1}}, \quad (2)$$

$$\lambda = \left[1 - \frac{\alpha_B \cdot \frac{\rho_{O2}}{\rho_B} + (1 - \alpha_B) \cdot \left[\alpha_1 \cdot \frac{\rho_{O2}}{\rho_{O1}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda_1}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda_2}\right) + 1 \right]}{\alpha_B \cdot \frac{\rho_{O2}}{\rho_{O1}} + (1 + \alpha_B) \cdot \left[\alpha_1 \cdot \left(\frac{\rho_{O2}}{\rho_{O1}} - 1\right) + 1 \right]} \right]^{-1}, \quad (3)$$

$$u = \sqrt{P \cdot \left[\frac{\alpha_1 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{O1}}{\rho_1}\right)}{\rho_{O1}} + \frac{\alpha_2 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{O2}}{\rho_2}\right)}{\rho_{O2}} + \frac{(1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot \left(1 - \frac{\rho_{Ov}}{\rho_v}\right)}{\rho_{Ov}} \right]}, \quad (4)$$

Параметри середовища, які використовували у розрахунках при моделюванні ударного навантаження гірничої породи вибухом зарядів ВР наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри середовища, які використовували у розрахунках при моделюванні ударного навантаження гірничої породи вибухом зарядів ВР

Параметри	Найменування породи				
	вапняк	піщаник	граніт	доломіт	кварц
Пороговий тиск P^* , Па	$6,5 \cdot 10^9$	$17,5 \cdot 10^9$	$16 \cdot 10^9$	$21,4 \cdot 10^9$	$36,2 \cdot 10^9$
Міцність на одновісне стиснення, Па	$2 \cdot 10^8$	$0,97 \cdot 10^8$	10^8	$0,9 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^8$
Коефіцієнт Пуассона	0,2	0,25	0,25	0,38	0,08
Коефіцієнт термічного розширення, K^{-1}	$8 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$11 \cdot 10^{-6}$	$15 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}
Модуль Юнга, Па	$10 \cdot 10^{10}$	$6,2 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^{10}$	$9,6 \cdot 10^{10}$
Питома теплоємність, Дж/кг К	1000	830	920	600-1500	700-1300
Швидкість звуку, м/с	2000	4400	5000	7500	3690
Початкова щільність, $кг/м^3$	2900	2650	2600	2650	2650

Для визначення тиску детонаційної хвилі в точці Чемпена-Джуге використовували відоме рівняння:

$$P = \frac{\rho_{ВВ} \cdot D_{ВВ}^2}{k + 1}, \quad (5)$$

де $\rho_{ВВ}$ – густина ВР, $кг/м^3$; $D_{ВВ}$ – швидкість детонації м/с; k – каволуом продуктів детонації (в разі емульсійних ВВ (ЕВР) k дорівнює 3)

У випадку падіння ударної хвилі (УХ) нормально до поверхні величина її тиску на межі ВР порода зростатиме і буде складати:

$$P = 0,59 \cdot \rho_{BB} \cdot D_{BB}^2, \quad (6)$$

Основні результати чисельних розрахунків ударної адіабати наведено на рис. 2. Характер адіабат дозволив встановити, що для піщаника, доломіту, вапняку та граніту порогові значення тиску, при якому розпочинається інтенсивне дрібнення породи навколо заряду, менше, ніж тиск на межі «тротил-порода».

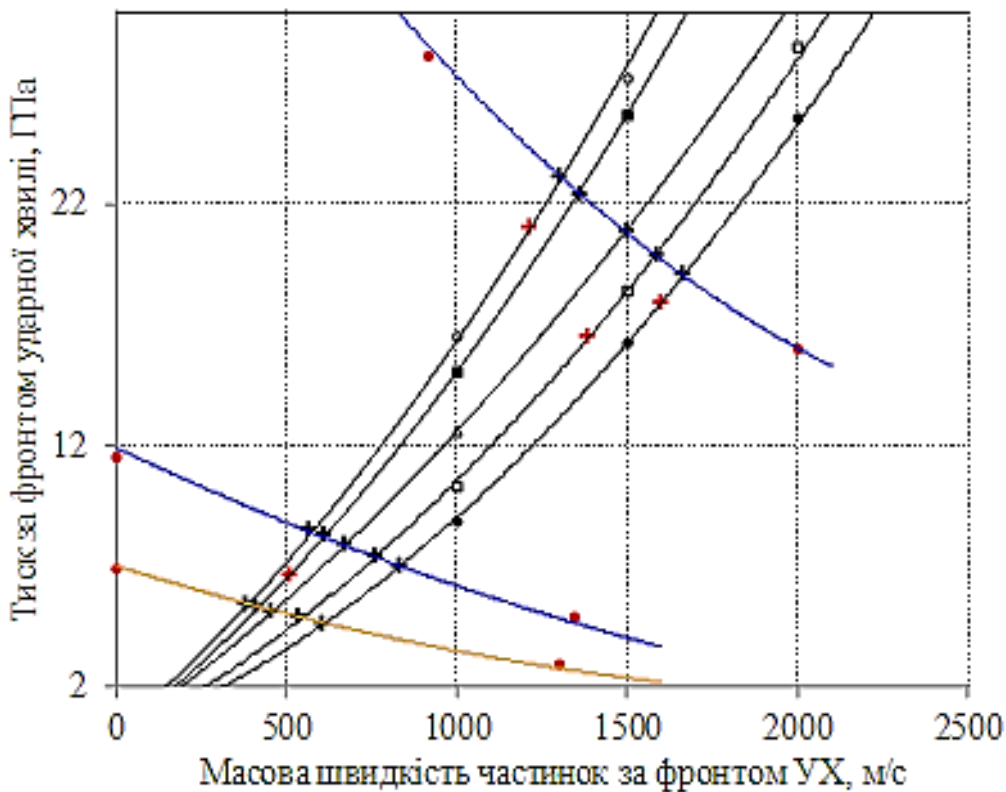


Рис. 2. Ударні адіабати у різних породах:

- – піщаник; Δ – кварц; ○ – доломіт; □ – граніт; ■ – вапняк ; × – пороговий тиск;
- + – початковий тиск в породі при вибуху прилеглого заряду ВР; 1 – ізоентропа продуктів детонації тротилу ($\rho_0=1637 \text{ кг/м}^3$; $D=6940 \text{ м/с}$); 2 – ізоентропа продуктів детонації ЕВВ ($\rho_0=1120 \text{ кг/м}^3$; $D=4175 \text{ м/с}$); 3 – ізоентропа продуктів детонації грануліту ($\rho_0=900 \text{ кг/м}^3$; $D=3600 \text{ м/с}$)

У випадку застосування ЕВР рівень переподрібнення породи буде зменшуватися, оскільки тиск на межі «ВР-порода» менше порогового тиску для піщаника, доломіту та граніту. Значення тиску продуктів вибуху ігданіту на межі «ВР-порода» не досягає порогового рівня для усіх типів порід, які застосовували при моделюванні процесу їх навантаження.

Розвиток області стиснення, де саме і відбувається переподрібнення породи навколо зарядної порожнини, триватиме до тих пір, доки тиск ПД не знизиться до межі міцності породи до стиснення.

Параметри зони стиснення при вибуховому навантаженні гірських порід можна описати залежністю:

$$R_{cm} = \left(d \sqrt{\frac{\rho_{вв} \cdot D^2}{8 \cdot \sigma}} \right), \quad (7)$$

де R_{cm} – радіус утвореної зони переподрібнення; d – діаметр ВР у заряді, м; D – швидкість детонації ВР, м/с; $\rho_{вв}$ – густина ВР у заряді, кг/м³; σ – межа міцності порід на стиснення, Па.

З наведеної залежності (7) видно, що на розмір зони переподрібнення в першу чергу впливають початкові параметри заряду, детонаційні властивості ВР та базисні властивості гірської породи.

Обсяг утворення переподрібненої гірської породи при вибуху одного свердловинного заряду можна визначити за формулою:

$$Q_n = \left(d \sqrt{\frac{\rho_{вв} \cdot D^2}{8 \cdot \sigma}} \right) \cdot \pi \cdot \rho_{п} \cdot L_{зар}, \quad (8)$$

де $L_{зар}$ – довжина заряду, м; $\rho_{вв}$ – густина ВР, кг/м³; ρ_n – густина породи, кг/м³; σ – межа міцності порід на стиснення, Па.

За результатами чисельних розрахунків за моделлю (8) було визначено залежність об'єму переподрібненої породи від швидкості детонації ВР.

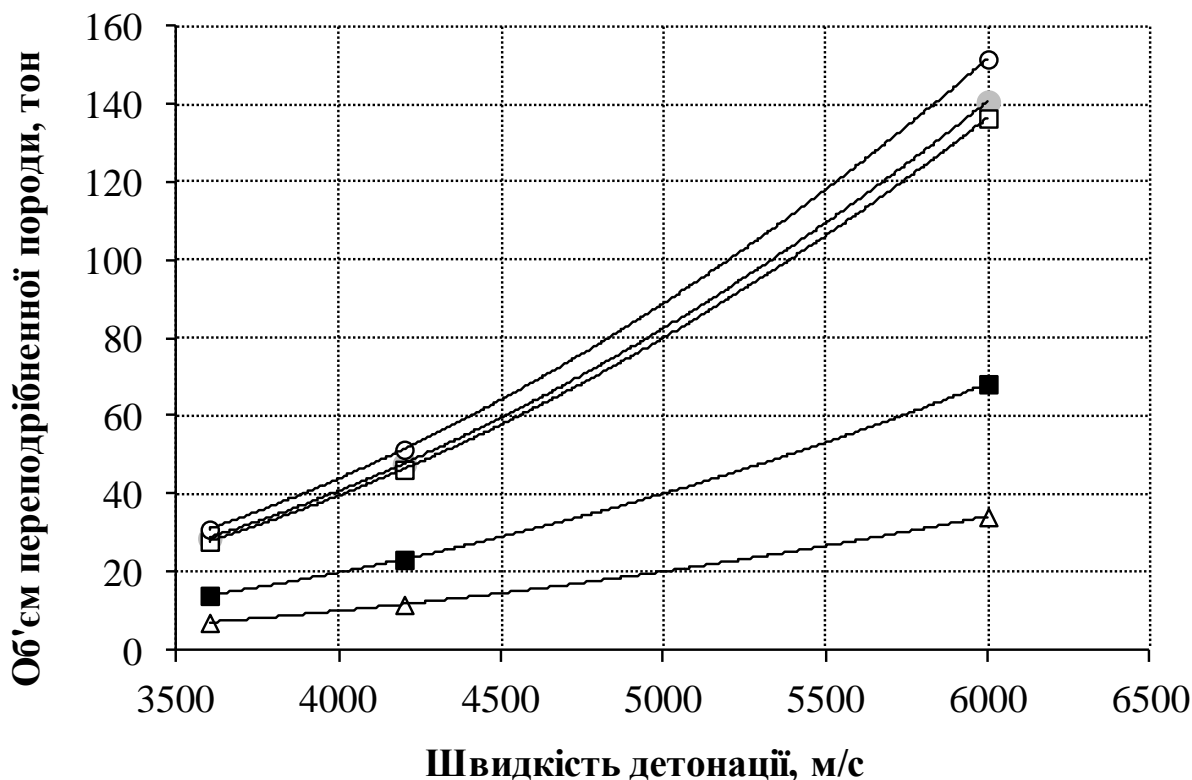


Рис. 3. Залежність об'єму переподрібненої породи в зоні примикання заряду ВР від швидкості його детонації:

● – піщаник; △ – кварц; ○ – доломіт; □ – граніт; ■ – вапняк

За результатами аналізу залежностей, наведених на рис. 3, встановлено, що зі зростанням швидкості детонації об'єм переподрібненої породи зростає за залежністю у вигляді гілки параболи, яку достатньо точно можна описати поліномом другого ступеня. Така залежність пояснюється тим, що швидкість реакції вибухового перетворення та тиск продуктів детонації пов'язані рівнянням (5), та для більшості вибухових речовин її зростання призведе до збільшення тиску у фронті детонаційної хвилі, і як наслідок – до зростання ударного навантаження на породу. Тому очевидним є той факт, що використання ВР з високим початковим детонаційним імпульсом має негативний наслідок, який фактично неминуче призведе до утворення дрібних та ультрадисперсних частинок з мінералів породи у ближній зоні до заряду.

За результатами проведених досліджень встановлено, що переподрібнення породи складає незначну частину зони руйнування, але за витратами енергії в процесі формуванні дрібнодисперсних фракцій ця зона є визначальною стосовно переподрібнення гірської породи [11-14]. При цьому наявність дисипативних втрат енергії вибуху в зоні стиснення породи неминуче впливатиме на масштаб та інтенсивність подальшого процесу формування зони радіального та тангентального тріщиноутворення навколо свердловинного заряду.

Друга фаза починається на деякій відстані від заряду після того, як ударна хвиля переходить в хвилю напруження, яка формує розвиток радіальних і тангенціальних тріщин на відстані від 15 до 20 радіусів заряду. Умови розповсюдження таких тріщин залежать від властивостей ВР та природної тріщинуватості масиву і в цілому впливають на якість вибухопідготовки гірничої маси.

Заключна стадія вибуху, якій відводиться головна роль у руйнуванні середовища, починається після завершення хвильового процесу, коли по наявним природним та новоствореним тріщинам поширюються ПД, за рахунок тиску яких триває розміщення та відділення породи від основного масиву в бік вільної поверхні. При цьому, час впливу ПД на гірську породу має важливе значення при утворенні стискаючої та розтягуючої напруги, від яких залежать параметри руйнування масиву.

Таким чином, відповідно до вищевикладеного, при руйнуванні гірського масиву вибухом свердловинного заряду ВР утворюються декілька специфічних зон руйнування, характеристики яких відрізняються за гранулометричним складом.

Згідно з наведеною на рис. 4 схемою, руйнування гірської породи при вибуху свердловинного заряду протікає в середині складної фігури, що складається з циліндру радіусом зони тріщиноутворення R_{tr} та прилеглої до нього зі сторони недозаряду половини тора, радіус якого приблизно складає $r=0,5 R_{tr}$. При цьому у випадку багаторядного підривання масиву спостерігається не менше чотирьох специфічних деформаційних зон, які відрізняються ступенем рівномірності дроблення гірської породи, а саме:

- I – Зона переподрібнення та дроблення породи;
- II – Зона розміщення порід на окремі природні фрагменти;

III – Зона розміщення порід в області перебуру нижче проектної відмітки уступу;

IV – Зона розкриття природних тріщин та міжблочних зрушень.

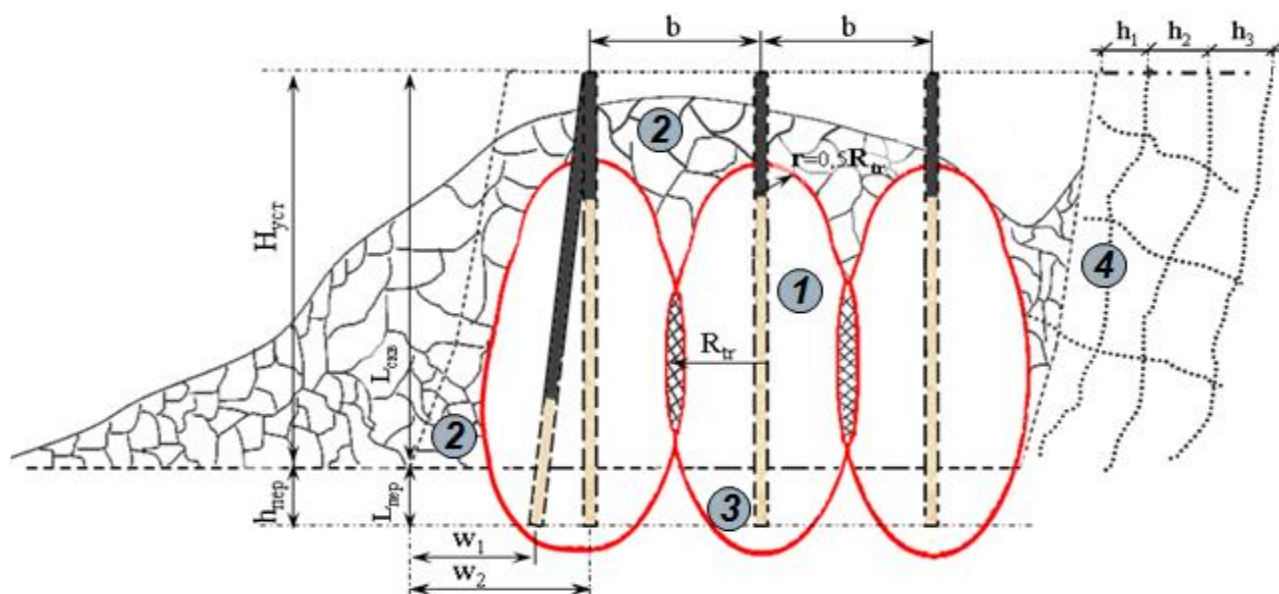


Рис. 4. Схема руйнування масиву гірничих порід по висоті уступу деформаційні зони: I – Зона переподрібнення та дроблення породи; II – Зона розміщення порід на окремі природні фрагменти; III – Зона розміщення порід в області перебуру нижче проектної відмітки уступу; IV – Зона розкриття природних тріщин та міжблочних зрушень

Таким чином гранулометричний склад гірської маси в загальному розвалі є результатом «підсумовування» дисперсних мас з окремих деформаційних зон зруйнованого масиву.

Для аналітичного опису гранулометричного складу дисперсних систем найчастіше використовують рівняння Розина-Рамлера [14]:

$$R = 100 \cdot \exp \cdot (-\alpha \cdot d_{cp}^{\beta}), \quad (9)$$

де R – сумарний вихід фракцій необхідної кондиції, %; d_{cp} – розмір середнього куску; α та β – постійні числові коефіцієнти.

Однак, враховуючи нерівномірність гірничої маси за гранулометричним складом, що змінюється зі зміною відстані від свердловинного заряду, авторами роботи [15] запропоновано визначати гранулометричний склад за формулою:

$$R = 100 \cdot \exp \left[- (1.2 + 1.5 \cdot d_k) \cdot \left[\frac{d_{cp}}{d_k} - \delta + \left[\frac{d_{cp} - \delta}{d_k} \right]^{(9.11 \cdot d_k \cdot \exp(-1.12 \cdot d_k))} \right] \right] \quad (10)$$

Чисельне вирішення рівняння (10) представлено на рис. 5.

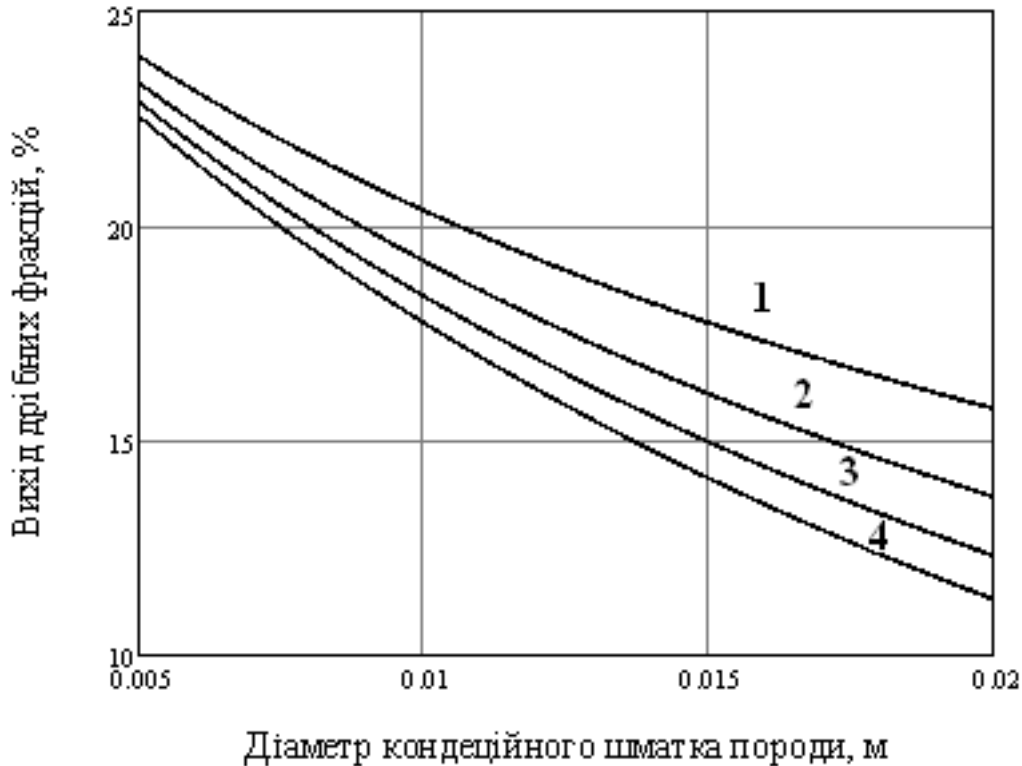


Рис. 5. Залежність виходу дрібних фракцій від діаметру середнього шматка породи (d_k): 1 – при $d_{cp}=0,2$ м; 2 – при $d_{cp}=0,22$ м; 3 – при $d_{cp}=0,3$ м; 4 – при $d_{cp}=0,35$ м

З урахуванням цього інтегральний вихід негабаритних фракцій можливо визначити з рівняння:

$$B_n = 100 \cdot \left(1 - \exp \left[- (1.2 + 1.5 \cdot d_k) \cdot \left(\frac{d_{cp}}{d_k} - \delta + \left| \frac{d_{cp} - \delta}{d_k} \right| \right)^{(9.11 \cdot d_k \cdot \exp(-1.12 \cdot d_k))} \right] \right) \quad (11)$$

Чисельне вирішення рівняння (11) представлено на рис. 6.

Виходячи з приведених на рис. 5 та 6 залежностей, є очевидним, що діаметр середнього куска і гранулометричний склад зруйнованої вибухом породи кількісно взаємозв'язані. При цьому існує тісний кількісний взаємозв'язок між рівномірністю дроблення зруйнованого масиву і рівномірністю розподілу негабаритних та інших фракцій.

Наявність таких зон в розвалі гірничої маси може призвести до утворення зон неконтрольованого дроблення і як наслідок – до зниження не тільки якості вибухопідготовки, але і до утворення дрібних та ультрадрібних фракцій, що є негативним чинником.

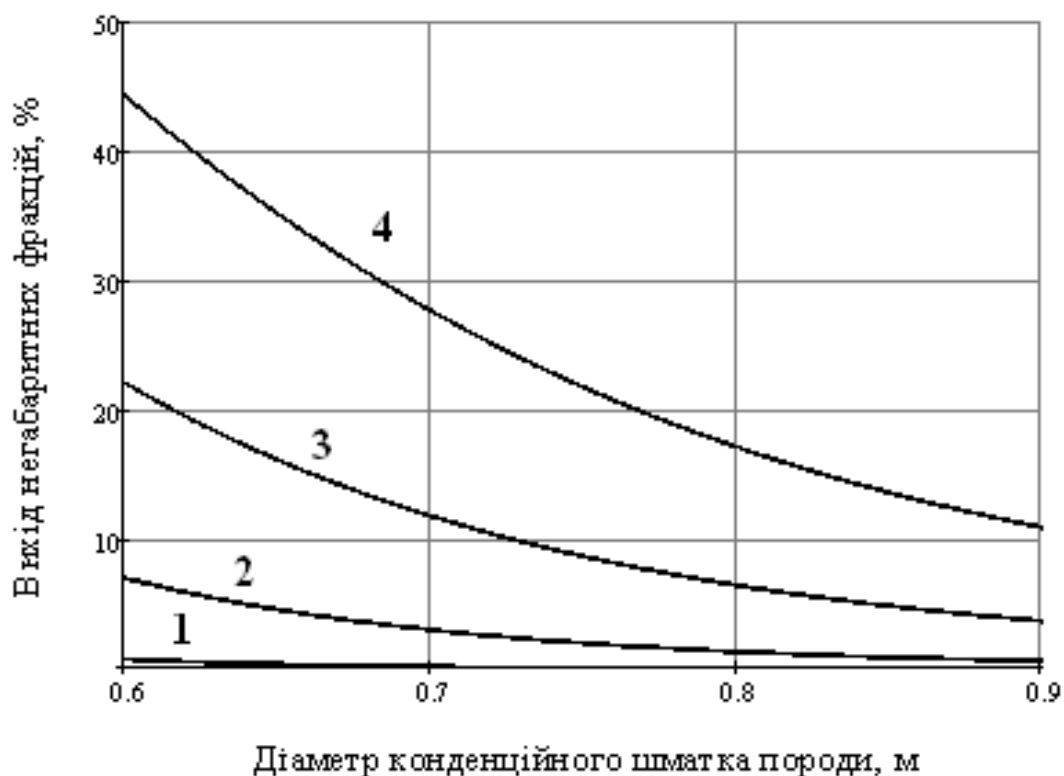


Рис. 6. Залежність виходу негабаритних фракцій від діаметру кондиційного шматка породи (d_k): (d_k): 1 – при $d_{cp}=0,2$ м; 2 – при $d_{cp}=0,22$ м; 3 – при $d_{cp}=0,3$ м; 4 – при $d_{cp}=0,35$ м;

З урахуванням встановлених механізмів руйнування масивів гірських порід та особливостей розподілу зон руйнування за дисперсним складом можна виділити дві основні зони руйнування:

1. Область регульованого дроблення, де інтенсивність руйнування породи можна змінювати шляхом регулювання параметрів вибухового навантаження. Отже – певною мірою впливати на ступінь переподрібнення та зокрема зменшувати утворення тонкої і ультратонкої фракцій матеріалу, що дробиться, і відповідно підвищувати рівень екологічної безпеки вибухових робіт за пиловим чинником.

2. Область мало або практично нерегульованого дроблення, в якій руйнування відбувається внаслідок механічних зіткнень.

Руйнування порід залежить від ряду факторів, таких як: ширина та спрямованість тріщин в масиві, розміри відділення та наявності в них мікродефектів, параметри буропідричних робіт (БПР) та інших факторів, що не підлягають регулюванню.

На основі теоретично виявлених механізмів та особливостей розподілу зон руйнування за дисперсним складом виконувалась розробка заходів щодо підвищення рівня екологічної безпеки БПР. Основні параметри ведення БПР при проведенні серії експериментальних вибухів наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристика основних параметрів БПР

Найменування параметрів	Номер експериментального вибуху				
	1	2	3	4	5
Висота уступу, м	11,5±0,5	11,5±0,5	12,5±0,5	12,5±0,5	11,5±0,5
Довжина свердловин, м	13,5±0,5	13,5±0,5	14,5±0,5	14,5±0,5	13,5±0,5
Довжина забійки, м	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Кількість свердловин, шт					
- основних	51	89	67	78	68
- контурних	0	58	56	0	34
Відстань між свердловинами, м	3,0	3,2	3,4	3,0	3,2
Відстань між рядами свердловинами, м	3,0	3,0	3,4	3,0	3,1
Обсяг ВР, кг:					
- ЕВР марки «ЕРА»-III н	7295	14800	7040	0,0	0,0
-ЕВР марки «ЕРА»-III Ø90 мм	304,5	919,3	707,6	1160	1067
- ЕВР марки «ЕРА»-III Ø70 мм	52,2	0,0	0,0	0,0	61,2
- ЕВР марки «ЕРА»-III Ø40 мм	0,0	527,4	454,8	93,6	285,6
- Грануліт ПК-1 (Ігданіт)	850	950	2800	12110	8300
Питома витрата ВР, кг/м ³	1,47	1,18	1,21	1,17	0,98

Для оцінки якості вибухопідготовки після кожного експериментального вибуху виконували вимір гранулометричного складу на поверхні розвалу гірничої маси з використанням фотопланометричного методу. Отримані по кожному вибуху фотопланіграми аналізували за допомогою системи аналізу гранулометричного складу «WipFrag» [16].

Для отримання порівняльної характеристики розподілу гранулометричного складу за результатами підсумкового аналізу отриманих фотопланіграм були побудовані експериментальні криві розподілу гранулометричного складу для кожного дослідного вибуху з різним енергонасиченням масиву. Результати такого аналізу наведено на рис. 7.

Аналіз кривих, наведених на рис. 7, показує, що збільшення міжсвердловинних відстаней у діапазоні 3,0-3,4 м та зниження питомих енерговитрат з 1,27 г/см³ до 0,97 г/см³ при проведенні дослідних вибухів №№ 2, 3, 4, 5 не привело до погіршення характеристики зон руйнування гірських порід, а максимальне відхилення величини середнього шматка породи щодо базових параметрів БПР не перевищує 20%. Одночасно, результати дослідних вибухів № 4 та 5 виявили найменший вміст фракцій у розвалі гірської маси найменшого розміру, які дозволила виявити на фотопланіграмі розділова здатність системи «WipFrag». А це свідчить і про відносно менше переподрібнення мінеральної сировини та відповідно менший викид пилу в атмосферу та підвищення рівня екологічної безпеки підричних робіт за пиловим чинником.

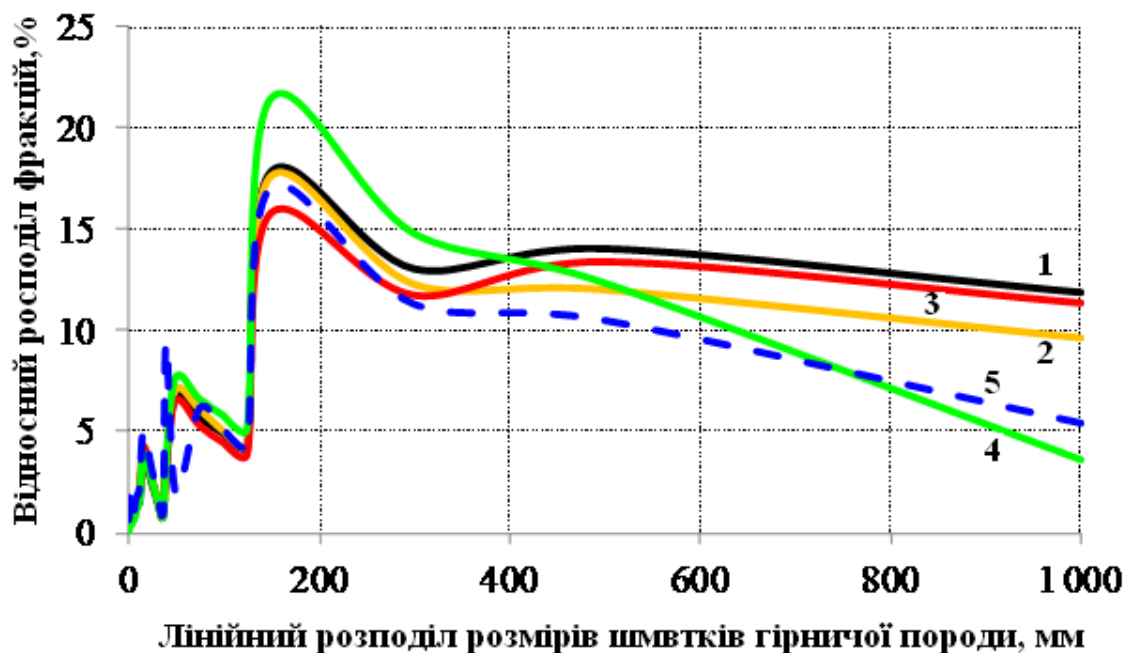


Рис. 7. Розподіл фракцій у розвалі гірської маси після вибуху

Висновки. 1. Показано, що в кар'єрах з видобутку нерудних і будівельних матеріалів найбільш поширеним методом руйнування гірських порід є використання подовжених свердловинних зарядів різних діаметрів і конструкцій. Їх використання дозволяє розподіляти енергію вибуху в масиві та керувати напруженим станом з урахуванням фізико-механічних властивостей гірничих порід, а значить, впливати на ступінь дроблення матеріалів та рівень екологічної безпеки підричних робіт за пиловим чинником.

2. На основі теоретичного аналізу процесу руйнування масиву гірських порід від вибуху заряду ВР виявлені механізми утворення та особливості розподілу зон руйнування за дисперсним складом, що залежать від фізико-механічних властивостей гірських порід, рівня енергонасиченості свердловинних зарядів, часу прикладання навантаження вибухового імпульсу і ударних хвиль. В результаті виділено дві основні зони руйнування, а саме:

- область регульованого дроблення, де інтенсивність руйнування породи можна змінювати шляхом регулювання параметрів вибухового навантаження, отже певною мірою впливати на ступінь переподрібнення та зокрема, зменшувати утворення тонкої і ультратонкої фракцій матеріалу, що дробиться, а відповідно підвищити рівень екологічної безпеки вибухових робіт за пиловим чинником;

- область мало або практично нерегульованого дроблення, в якій руйнування відбувається внаслідок механічних зіткнень уламків породи.

На обсяги встановлених зон також впливає ширина та спрямованість тріщин в масиві, розмірів відділення та наявності в них мікродфектів, параметрів буропідричних робіт та інших випадкових чинників, що не підлягають регулюванню.

3. Виконано експериментальну перевірку підвищення рівня екологічної

безпеки БПР шляхом оцінювання якості вибухопідготовки за гранулометричним складом гірської маси у її розвалі після дослідних вибухів з різними параметрами. Аналіз отриманих кривих гранулометричного складу виявив, що збільшення міжсвердловинних відстаней у діапазоні 3,0-3,4 м та зниження питомих енерговитрат з 1,27 г/см³ до 0,97 г/см³ при проведенні 4-х дослідних вибухів з 5-ти не привело до погіршення характеристик зон руйнування гірських порід, а максимальне відхилення величини середнього шматка породи щодо базових параметрів БПР не перевищувало 20%. Одночасно, результати 2-х дослідних вибухів виявили найменший вміст фракцій у розвалі гірської маси мінімального розміру, що дозволила виявити на фотопланіграмі розділова здатність системи «WipFrag». А це свідчить і про відносно менше переподрібнення мінеральної сировини та менший викид пилу в атмосферу з відповідним підвищення рівня екологічної безпеки підривних робіт за пиловим чинником.

Перелік посилань

1. Ефремов, Э.И., Никифорова, В.А., & Ищенко, К.С. (2008). Способы взрывной отбойки горных пород удлинёнными зарядами переменного сечения. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва : науково-виробничий журнал*. 1. 7–15.
2. Ефремов, Э.И., & Никифорова, В.А. (2008). Влияние конструкции заряда и уровня обводненности горных пород на интенсивность их дробления. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2. 7–13.
3. Кісель, О.О., & Кісель, А.В. (2011). Аналіз впливу схем розташування вибухових свердловин на ефективність ведення буровибухових робіт при видобуванні булощебеневої сировини. *Вісник ЖДТУ*. 1(56). 109–114.
4. Гуменнік, І.Л., & Стрілець, О.П. (2009). Вплив діаметра свердловинних зарядів на якість вибухового руйнування гірських порід в умовах переходу від штатних гранульованих на емульсійні вибухові речовини. *Вісник КДПУ*. 6(59). Ч. 1. 155–158.
5. Прохода, О.В., Абессонов, И.Г., & Коростелев, М.Н. (2008). Опыт проведения взрывных работ, обеспечивающих уменьшение выхода отсева на гранитных карьерах. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва : науково-виробничий журнал*, 1, 57-61.
6. Холоденко, Т.Ф. Колесник, В.Е., & Павличенко, А.В. (2016). Влияние «внутренних» (рецептурных) особенностей эмульсионных взрывчатых веществ на эмиссию загрязняющих веществ в продуктах взрыва в атмосфере. *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць*, 131. 121-132.
7. Хоменко, О.Е., Кононенко, М.Н., Миронова, И.Г., & Юрченко, К.О. (2017). Пути снижения техногенной нагрузки на горнодобывающие регионы Украины. *Збірник наукових праць НГУ*, (51), 77-83.
8. Долгова, Т.И., Юрченко, А.А., & Павличенко, А.В. (2014). Исследование влияния параметров скважинных зарядов на экологическую безопасность массовых взрывов в карьерах. *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць*, 118, 212-221.
9. Зберовский, А.В. (1997). *Охрана атмосферы в экосистеме «карьер-окружающая среда-человек»*. РИО АП ДКТ.
10. Крысин, Р.С. & Новинский, В.В. (2006). *Модели взрывного дробления горных пород*. АРТ-Пресс.
11. Кириченко, А.Л., Устименко, Е.Б., Шиман, Л.Н., & Политов, В.В. (2012). Исследование детонационных характеристик шпуровых зарядов патронированных ЭВВ. *Науковий вісник НГУ*, 6(132). 37–41.
12. Соколев, В.В., & Кириченко, А.Л. (2014). Метод построения ударных адиабат и численный

анализ ударного сжатия горных пород. *X Междунар. наук.-техн. конф. «Разработка, использование и экологическая безопасность современных гранулированных и эмульсионных взрывчатых веществ»*, Кошице 2-9 февраля 20014 г., 12-16.

13. Устименко, Е.Б., Шиман, Л.Н., & Холоденко, Т.Ф. (2010). К вопросу воздействия на окружающую среду эмульсионных взрывчатых веществ с продуктами переработки твердых ракетных топлив при взрывных работах. *Науковий вісник НГУ*, 4, 35-40.
14. Барон, Л.И., & Сыротюк, Г.Н. (1967). Проверка применимости уравнения Розина-Рамлера для исчисления диаметра среднего куска при взрывной отбойке горных пород. *Взрывное дело*, 62/19. 11–12.
15. Барон, Л.И., & Сыротюк, Г.Н. (1969). Исследование критериев оценки гранулометрического состава породы при взрыве. *Взрывное дело*, 67/24, 55–69.
16. Afeni T.B., Okeleye E.O. (2020). Microsoft paint imaging system – a photogrammetric approach to fragmentation measurement in rock and aggregate production. *Mining of Mineral Deposits*, 14(3). 15-20.
<https://doi.org/10.33271/mining14.03.015>

АННОТАЦИЯ

Цель. Повышение уровня экологической безопасности взрывных работ в карьерах по добыче нерудных и строительных материалов на основе их рационального взрывного дробления, направленного на снижение эффекта переизмельчения, что сопровождается образованием тонких фракций материалов и значительными выбросами пыли в атмосферу.

Методика исследования предусматривала теоретический анализ процессов разрушения массивов горных пород скважинными зарядами взрывчатых веществ (ВВ) на основе расчетов ударных адиабат взрывной волны в породах при разной скорости детонации ВВ. Экспериментальная проверка выявленных закономерностей выполнена путем оценки качества взрывоподготовки по гранулометрическому составу породы в развале.

Результаты исследования. Решена научно-практическая задача обеспечения рационального взрывного дробления материалов в карьерах с применением удлиненных скважинных зарядов. Установлены механизмы разрушения массивов горных пород и особенности распределения зон разрушения по дисперсному составу, что способствует снижению выбросов пыли в атмосферу до приемлемого уровня экологической безопасности взрывных работ в карьерах. Приведены сравнительные оценки ударной нагрузки при взрыве заряда ВВ для основных горных пород при различном уровне скорости детонации зарядов. Установлена зависимость объема переизмельченной породы в зоне ее примыкания к заряду от скорости детонации ВВ. Выполнена экспериментальная проверка выявленных закономерностей в условиях действующего карьера путем оценки качества взрывных работ по гранулометрическому составу горной массы в развале после экспериментальных взрывов с различными параметрами.

Научная новизна. Путем расчетного определения параметров ударных адиабат взрывной волны в разных породах и при различных скоростях детонации ВВ исследован многофазовый процесс разрушения пород взрывом. Показано, что при разрушении горного массива взрывом удлиненного скважинного заряда ВВ образуется несколько специфических зон разрушения, характеристики которых отличаются по гранулометрическому составу. Выделены области регулируемого дробления, где интенсивность разрушения породы можно изменять путем регулирования параметров взрывной нагрузки и области мало или практически нерегулируемого дробления. Обоснована возможность управления процессом пылеобразования и соответственно уровнем экологической безопасности взрывных работ в карьерах по добыче нерудных и строительных материалов.

Практическое значение. Выявленные закономерности и положения по уменьшению эффекта переизмельчения минерального сырья использованы при разработке мероприятий по повышению уровня экологической безопасности взрывных работ в условиях карьера, что, в частности, предусматривало увеличение межскважинных расстояний в диапазоне до 3,0-3,4 м и снижение удельных энергозатрат с 1,27 г/см³ до 0,97 г/см³.

Ключевые слова: *экологическая безопасность взрывных работ в карьерах; взрывное дробление минерального сырья; гранулометрический состав горной породы в развале*

ABSTRACT

Purpose. Improving the environmental safety of blasting operations in quarries for the extraction of non-metallic and construction materials based on their rational explosive crushing, aimed at reducing the effect of overgrinding, accompanied by the formation of fine fractions of materials and significant dust emissions.

The research methodology provided a theoretical analysis of the destruction processes of a rock massif by well charges of explosives on the basis of calculations of shock adiabats of an explosive wave in rocks at different speeds of detonation of explosives. Experimental verification of the identified patterns was performed by assessing the quality of blasting by the particle size distribution of the rock in the collapse.

Research results. The scientific and practical task of ensuring rational explosive crushing of materials in quarries with the use of elongated borehole charges has been solved. Mechanisms for the destruction of rock massifs and the peculiarities of the distribution of destruction zones by dispersed composition have been established, which contributes to the reduction of dust emissions into the atmosphere to an acceptable level of environmental safety of blasting operations in quarries. Comparative estimates of the shock load during the explosion of the explosive charge for the main rocks at different levels of the rate of detonation of charges are given. The dependence of the volume of overgrinding rock in the zone of its adjacency to the charge on the detonation velocity of explosives has been established. An experimental verification of the identified patterns in the current quarry by assessing the quality of blasting by the particle size distribution of rock mass in its collapse after experimental explosions with different parameters is done.

Scientific novelty. The multiphase process of rock destruction by explosion was investigated by the calculated determination of the parameters of the shock adiabats of the blast wave in different rocks and at different detonation velocities of explosives. It is shown that during the destruction of a rock mass by the explosion of an elongated borehole charge of explosives, several specific zones of destruction are formed, the characteristics of which differ in particle size distribution.

The area of controlled crushing is highlighted, where the intensity of rock destruction can be changed by adjusting the parameters of the explosive load and the area of little or almost unregulated crushing. The possibility of managing the process of dust formation and, accordingly, the level of environmental safety of blasting works in quarries for the extraction of non-metallic and construction materials is substantiated.

Practical meaning. The identified patterns and provisions to reduce the effect of mineral overgrinding were used in the development of measures to improve the environmental safety of blasting in the quarry, which, in particular, provided an increase in well spacing in the range up to 3.0-3.4 m and reduce specific energy consumption from 1.27 g/cm³ to 0.97 g/cm³.

Keywords: *ecological safety of blasting works in quarries; explosive crushing of mineral raw materials; particle size distribution of rock in the collapse.*