

УДК 622.235.5:622.235.527

Сучасні проблеми руйнування гірських порід вибухом

Калякін С. О., Лабінський К. М.

Донецький національний технічний університет, Донецьк, Україна

Анотація

У статті викладені основні проблеми, що виникають при моделюванні результатів дії вибуху заряду ВР у гірських породах і оцінки критичних умов при описі їхнього нестійкого стану в процесі руйнування й викиду.

Будівництво шахт і підземних споруд пов'язане з руйнуванням гірських порід. Проблема руйнування гірського масиву була й залишається однією з найважливіших проблем гірничого виробництва. Технічні можливості руйнування гірських порід визначають його ефективність. Відкриття підривних методів руйнування зробило революцію в гірничій справі й дозволило досягти практично необмежених можливостей гірничого виробництва. Розвиток науки й технології застосування вибуху в гірській промисловості пов'язаний з рішенням цілого комплексу проблем, пов'язаних з уявленнями про підривні явища й фізику підривного руйнування гірських порід.

Аналіз останніх досліджень у цій області показав, що процес підривного дроблення гірської породи залежить від великої кількості факторів, зв'язаних як із властивостями вибухової речовини (ВР) – джерела руйнуючої енергії, так і із властивостями самого середовища, що руйнується. Проблеми механіки підривного дроблення гірських порід тісно пов'язані з фізикою руйнування твердого тіла й фізикою вибуху в суцільному середовищі. Прийшов час фундаментальних досліджень, які дозволять установити механізм руйнування й вибрати спосіб керування цим механізмом. Це дасть можливість обґрунтувати ефективні параметри підривних робіт для реалізації руйнування, внаслідок оптимізації процесу передачі енергії вибуху гірським породам і створення в них позамежного динамічно нестійкого стану, достатнього для руйнування й переміщення.

Метою статті є дослідження механізму імпульсної дії підривного навантаження на гірські породи й установлення в них критичної енергощільності при динамічній деформації й необхідного для цього часу руйнування.

У розробці основ геомеханіки підземного вибуху, запропонованої професором Г. Г. Літвінським у роботах [1, 2], не досить обґрунтований підхід в оцінці урахування динамічної фази дії вибуху на процес руйнування гірських порід. По-перше тому, що не можна оцінити руйнуючу дію ударної хвилі в гірській породі тільки за величиною її амплітуди, а по-друге, не враховується такий важливий параметр при руйнуванні твердого тіла як час руйнування породи або її довговічність [3]. У результаті виходить, що ігнорується залежність міцності порід у часі, що, як відомо, визначається динамічною міцністю твердих тіл і не приймається в увагу підготовчий процес деформацій і руйнувань, обумовлених інкубаційним періодом часу, пов'язаним з дією імпульсного розривного навантаження на кристалічну структуру твердого тіла її перебудовою й ділатанцією.

У випадку дії імпульсного підривного навантаження на оточуючі заряд ВР гірські породи період часу, необхідний для їхнього руйнування, можна визначити з вираження:

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(t) dt \geq [\sigma_n] \cdot \tau, \quad (1)$$

де $\sigma(t)$ – залежність напруг від часу дії вибуху (t) – ударної хвилі й продуктів детонації ВР у місці розриву породи;

$[\sigma_n]$ – межа міцності породи на розрив;

τ – довговічність породи.

Довговічність кристалічної структури порід розуміється як час між моментами приложення навантаження і її розривом:

$$\tau = \tau_0 \exp \left[\frac{E_0 - V_y [\sigma] N_A}{kT} \right], \quad (2)$$

де τ_0 – частота коливань атомів кристалічної решітки твердого тіла, $\tau_0 = 10^{13}$ с;

k – постійна Больцмана, $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/°С;

V_y – питомий обсяг одиниці маси речовини, м³/кг;

E_0 – енергія зв'язку між атомами в кристалічних решітках речовини, Дж/кг;

$[\sigma]$ – величина напруг, що виникають при деформації твердого тіла, Па.

T – температура, К;

N_A – кількість молекул в одиниці маси, кг/моль.

Рівняння (1) і (2) показують, що довговічність породи при її навантаженні розривною дією вибуху залежить від величини параметрів ударної хвилі й температури породи, а період часу, протягом якого порода під дією вибуху досягає позамежного динамічно нестійкого стану, повністю визначається величиною імпульсу вибуху. Згідно роботи [4], зміна величини імпульсу вибуху заряду ВР, що діє на породи, що оточують його, пропорційна радіусу їхнього руйнування. Тоді, беручи до уваги зроблений висновок, можна одержати радіус руйнування породи під дією вибуху з наступного рівняння:

$$I_{BB} = \int_0^t P(t) dt = \int_0^t P(t) d \left(\frac{R_p}{D_n} \right), \quad (3)$$

де $P(t)$ – тиск у фронті ударної хвилі, що діє на гірську породу;

R_p – радіус руйнування породи;

D_n – швидкість ударної хвилі в породі;

I_{BB} – імпульс вибуху заряду ВР.

Відповідно до рівнянь (1) і (2) можна одержати початкові й кінцеві умови для рівняння (3), що визначає радіус руйнуючої дії вибуху.

Так, для початкових умов на границі розділу «ВР–порода» одержимо:

$$\text{при } t = 0, P(t) = \frac{64}{27} P_H, \quad (4)$$

де P_H – тиск у фронті детонаційної хвилі.

Граничні умови, характерні для кінцевих умов на границі руйнування порід ударною хвилею, визначаються в наступному виді:

$$\text{при } t = \tau, P(t) = \sigma(t) = [\sigma_n]. \quad (5)$$

Тоді максимальний радіус руйнування порід вибухом R з рівняння (3) визначається наступним рівнянням:

$$R_p = \left(\frac{I_{BB} D_n}{[\sigma_n]} \right)^{1/3}. \quad (6)$$

У широкому діапазоні амплітуд ударних хвиль у гірських породах залежність між швидкістю ударного фронту – D_n і масовою швидкістю речовини за фронтом – U (щодо необуреної речовини) є лінійною:

$$D = A + BU, \quad (7)$$

де A і B – емпіричні коефіцієнти, отримані в результаті експерименту.

Початкова швидкість речовини за фронтом ударної хвилі на границі розділу «ВР – гірська порода» знаходиться з рівняння [5]:

$$U = \frac{-(\rho_n A + \rho_{BB} D_{BB}) + \sqrt{(\rho_n A + \rho_{BB} D_{BB})^2 + 8B\rho_n P_H}}{2\rho_n B}, \quad (8)$$

де ρ_n, ρ_{BB} – щільність породи й заряду ВР відповідно;

D_{BB} – швидкість детонації ВР.

Межа міцності породи на розрив за фронтом ударної хвилі визначається межею тиску за фронтом, що для критичних умов (5) може бути визначено за рівнянням:

$$\Delta P_{\phi} = [\sigma_n] = \rho_n D_n U_{кр}, \quad (9)$$

де $U_{кр}$ – критична швидкість потоку речовини за фронтом ударної хвилі, при якому відбувається механічний розрив цілісності твердого тіла.

Перетворимо рівняння (6) з урахуванням рівнянь (7), (8), (9) до остаточного виду:

$$R_p = \left(\frac{8 \cdot 4 \cdot \pi \rho_{ВВ} r_3^3 D_{ВВ}}{3 \cdot 27 \rho_n U_{кр}} \right)^{1/3},$$

або

$$\frac{R_p}{r_3} = 1,0745 \left(\frac{\rho_{ВВ} D_{ВВ}}{\rho_n U_{кр}} \right)^{1/3}, \quad (10)$$

де r_3 – радіус сферичного заряду ВР.

Рівняння (10) включає три параметри, які надійно визначаються експериментальними методами. Критична швидкість відриву породи за фронтом ударної хвилі може бути теж визначена, якщо відомо рівняння (7) ударної адіабати й межа міцності породи на розтягання або розрив. Статистичний аналіз великої кількості гірських порід показує, що між опором стиску ($\sigma_{сж}$) і опором розтягання (σ_p) існує досить сильний кореляційний зв'язок. У роботі [6]

установлено, що відношення $\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} \approx 10$. Таким чином, можна припускати, що межа міцності на розтягання гірських порід приблизно в 10 разів менше їхньої межі міцності на стиск. За експериментальними даними [7] отримані рівняння ударних адіабат для вапняку (Calcite, Marble) і доломіту й по рівнянню (9) визначені $U_{кр}$. Виявилось, що критична швидкість відриву для цих гірських порід дорівнює: для вапняків $U_{кр} \approx 1,00..1,25$ м/с; для доломіту $U_{кр} \approx 1,00$ м/с. Цей результат перебуває в гарній згоді з визначенням критичної швидкості відриву для викидонебезпечних піщаників, отриманий Е. О. Мінделі зі співробітниками [8]. Тепер звернемося до експерименту.

На доломітному кар'єрі в товстих пластах вапняку з міцністю породи $f=12$, $\rho_n=2700$ кг/м³ і $U_{кр}=1,25$ м/с пробурили вертикальні шпури глибиною $H_0=0,4$ м і діаметром 40 мм. В цих шпурах підірвали зосереджені заряди з різних ВР масою 0,4 кг. Щільність ВР в цих зарядах становила від $\rho_{ВВ}=850$ до $\rho_{ВВ}=1300$ кг/м³, швидкість детонації в зарядах на повний перетин шпуру – від $D_{ВВ}=2,60$ до $D_{ВВ}=6,25$ км/сек. Руйнування вапняка після вибуху зосередженого заряду ВР схематично показано на рис. 1, а параметри руйнування зведені в таблицю 1.

Табл. 1. Параметри руйнування вапняку вибухом зосередженого заряду ВР

Найменування ВР	Параметри заряду		r_3 , м	R_p , м	R_6 , м	$R_{p.э.}$, м	$\frac{R_{p.э.}}{R_p}$	$\frac{R_p}{r_3}$	$\rho_{ВВ} D_{ВВ} \cdot 10^{-3}$, кг/м ² с	$\frac{R_{p.э.}}{r_3}$
	$\rho_{ВВ}$, кг/м ³	$D_{ВВ}$, км/с								
Гранулотол	850	3,6	0,0483	0,502	0,533	0,639	1,27	10,401	3060	13,235
Граммоніт 79/21	1000	4,0	0,0457	0,520	0,552	0,656	1,26	11,373	4000	14,350
Грануліт АС-4	950	2,6	0,0465	0,450	0,462	0,582	1,29	9,685	2470	12,511
Гранулотол (в воде)	1300	6,0	0,0419	0,595	0,790	0,867	1,46	14,208	7800	20,711
Аммоніт №6 ЖВ	1000	4,6	0,0457	0,545	0,620	0,714	1,31	11,915	4600	15,623
Порошковий тротил	1000	5,0	0,0457	0,560	0,670	0,758	1,35	12,251	5000	16,582
Порошковий ТЕН	1100	6,25	0,0443	0,603	0,816	0,890	1,48	13,623	6875	20,104

* – експериментальні дані

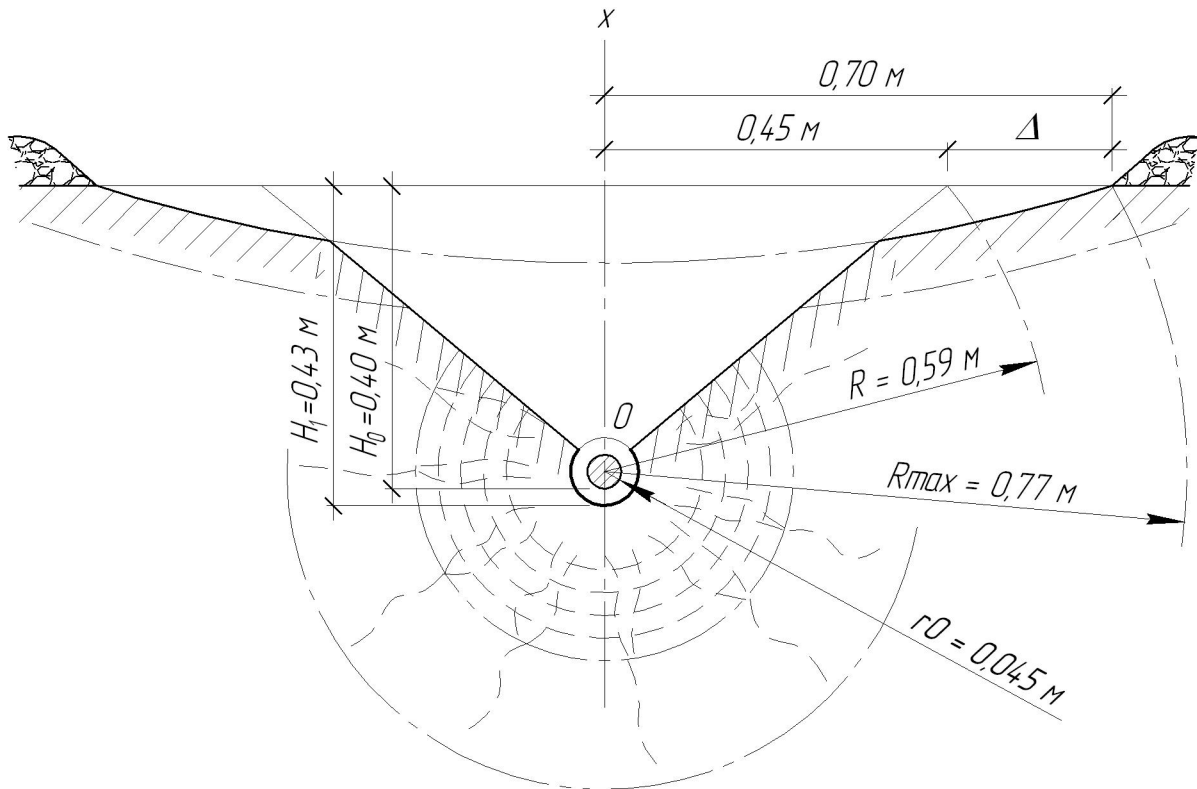


Рис. 1. Дія вибуху заряду амоніта №6 ЖВ у вапняку поруч із відкритою поверхнею

Експеримент показав, що фактично при вибуху заряду ВР поблизу відкритої поверхні радіус руйнування трохи більший (в 1,26..1,48 рази), ніж розрахунковий радіус за рівнянням (10). Це пов'язано з достатньо великим впливом відкритої поверхні на параметри руйнування породи у результаті відображення ударних хвиль від границі розділу середовищ та виникнення ударних хвиль розрідження. Ці хвилі виникають на границі розділу «порода–повітря» та переміщуються до центру вибуху заряду ВР, підсилюючи руйнуючу дію вибуху в результаті виникнення відкольних явищ в ударношкатуній породі.

Аналіз залежності відношення розрахункового радіусу руйнування до радіусу сферичного заряду $\frac{R_p}{r_s}$ від акустичної жорсткості продуктів детонації $\rho_{ВВ}D_{ВВ}$ дозволив встановити між ними стіпінєву залежність (рис. 2). Достатньо добре також корелюють й величини $\frac{R_{p,з.}}{r_s}$ и $\rho_{ВВ}D_{ВВ}$, отримані за допомогою експериментальних даних.

Демо обґрунтування цьому факту з позицій відбиття імпульсу стискаючої напруги від вільного кінця ударностиснутої породи.

Подібне завдання вирішене в роботі [9]. Припускаємо, що вісь Ох направлена від центру заряду уздовж лінії найменшого опору (л.н.о.) дії вибуху в напрямку до вільної поверхні ($x > 0$). Падаючий імпульс, що діє у вигляді напруг на породи уздовж л.н.с. дорівнює:

$$\sigma_- = -P \left(1 - \frac{ct+x}{ct_i} \right) [H(ct+x) - (ct+x-ct_i)],$$

- де P – амплітуда імпульсу вибуху;
 t_i – тривалість імпульсу;
 $H(t)$ – функція Хевисайда;
 c – максимальна швидкість хвиль у породі.

Відбитий від границі розділу імпульс у вигляді напруг:

$$\sigma_+ = +P \left(1 - \frac{ct+x}{ct_i} \right) [H(ct-x) - (ct-x-ct_i)].$$

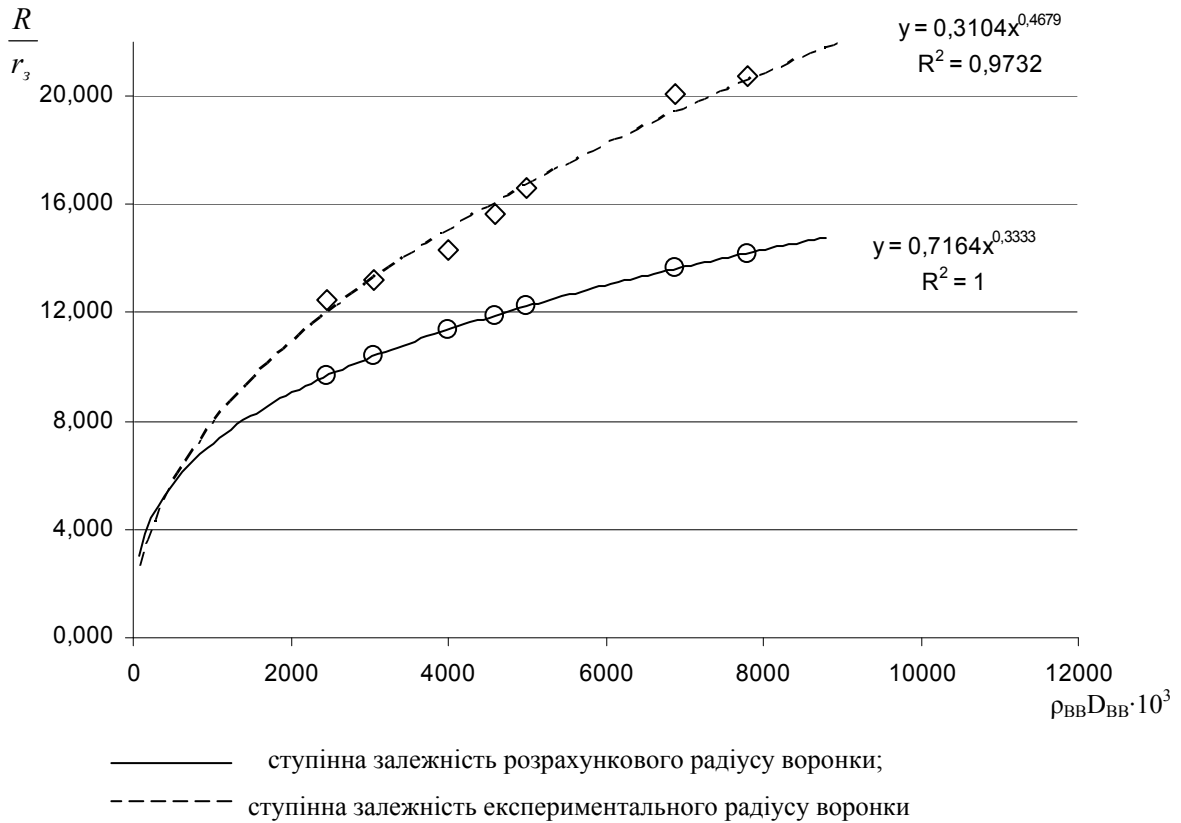


Рис. 2. Залежність відносного радіусу руйнування гірського масиву від акустичної жорсткості продуктів детонації ВР

При цьому сумарна напруга виражається як $\sigma = \sigma_- + \sigma_+$. Тоді з урахуванням рівняння (1) визначення руйнуючої амплітуди зводиться до відшукування руйнуючого імпульсу заданої тривалості й мінімальної амплітуди. Мінімальна для заданої тривалості t_i руйнуюча амплітуда $P(t_i)$ визначається з умов:

$$\frac{\max I}{t} = [\sigma_n], \quad I = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t P(t_i) dt \quad (11)$$

Залежність міцності порід від тривалості їх імпульсного навантаження з урахуванням умов по рівнянню (11) має такий вигляд:

$$P(t_i) = \begin{cases} \frac{2[\sigma_n]\tau}{t_i}, & \text{при } t_i \leq \tau \\ \frac{[\sigma_n]}{1 - \frac{\tau}{2t_i}}, & \text{при } t_i \geq \tau \end{cases} \quad (12)$$

Цілком зрозуміло, що необхідною умовою руйнування породи є:

$$\frac{P(t_i)}{[\sigma_n]} \geq 1,$$

тоді $\frac{2\tau}{t_i} \geq 1$ для першого випадку й $1 - \frac{\tau}{2t_i} \leq 1$ для другого. Із цього треба, що збільшення

часу дії імпульсу вибуху на породи, що руйнуються, може впливати на масштаби їхнього руйнування. Так, у випадку відбиття ударних хвиль від вільної поверхні загальний час імпульсу, що діє на гірські породи при вибуху, зростає, а це знижує межу міцності породи на відрив за рахунок зміни її інкубаційного часу, необхідного для руйнування (довговічності).

У результаті викладеного вимальовується наступний механізм руйнування гірських порід вибухом. Для більш повного розуміння його етапи представлені на рис. 3.

Будемо вважати, що весь розглянутий процес руйнування гірської породи розбитий на чотири окремих етапи.

Перший етап. У зоні близької до підривної камери із продуктами детонації ВР відбувається пластичне витиснення із цієї зони гірських порід, їхнє ущільнення й передача основної частини потенційної енергії продуктів детонації ВР в ударну хвилю. Радіус цієї зони визначається тиском продуктів детонації ВР і межею міцності порід на динамічний стиск.

Другий етап. На відміну від першого етапу, у межах цієї зони гірська порода вважається твердим тендітним середовищем, у якому під дією ударної хвилі виникають дотичні й нормальні напруги, що приводять до її руйнування. Приймається, що фронт руйнування збігається з ударним фронтом і являє собою зону у вигляді концентричних тріщин з мікроблоковим укладанням наночастиць. Тому спочатку роздроблена маса породи впакована дуже щільно й при наступному її розтяганні уздовж осі дії ударної хвилі й продуктів детонації піддається ділатансії (англ. dilatation – розширення), тобто збільшенню обсягу дробленої гірської маси.

Третій етап. Цей етап починається з моменту, коли швидкість фронту руйнування порід стає менше швидкості ударного фронту, у результаті чого встановлюється швидкість руху ділатансіруючої роздробленої породи між ударним фронтом і підривною порожниною. При ділатансійному розпушенні із внутрішнім сухим тертям між частками утворення зони на цьому етапі відбувається не тільки за рахунок ударної хвилі, але й за рахунок ділатансії, руху зруйнованих порід і високошвидкісного проростання радіальних тріщин, у вершинах яких концентрація напруг перевищує межу міцності порід на розрив.

Четвертий етап. Цей етап характеризується поширенням по гірській породі пружних стискаючих хвиль, а при наявності вільної поверхні – хвиль розвантаження, які викликають откольні явища на границі розділу середовищ, додаткове їхнє руйнування й сприяють утворенню потоку, що рухається, зруйнованих порід і продуктів вибуху ВР уздовж лінії найменшого опору.

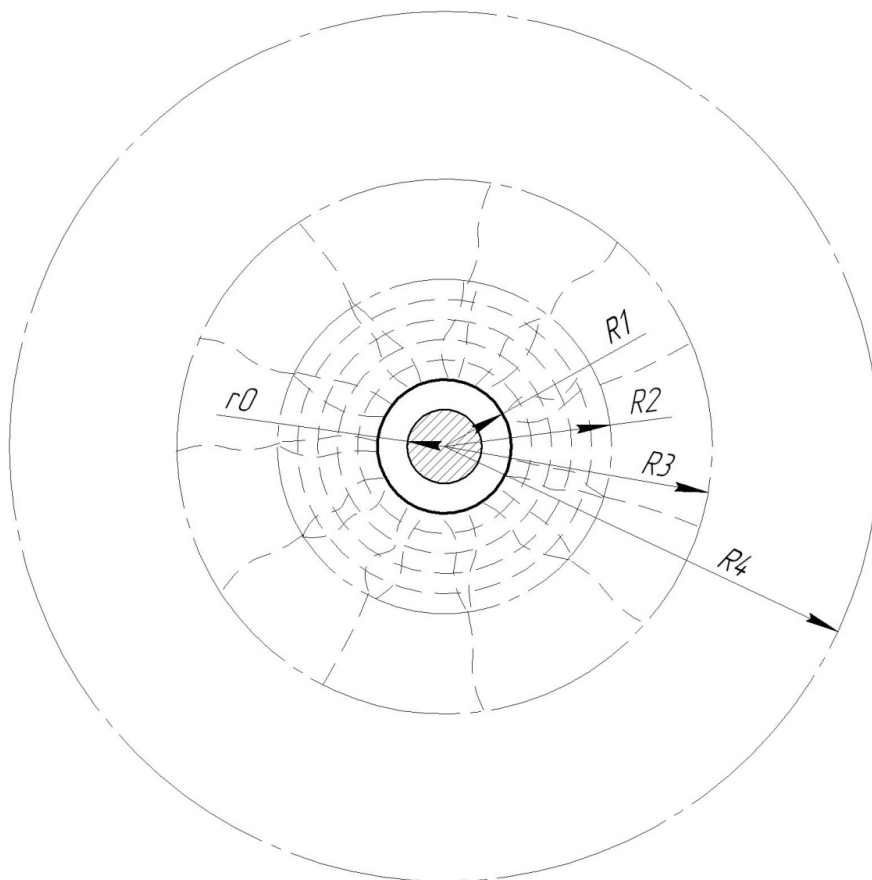


Рис. 3. Дія вибуху заряду ВР у нескінченному гірському масиві
 r_0 – радіус заряду; R_1 – R_4 – радіуси зон

Таким чином, результати досліджень указують на необхідність урахування впливу імпульсу вибуху заряду ВР на механізм переходу гірських порід у нестійкий стан при їхньому руйнуванні й ділатансії, а при наявності вільної поверхні або границі розділу середовищ при підрильних роботах дія откольних ударних хвиль розрядження.

Висновки.

1. Встановлено критичні умови при імпульсному руйнуванні порід, які дозволяють зробити оцінку руйнуючої дії заряду ВР.

2. Отримано залежність, що дозволяє по відомих параметрах детонації заряду ВР і параметрах гірських порід, що визначають їхню динамічну міцність на відрив, розрахувати максимальний радіус руйнування порід сферичним зарядом.

3. Встановлено сильний вплив на розміри порожнини руйнування порід при вибуху заряду ВР вільної поверхні й границі розділу середовища між породою й повітрям.

4. Запропоновано механізм руйнування гірських порід вибухом заряду ВР.

Результати роботи можуть бути використані для формування нової концепції руйнування гірських порід вибухом заряду ВР, необхідної для рішення сучасних проблем підвищення ефективності підрильних робіт.

Бібліографічний список

1. Литвинский Г. Г. К теории взрыва подземного заряда на выброс – диаграмма – квадрат взрыва: материалы международной конференции [«Форум горняков – 2007»], Д.: НГУ, 2007. С. 90–101.
2. Литвинский Г. Г. Методика расчета взрыва заряда на выброс: материалы международной конференции [«Современные проблемы шахтного и подземного строительства»], Вестник. Вып. 7, Донецк: Норд-Пресс, 2006.– С. 117–132.
3. Успехи физических наук // Конференция по механическим свойствам неметаллов / УФН.– т. LXVII.– Вып. 1, 1959.– С. 177–184.
4. Вовк А. А. Основы взрывной проходки подземных выработок / Вовк А. А., Черный Г. И., Смирнов А. Г.– Киев: Наукова Думка, 1966.– 234 с.
5. Калякин С. А. Об уравнении состояния продуктов детонации предохранительных взрывчатых веществ. Сб. «Взрывное дело», №98/55/ Калякин С. А.– М.: ЗАО «МВК по взрывному делу». – С. 242–251.
6. Е.И. Ильницкая Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая и др.– М.: Недра, 1969. – 392 с.
7. Rocks compressibility in shock waves // R. F. Trunin and ag. Izv. Akad. Nauk SSSR. Fiz. Zemli 1, 1988.– р. 52–58.
8. Миндели Э. О. Буровзрывные работы при проведении горных выработок на глубоких горизонтах / Миндели Э. О. // Проблема разрушения горных пород взрывом.– М.: Недра, 1967.– С. 22–27.
9. Петров Ю. В. Температурная зависимость откольной прочности и эффект аномальных температур плавления при ударно-волновом нагружении / Петров Ю. В., Ситникова Е. В. // Журнал технической физики. – Т. 75. – вып. 8, 2005. – С. 71–77.

© Калякін С. О., Лабінський К. М., 2009 г.