

В.В. Перегудов, к.т.н., доц.
Криворізький технічний університет

ВПЛИВ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ НА РОЗПОДІЛ ЕНЕРГІЇ ВИБУХУ В МАСИВІ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ КОРОТКОСПОВІЛЬНеноМУ ПІДРИВАННІ СВЕРДЛОВИННИХ ЗАРЯДІВ

Розглянутий вплив тріщиноутворення на розподіл енергії вибуху в масиві гірських порід. Встановлені інтервали уповільнень між вибухами свердловинних зарядів, що сприяють створенню сприятливих умов для їх ефективної взаємодії.

В процесі ведення гірничих робіт на великих гірничодобувних підприємствах, які ведуть розробку відкритим способом з використанням буровибухових робіт, властивості гірських порід суттєво змінюються, що в повній мірі має відношення до глибоких залізородних кар'єрів України, де масові вибухи є невід'ємною часткою технології видобутку. Внаслідок цього знижується ефективність застосування "класичних" схем багаторядного короткосповільненого підривання і стандартних інтервалів уповільнення між вибухами груп зарядів. Крім того, можливості використання нових засобів неелектричних систем ініціювання дозволяють більш різноманітно варіювати параметрами підривання.

Встановленою вважається істотна роль взаємодії хвиль напружень, яка викликає складний напружений стан масиву, в руйнуванні гірських порід. Ускладнюється цей стан впливом систем тріщин як наявних в масиві до вибухового руйнування, так і тих, що з'являються до закінчення дії продуктів детонації вибухових речовин і перерозподіляють енергію хвиль напружень навколо зарядів. У зв'язку з цим представляє інтерес встановлення впливу тріщиноутворення на розподіл енергії вибуху в масиві гірських порід при короткосповільненому підриванні свердловинних зарядів.

Внаслідок дії тиску продуктів детонації та стисливості гірської породи після утворення фронту хвиль напружень збільшується діаметр вибухової порожнини. При руйнуванні середовища на контакт з продуктами детонації виникають радіальні тріщини. Розвиток системи тріщин призводить до додаткового збільшення напружень в тій частині масиву, що ще не охоплена руйнуванням [1]. При цьому вводиться поняття "еквівалентної величини" діаметра свердловини, рівній діаметру області, охопленої в даний момент радіальними тріщинами. Величина тангенціальних напружень в масиві навколо циліндричного заряду вважається такою, що змінюється за такою залежністю:

$$P = P_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2, \quad (1)$$

де P_0 – напруга незбуреної породи на межі пружної зони;

r_0 – початковий радіус свердловини;

r – відстань від осі заряду.

Розмір "еквівалентної області" збільшується в часі пропорційно швидкості розповсюдження тріщин, і вона служить джерелом додаткового впливу на масив, що необхідно враховувати при енергетичному розрахунку процесу руйнування гірських порід. Прийmemo середовище до початку руйнування ізотропним, пружним, і, відповідно, руйнування в масиві відбувається без пластичних деформацій. Кожний заряд підривається миттєво по всій довжині, що можна практично забезпечити лінійним ініціюванням шланговими зарядами вибухових речовин з високою швидкістю детонації. Спадання тиску на кордоні пружної зони відбувається за відомим законом $P = P_0 \cdot e^{-at}$. Джерелом відбитих хвиль є площина, співпадаюча з вільною поверхнею. Відстань від деякої довільної точки в площині перетину масиву, перпендикулярної осі заряду, до будь-якого заряду визначається як

$$|\vec{r}_i| = |\vec{r} - \vec{r}'_i|, \quad (2)$$

де $|\vec{r}_i|$ – відстань від джерела хвилі напружень до точки;

\vec{r} – радіус-вектор, який визначає положення точки у вибраній системі координат;

\vec{r}'_i – постійні векторні координати джерел хвиль напружень, що визначаються лінією найменшого опору W і відстанню між зарядами a .

Виходячи з того, що руйнування гірських порід відбувається в значній мірі за рахунок розтягуючих напружень, напружений стан середовища визначає енергоємність процесу в основній області впливу на масив. Виняток складає ближня зона вибуху, де загальний потік енергії і саме руйнування середовища визначається кінетичною складовою процесу. За відсутності в масиві внутрішніх джерел енергії і малої теплопередачі для частини потоку, зумовленого напруженим станом середовища [2], кількість енергії, що протікає через одиничну площу в одиницю часу на заданій відстані від осі заряду, дорівнює

$$I_r = -P\vec{u}_r + f(\varphi, z), \tag{3}$$

де I_r – потік енергії в радіальному напрямленні;
 P – тангенціальні складаючі тензора напружень;
 \vec{u}_r – масова швидкість часток середовища.

При дії декількох зарядів енергія, що накопичується в даній точці простору, може бути отримана як сума потоків від джерел, які вносяться прямими і відбитими хвилями.

Згідно з законом спадання тиску на межі пружної зони та врахування швидкості тріщин v_T тангенціальні напруження та масові швидкості в точці на деякій відстані r_i від осі будь-якого заряду при швидкості звука в середовищі c висловимо у вигляді:

$$P_{Qi} = (P_0/r_i^2)(r_0 + v_T \cdot t)^2 \cdot e^{-a\left(t - \frac{r_i - r_0}{c}\right)};$$

$$\vec{u}_i = (\vec{u}_0/r_i)(r_0 + v_T \cdot t) \cdot e^{-a\left(t - \frac{r_i - r_0}{c}\right)}. \tag{4}$$

У наведених виразах (4) індекс i відповідає кожному з розглядуваних джерел хвиль напружень, а самі вирази справедливі при виконанні умови $t > (r_i - r_0)/c$. Відповідні потоки енергії в цій же точці визначаються таким чином:

$$\vec{I}_{ri} = -(P_0 u_0 / r_i^3)(r_0 + v_T \cdot t)^3 \cdot e^{-2a\left(t - \frac{r_i - r_0}{c}\right)}. \tag{5}$$

Момент руйнування середовища тріщиною можна розглядати як перехід з одного енергетичного стану в інший. Для здійснення цього переходу необхідне накопичування в даному об'ємі простору деякого критичного запасу енергії, що визначається розтягуючими напруженнями. При розгляді елементарного об'єму у вибраній точці простору накопичування енергії в середовищі може бути визначене різницею між потоком енергії, що приходить і виходить. Цю різницю визначає повний диференціал від $I(r, t)$. Накопичування енергії в об'ємі почнеться в момент приходу фронту хвилі напружень. Під критичним запасом енергії можна вважати $Q_{kp} = \sigma_p^2 / 2E$, де σ_p – межа міцності гірської породи на розтяг; E – модуль Юнга. Тоді повна кількість енергії, накопиченої в елементарному об'ємі за проміжок часу між моментами підходу хвилі напружень і тріщини до заданої точки, дорівнює

$$Q_i = \int_{t_0}^{t_k} dI_{ri}(r_i, t). \tag{6}$$

У загальному випадку накопичування енергії в кількості, достатній для руйнування, може відбутися тоді, коли в точці спостереження, окрім хвилі від першого заряду, будуть діяти відбиті від вільної поверхні хвилі і хвилі від наступних зарядів. При одночасному підриванні двох зарядів і при підриванні їх з затримкою для кожного з зарядів може бути записана формула (6). Однак в деякі точки простору тріщини від наступного заряду приходять раніше тріщин від попереднього. Це ж відноситься і до хвиль напружень від наступного заряду. У відповідності до часу підходу хвиль напружень і тріщин вибираються межі інтегрування у виразі (6). В загальному випадку для будь-якого з зарядів, в тому числі і для джерел відбитих хвиль, кількість пружної енергії, що накопичується в середовищі, може бути описана виразом:

$$Q_i = -(P_0 u_0 / r_i^3) \left[(3 / r_i v_T) \int_{z_1}^{z_3} z^3 e^{-2\alpha(z / 2v_T)} dz - 1,2 / v_T \int_{z_1}^{z_2} z^2 e^{-2\alpha(z / 2v_T)} dz \right] e^{-2\alpha(1,5r_0 + r_i)}, \tag{7}$$

де $z = r_0 + v_T(t - t_3)$; $z_1 = 3(r_i - r_0)/c + t_3$; $z_2 = (r_i - r_0)/c + t_3$.

Вибір границь інтегрування обґрунтований тим, що з даного об'єму не може виділитися енергії більше, ніж вноситься з хвилею, тому на границі інтегрування накладається додаткова умова $z_1 > z_2$. У випадку $z_1 < z_2$ руйнування відбувається раніше, ніж хвиля від другого джерела приїде в точку спостереження, і ефекту від взаємодії хвиль спостерігатися не буде.

Для рішення практичної задачі досягнення умов ефективної взаємодії свердловинних зарядів викликає інтерес, в першу чергу, вибір інтервалу уповільнення t_3 , при якому накопичена в масиві енергія бере участь в процесі вибухового руйнування. Розрахунки виконані для наступних параметрів: $r_0 = 0,125$ м; $c = 5000$ м/с; $v_T = 2000$ м/с; $\alpha = 3600$ 1/с; $W = a = 6$ м. На рис. 1 наведені графіки для трьох значень t_3 : 0; $2a/c$ і $4a/c$.

а)

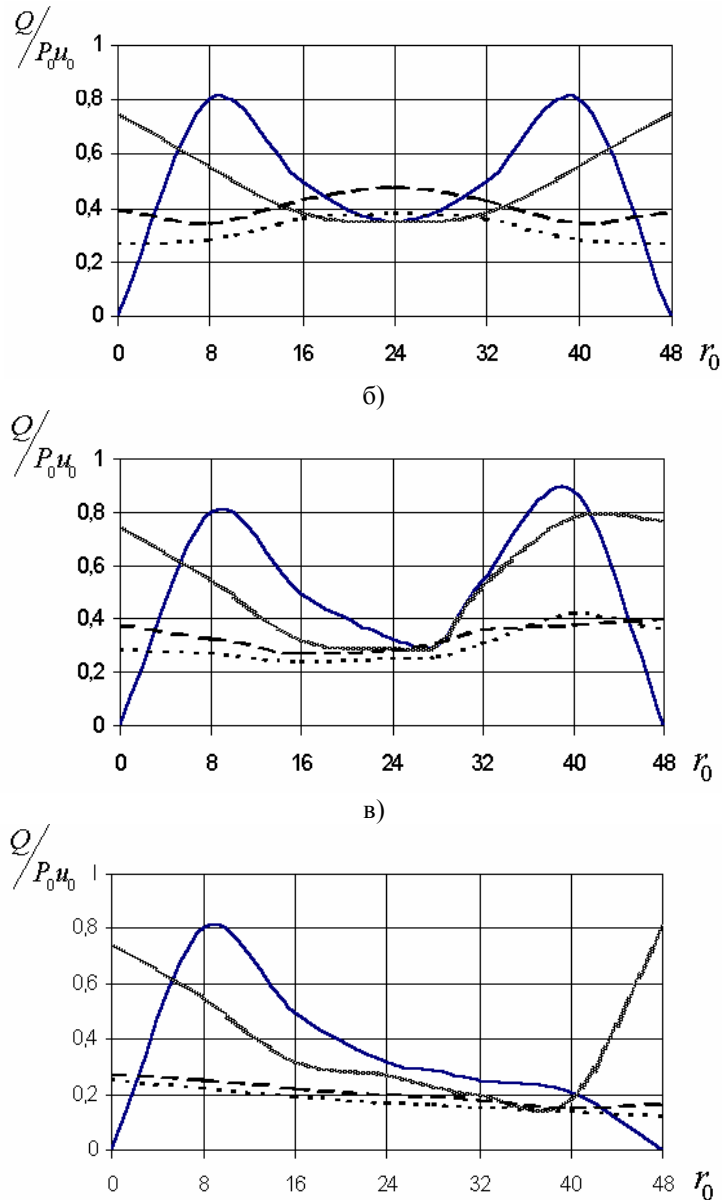


Рис. 1. Графіки розподілу накопиченої в масиві енергії при відстані від зарядів в їх радіусах:

— $y = 0$; $y = 8$; - - - - $y = 32$; - . - . $y = 48$.

На наведеному рисунку кожна крива характеризує розподіл енергії пружних напружень, накопиченої в масиві, вздовж прямої, яка паралельна вільній поверхні і знаходиться на лінії між зарядами ($y = 0$) та на відстані $8r_0$, $32r_0$, і $48r_0$. Останнє значення відповідає відстані між зарядами при наведених вище параметрах. Позиція a характеризує розподіл енергії при одночасному підриванні. Характер розподілу симетричний відносно кожного з зарядів. Згідно з формулою (7) накопичена пружна енергія коло стінки зарядної камери дорівнює нулю. Зі збільшенням відстані від заряду спостерігається зростання кількості пружної енергії, накопиченої в середовищі за час між приходом хвилі і тріщини, що досягає максимуму при $8r_0$. Розподіл енергії на цій же відстані від лінії між зарядами повторює попередню криву за загальним виглядом. Для обох кривих вплив відбитих хвиль незначний або відсутній, бо вони приходять у відповідні точки пізніше, ніж тріщини від зарядів. На наступних кривих спостерігається збільшення накопичування енергії в результаті дії відбитих хвиль. Особливо помітно це виявляється коло вільної поверхні.

Підривання зарядів з уповільненням $t_s = 2a/c$ призводить до порушення симетрії розподілу енергії в масиві між зарядами зі зміщенням максимумів на всіх кривих в бік заряду, що підривається з

уповільненням (поз. б) Зростання величини запасеної енергії і розширення області, де накопичування більше у порівнянні з розподілом енергії при одночасному підриванні, свідчить про те, що при такому режимі взаємодії більше руйнування імовірно навколо другого заряду. При уповільненні $t_3 = 4a/c$ ще більш збільшується асиметрія дії вибуху. Про це свідчить розподіл накопиченої в середовищі енергії (поз. в). У цьому випадку поширюється область мінімального накопичування енергії і збільшується зона, де тріщини перешкоджають взаємодії хвиль напружень. Таким чином, розглянуті варіанти режимів підривання двох суміжних зарядів показують, що сприятливі умови для руйнування масиву забезпечує підривання з інтервалом уповільнення від $2a/c$ до $4a/c$. Найбільш інтенсивне тріщиноутворення має місце при підриванні з уповільненням, що забезпечує зустріч хвиль між лінією зарядів і вільною поверхнею.

Реалізувати дані умови взаємодії суміжних зарядів при уступній відбійці в кар'єрах дозволить підривання з абсолютними значеннями інтервалів уповільнення для наведених параметрів від 2,4 до 4,8 мс. При використанні традиційних засобів підривання "ДШ-КЗДШ" це можна здійснити тільки за допомогою петель з детонуючого шнура довжиною 17-34 м, що нетехнологічно і небезпечно з точки зору надійності. Досягнення розглянутого раціонального режиму взаємодії може забезпечити застосування шнура-хвилеводу «нонель» зі швидкістю ударної хвилі близько 2000 м/с, що дозволить створити умови для підвищення коефіцієнта використання енергії вибуху при руйнуванні гірських порід.

ЛІТЕРАТУРА:

1. On the fracture in blasting / Kutter H. K., Fairhurst C. // Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. and Geomech. Abstr. – 1991. – 8. – № 3. – С. 101–109.
2. Кусов Н.Ф., Марцинкевич Г.И. Об эффективных режимах взаимодействия волн напряжений при взрывании серии зарядов // Научные исследования по технике и технологии открытых горных работ. – М., 1984. – С. 99–108.

ПЕРЕГУДОВ Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, докторант Криворізького технічного університету.

Наукові інтереси:

– розробка ефективних технологій вибухових робіт в кар'єрах на основі керування дією вибуху в гірських породах.

Подано 12.12.2001