

Показано, что сравнительно крупные частицы кварца покрыты тонкодисперсными частицами магнетита нерудных минералов. Применение ультразвуковой обработки диспергирует продукт и эффективно очищает поверхность частиц. Обработанное ультразвуковыми воздействиями питание флотации улучшает условия флотации и эффективность разделения.

Выводы. Таким образом, при тонком и весьма тонком измельчении руд создаются условия образования техногенных сростков для эффективного разрушения которых необходимо применять физические и физико-химические воздействия, например, ультразвук и электрохимическую обработку.

Список литературы

1. Губин Г.В., Ткач В.В., Орел Т.В., Плотников В.В. Особенности загрязнения поверхности минералов в процессе измельчения / Г.В.Губин, В.В. Ткач, Т.В. Орел, В.В. Плотников // Вісник Криворізького технічного університету, 2005. – Вып. 7. – С. 77-82.
2. Влияние минерального состава нерудной среды железистых кварцитов и степени минерализации воды на качество концентратов / Х.У.Ковальчук, М.В.Педан, А.Я.Гоц, Л.В.Свердлова // Обогащение руд черных металлов. М.: Недра, 1981. Вып. 10. - С.55-66.
3. Грицай Ю.Л., Педан М.В., Герасимова З.Ф., Безверхняя И.П. Исследование по закреплению дисперсных рудных минералов на поверхности кварца при измельчении железистых кварцитов // Обогащение руд черных металлов. М.: «Недра», 1980. - Вып. 9.- С.3-9.
4. Богданова И.П., Грицай Ю.Л., Удовенко Р.Г. Применение ультразвуковой обработки пульпы для интенсификации процесса магнитной сепарации окисленных кварцитов// Минчермет СССР. Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований чёрной металлургии. Экспресс-информация. Серия 2 – 1977. Вып. №4.-С.18-22.
5. Ревнивцев В.И., Дмитриев Ю.Г. Ультразвуковое обогащение минералов, покрытых поверхностными загрязняющими примесями// Применение ультразвука в машиностроении: Сб. докл. на 4-й ежегодной научно-технической конференции. М. – 1963. – С 74-82.
6. Келлер О.К., Каргыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. – Л.: Машиностроение, 1977. – 184 с.
7. Пилов П.И. Повышение качества магнетитовых концентратов путем механической обработки // Горный журнал, 1999.– №6.– С.30-32.
8. Дмитриев Ю.Г. Изучение некоторых закономерностей процесса ультразвуковой очистки минералов: Автореферат дисс. – Свердловск, 1967.
9. Классен В.П., Недогоров В.И., Дебердеев И.Х. Шламы во флотационном процессе. – М.: «Недра», 1969.– 245 с.
10. Чантурия В.А., Назарова Г.И. Электрохимическая технология в обогатительно-гидрометаллургических процессах. – М.: Наука, 1977. - 160 с.
11. Чантурия В.А., Дмитриев Г.М., Трофимова Э.А. Интенсификация обогащения руд сложного вещественного состава. _ М.: Наука, 1988.–185с.
12. Чантурия В.А. Электрохимическая технология в процессах первичной переработки минерального сырья// Новые процессы в комбинированных схемах обогащения полезных ископаемых.– М.: Наука. Тр. ИПКОН, 1989.–С. 119-127.
13. Гзгоян Т.Н. К вопросу применения физических полей для руд Михайловского ГОКа // Развитие идей И.Н. Пласина в области обогащения полезных ископаемых и гидрометаллургии: Тезисы докл. юбил. Плак. чтений. М., 2000.
14. Гзгоян Т.Н. Опыт применения энергетических воздействий при рудоподготовке и обогащении железистых кварцитов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2002. – №2. – С.98-113.
15. Мейер К. Физико-химическая кристаллография. –М.: Недра, 1984. – 161 с.

Рукопись поступила в редакцию 06.04.2018

УДК 622.235:622.271

А.А. СКАЧКОВ, гірн. інж., ПАТ «Північний ГЗК»

Д.А. ТІТОВ, студ., С.О. ЖУКОВ, д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет

РОЗВИТОК МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ВИБУХУ ПАРИ СВЕРДЛОВИННИХ ЗАРЯДІВ З УРАХУВАННЯМ СУПЕРПОЗИЦІЇ ХВИЛЬ

Мета. Основною метою дослідження є моделювання взаємодії свердловинних зарядів, які підриваються попарно. При цьому проаналізовано особливості суперпозиції вибухових хвиль в залежності від послідовності відривання цих зарядів. Воно присвячене вирішенню актуальної проблеми – зниженню питомої витрати вибухових речовин для руйнування гірських порід.

Методи дослідження. Аналіз геомеханічних процесів математичним моделюванням динамічного напруження породного масиву вибухом на відкритих розробках.

Наукова новизна. Полягає в тому, що моделюванням встановлено залежність суперпозиції вибухових хвиль в кристалічному середовищі від послідовності підривання зарядів в двох прилеглих свердловинах, що дає можливість більш ефективно дробити гірську породу ними.

Практична значимість. Полягає в можливості зниження питомої витрати вибухових речовин при вибуховому руйнуванні скельних порід.

Результати. Для теорії і практики ведення вибухових робіт важливо знати особливості формування і взаємодії силових полів свердловинних зарядів ВР, які підривають із затримкою. Основну роль в процесі руйнування гірського масиву за цих умов відіграє суперпозиція пружних хвиль. Підбором мас зарядів і тривалості затримки між вибухами можна регулювати процес вибухового навантаження в залежності від конкретних гірничо-геологічних умов ведення вибухових робіт. За рахунок зміни способів формування і порядку підривання зарядів ВР в руйнованому обсязі, можна впливати на процес руйнування, знаючи особливості формування силових полів. З огляду на часові та геометричні характеристики породного масиву, можна припустити, що його напружений стан буде повністю відповідати фізичним параметрам інтегральної зони, за яких суперпозиція вибухових хвиль мінімізується. Отримані результати можуть бути використані для розробки вибухових технологій, заснованих на руйнуванні гірського масиву, приведенного попередньо в напружений стан від вибуху зарядів ВР, наприклад, малої потужності. Подальший розвиток і виробниче застосування результатів досліджень забезпечить значне зниження собівартості залізорудної продукції за рахунок підвищення ефективності бурових і вибухових робіт у залізорудному кар'єрі.

Ключові слова: гірська порода, вибухове руйнування, вибухові хвилі, вибухові роботи, свердловинні заряди..

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-104-31-36

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Уступ гірських порід найбільш нерівномірно руйнується в зоні, прилеглий до укусу [1]. Винятково складний напружено-деформований стан породного масиву в цій частині при взаємодії свердловинних зарядів, що підриваються в першому і другому рядах, є однією з головних причин неконтрольованого виходу негабаритної та перездрібненої фракції при виконанні вибухових робіт, що негативно позначається на техніко-економічних показниках всього гірничодобувного виробництва, тому пошук шляхів вирішення даного завдання є вельми актуальним [2-3], так як у свою чергу сприяє вирішенню проблеми підвищення ефективності буропідривних робіт (БВР).

Аналіз досліджень і публікацій з теорії вибухового руйнування кристалічних масивів і практики БВР показує, що одним з найменш досліджених теоретично і невіршених практично питань є нерівномірний вплив на формування вибухом навантаження крайової частини уступу, оптимізувати що є можливим при цілеспрямованому використанні ефектів розвитку динамічної зони руйнування, створюваної силовими полями взаємодіючих зарядів ВР приконтурних рядів [4-6]. У зв'язку з цим в дослідження закладалася ідея можливості цільового використання динамічних ефектів, що проявляються при взаємодії свердловинних зарядів, для вирішення чого задачі досліджень формулювалися згідно з нею, а саме: заряди першого ряду свердловин ініціюються після підривання зарядів другого, утворюючи завдяки сприятливій суперпозиції вибухових хвиль більш оптимальну динамічну зону відповідно до конкретних умов.

Постановка задачі. Викладення матеріалу дослідження. В основу математичного моделювання динаміки вибуху одиночного заряду [7-9] закладено хвильове рівняння

$$a^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) + f(x, y, z, t) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2},$$

де $\varphi(x, y, z, t)$ – потенціал швидкості, $f(x, y, z, t)$ – потужність джерел хвиль; $\vec{v} = grad(\varphi)$ – вектор швидкості хвиль; $\partial\varphi/\partial n=0$ – гранична умова на твердій нерухомій межі

Розв'язок рівняння

$$\varphi(M, t) = \frac{1}{4\pi \cdot a^2} \iiint_{D_M^{st}} \frac{f(P, t - \frac{r}{a})}{r} d\xi d\eta d\zeta.$$

При заданому джерелі потужністю в точці $M_0(x_0, y_0, z_0)$, у вигляді $f(M, t) = Q[(\eta(t) - (\eta(t + \Delta t))\delta(M, M_0))$, де Q – параметр, пов'язаний з інтенсивністю заряду Δt – проміжок дії вибуху, $\delta(M, M_0)$ – дельта-функція, розв'язок рівняння набуває вигляду

$$\varphi(M, t) = \frac{Q}{4\pi \cdot a^2 \cdot r_{MM_0}} \left(\eta\left(t - \frac{r_{MM_0}}{a}\right) - \eta\left(t + \Delta t - \frac{r_{MM_0}}{a}\right) \right),$$

$r_{MM_0} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$ – відстань від точки $M(x, y, z)$ до точки $M_0(x_0, y_0, z_0)$, $\eta(t)$ – одинична функція.

Щодо виникнення хвиль розрідження від поверхонь розташування заряду, застосовується метод відображень з використанням аналітичної геометрії, який дозволяє врахувати суперпозицію вибухових хвиль відбивання відносно поверхонь розташування заряду.

У випадку точкового джерела, розташованого в точці $M_0(x_0, y_0, z_0)$, фронт вибухової хвилі являє собою сферу, яка задається рівнянням $(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2=(at)^2$, a – швидкість розповсюдження хвилі, t – час.

Якщо мають місце відбивання, то фронт хвилі складається з частин сфери. Припускається, що хвиля розрідження від реального джерела є еквівалентною прямій хвилі від фіктивного джерела, розташованого симетрично відносно поверхні відбивання (рис. 1).

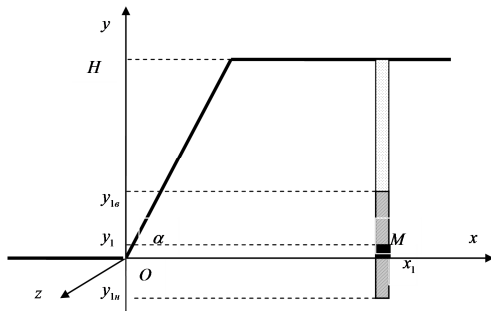


Рис. 1. Розташування ВР в уступі кар'єру з уведеною системою координат

Від заряду, розташованого в точці $M(x_1, y_1, 0)$, виділяються три фронти хвилі: прямий, який задається рівнянням $(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+z^2=(at)^2$, і два – відбиті:

$$(x-x_1)^2+(y-2H+y_1)^2+z^2=(at)^2, (x-x_1 \cos 2\alpha - y_1 \sin 2\alpha)^2 + (y-x_1 \sin 2\alpha + y_1 \cos 2\alpha)^2 + z^2=(at)^2.$$

Рівняння траєкторії точки перетину фронтів відбитих хвиль розрідження знаходяться шляхом обчислення параметрів $\Delta_x = -x_1(1-\cos 2\alpha) + y_1 \sin 2\alpha$, $\Delta_y = x_1 \sin 2\alpha + y_1(1-\cos 2\alpha) - 2H$.

Координати траєкторії точки перетину фронтів хвиль розрідження запишуться у вигляді

$$x(t) = x_1 - \frac{\Delta_x}{2} + \Delta_y \sqrt{\frac{a^2 t^2}{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} - \frac{1}{4}}; \quad y(t) = 2H - y_1 - \frac{1}{2} \Delta_y - \Delta_x \sqrt{\frac{a^2 t^2}{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} - \frac{1}{4}}; \quad z(t) = 0.$$

Потенціал швидкості має вигляд

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi \cdot a^2} \left(\frac{1}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-2H+y_1)^2 + z^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x-x_1 \cos 2\alpha - y_1 \sin 2\alpha)^2 + (y-x_1 \sin 2\alpha + y_1 \cos 2\alpha)^2 + z^2}} \right)$$

Координати вектора швидкості точки перетину фронтів хвиль розрідження знаходяться як частинні похідні від потенціалу (рис. 2, 3)

$$v_x = \frac{Q}{8\pi \cdot a^2 (\Delta_x^2 + \Delta_y^2)} \left(\frac{-\cos \beta + \sin \beta \sqrt{4\theta^2 - 1}}{\theta^3} + \frac{\cos \beta + \sin \beta \sqrt{4\theta^2 - 1}}{(\theta^2 + 1)^{1.5}} \right),$$

$$v_y = \frac{Q}{8\pi \cdot a^2 (\Delta_x^2 + \Delta_y^2)} \left(\frac{-\sin \beta - \cos \beta \sqrt{4\theta^2 - 1}}{\theta^3} + \frac{\sin \beta - \cos \beta \sqrt{4\theta^2 - 1}}{(\theta^2 + 1)^{1.5}} \right), \quad v_z = 0.$$

де $\theta = \frac{a \cdot t}{\sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}}, \quad \beta = \arctg \left(\frac{\Delta_y}{\Delta_x} \right).$

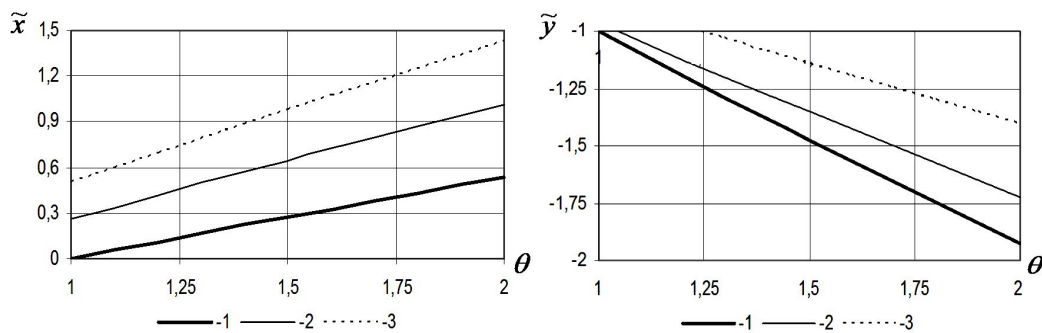


Рис. 2. Залежність координат точки перетину двох хвиль розрідження від часу ($1 - \beta=30^\circ$, $2 - \beta=45^\circ$, $3 - \beta=60^\circ$)

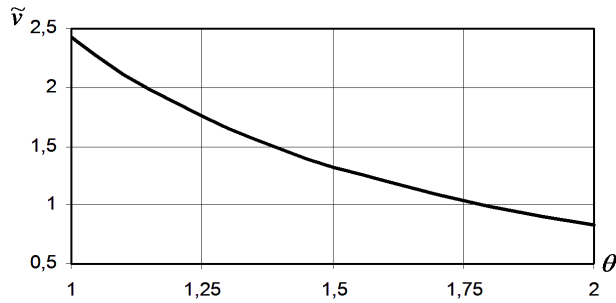


Рис. 3. Зміна швидкості точки перетину двох хвиль розрідження залежно від часу

В даному випадку введено безрозмірні позначення

$$\tilde{x} = \frac{x - x_1}{\sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}}, \quad \tilde{y} = \frac{y + y_1 - 2H}{\sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}},$$

$$\theta = \frac{t}{\Delta_t}, \quad \tilde{v} = \frac{8\pi \cdot a^2 (\Delta_x^2 + \Delta_y^2)}{Q} v$$

У випадку ж лінійного джерела вибуху задача стає більш складною, але, як показують подальші розрахунки, якісна картина суперпозиції вибухових хвиль на достатній віддалі від джерела наближається до дії точкового джерела вибуху.

Для математичного моделювання динаміки короткоуповільненого вибуху в кар'єрах користуються методом послідовного підривання ВР з деякою досить малою затримкою, що дозволяє значно підвищити якість подрібнення гірських порід. Особливістю представленої схеми підривання є те, що спочатку ініціюється вибух у першій свердловині, а потім після деякої затримки – у другій (рис. 4).

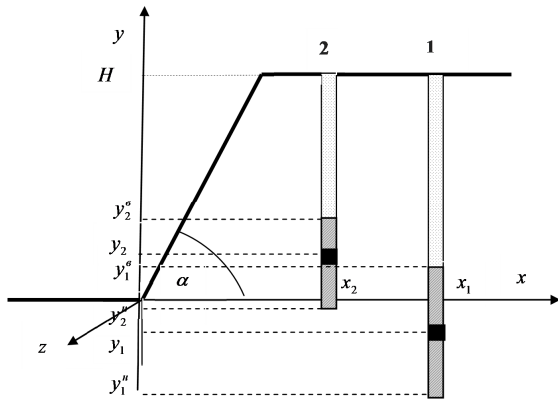


Рис. 4. Розташування ВР в уступі кар'єру з уведеною системою координат

Хвиля розрідження від першого заряду, рівнянням якої є $(x-x_1)^2 + (y+y_1-2H)^2 + z^2 = (at)^2$, накладається на пряму хвилю від підривання другого заряду, яка аналогічно задається рівнянням $(x-x_2)^2 + (y+y_2)^2 + z^2 = [a(t+\tau)]^2$, де τ – час затримки вибуху другого заряду відносно моменту вибуху першого заряду, утворюючи суперпозицію хвиль. В результаті траєкторія перетину хвиль задається у безрозмірному вигляді координатами

$$\tilde{x} = \frac{1}{2} (\Phi \cdot \cos \beta + \sin \beta \sqrt{4\theta^2 - \Phi^2}), \quad \tilde{y} = \frac{1}{2} (\Phi \cdot \sin \beta - \cos \beta \sqrt{4\theta^2 - \Phi^2}), \quad \tilde{z} = 0,$$

де $\theta = \tau/\Delta_t$, $\Phi = \theta_0(2\theta + \theta_0) - 1$.

Значення інших параметрів співпадає з тими, що були введені вище.

Потенціал, який має місце в точці суперпозиції двох хвиль від різних джерел, запишеться як сума відповідних потенціалів від цих джерел

$$\varphi = \frac{1}{4\pi \cdot a^2} \left(\frac{Q_1}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y+y_1-2H)^2 + z^2}} + \frac{Q_2}{\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + z^2}} \right)$$

де Q_1, Q_2 – інтенсивності джерел вибуху від першого та другого зарядів.

Проекції швидкості точки перетину хвиль знаходяться, як частинні похідні від потенціалу. У безрозмірному поданні мають вигляд (рис. 5)

$$\tilde{v}_x = \hat{Q}_1 \frac{\cos \beta \cdot \Phi + \sin \beta \sqrt{4\theta^2 - \Phi^2}}{\theta^3} + \hat{Q}_2 \frac{\cos \beta \cdot (\Phi + 2) + \sin \beta \sqrt{4\theta^2 - \Phi^2}}{((\theta + \theta_0)^2 + 1)^{1.5}},$$

$$\tilde{v}_y = \hat{Q}_1 \frac{\sin \beta \cdot \Phi - \cos \beta \sqrt{4\theta^2 - \Phi^2}}{\theta^3} + \hat{Q}_2 \frac{\sin \beta \cdot (\Phi + 2) - \cos \beta \sqrt{4\theta^2 - \Phi^2}}{((\theta + \theta_0)^2 + 1)^{1.5}}, \quad \tilde{v}_z = 0,$$

де $\tilde{v}_x = \frac{8\pi \cdot a^2 (\Delta_x^2 + \Delta_y^2)}{Q_1 + Q_2} \cdot v_x$, $\tilde{v}_y = \frac{8\pi \cdot a^2 (\Delta_x^2 + \Delta_y^2)}{Q_1 + Q_2} \cdot v_y$, $\hat{Q}_1 = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2}$, $\hat{Q}_2 = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2}$.

Безрозмірна швидкість точки суперпозиції хвиль знаходиться за формулою

$$\tilde{v} = -\sqrt{\frac{\hat{Q}_1^2}{\theta^4} + \hat{Q}_1 \cdot \hat{Q}_2 \frac{\theta^2 + (\theta + \theta_0)^2 - 1}{\theta^3((\theta + \theta_0)^2 + 1)^{1,5}} + \hat{Q}_2^2 \frac{(\theta + \theta_0)^2}{((\theta + \theta_0)^2 + 1)^3}}$$

де $\tilde{v} = \frac{8\pi \cdot a^2 (\Delta_x^2 + \Delta_y^2)}{Q_1 + Q_2} \cdot v$ (рис. 6).

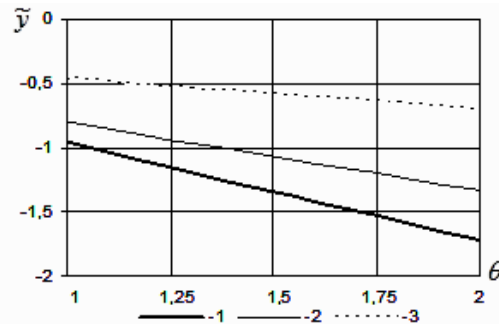
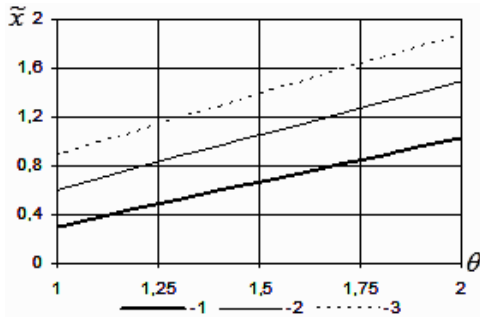


Рис. 5. Залежність координат точки перетину двох хвиль від часу ($1 - \theta_0 = 0,25$, $2 - \theta_0 = 0,5$, $3 - \theta_0 = 0,75$)

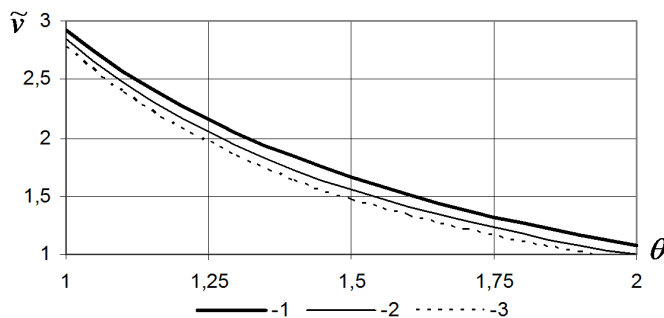


Рис. 6. Зміна безрозмірної швидкості точки перетину двох хвиль залежно від часу ($1 - \theta_0 = 0,25$, $2 - \theta_0 = 0,5$, $3 - \theta_0 = 0,75$)

У випадку врахування довжини джерел вибуху задача стає більш складною, але якісна картина суперпозиції вибухових хвиль на достатній віддалі від джерел наближається до випадку точкових джерел.

Висновки. Враховуючи часові та геометричні характеристики породного масиву, можна припустити, що його напружений стан буде повністю відповідати фізичним параметрам інтегральної зони, за яких суперпозиція вибухових хвиль мінімізується. Отримані результати можуть бути використані для розробки вибухових технологій, заснованих на руйнуванні гірського масиву, приведеного попередньо в напружений стан від вибуху зарядів ВР, наприклад, малої потужності.

Список літератури

1. Физика взрыва / Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др./ Под. ред. К.П.Станюковича. - М.: Наука, 1975. - 407 с.
2. Persson P.A., Holmberg R. and Jailing. L.– Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, London, 1994. PP 540.
3. Бетин В.Д. Развитие детонации в скважинных зарядах с полыми цилиндрами // Разработка рудных месторождений. Научно-техн. сб. – Кривой Рог: изд-во КТУ, 2003. – Вып. 83. – С.68-74.
4. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Часть 1. - М.: Горная книга, 2009. - 471 с.
5. Перегудов В.В., Жуков С.А. Пути повышения качества взрывных работ при разрушении горных пород сложной структуры. Монография. - Кривой Рог: Издательский дом, ISBN 966-7388-47-6. 2002. - 305 с.
6. Антонов А.Ю., Кириченко И.А. Разработка технологи отбойки на нижних горизонтах железорудных карьеров // Вісник КТУ. Кривий Ріг: КТУ, 2004 - № 5. – С.16-20.
7. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела. – Новосибирск: Наука, 1977. - 259 с.
8. <http://industry-portal24.ru/razrushenie/2738-udarno-volnovaya-teoriya-vzryvnogo-razrusheniya.html>
9. Перегудов В.В., Жуков С.А. Пути повышения качества взрывных работ при разрушении горных пород сложной структуры. – Кривой Рог: Издательский дом, 2002. – 179 с.

Рукопис подано до редакції 05.04.2018