

Тищенко С. В. /д. т. н./, Федоренко П. Й. /д. т. н./,  
Еременко Г. И. /к. т. н./, Гапоненко И. А.  
ГВУЗ «КНУ»

## Обоснование параметров скважинного заряда взрывчатого вещества с воздушным промежутком и отражателем из сыпучих материалов

*Характер процесса взрывного разрушения массива горных пород зависит от параметров скважинного заряда взрывчатого вещества. Исследован процесс разрушения горного массива при наличии в скважинном заряде взрывчатого вещества воздушного промежутка и отражателя из сыпучих материалов. Ил. 2. Библиогр.: 6 назв.*

**Ключевые слова:** горная масса, взрыв, скважинный заряд, сыпучие материалы

*Character of explosive rupture process of massive geological materials depends on the parameters of torpedo. The process of destruction of mountain group where there is explosive material of air-gap and reflector from granular material in borehole charge, is investigated.*

**Keywords:** rock mass, explosion, borehole charge, granular material

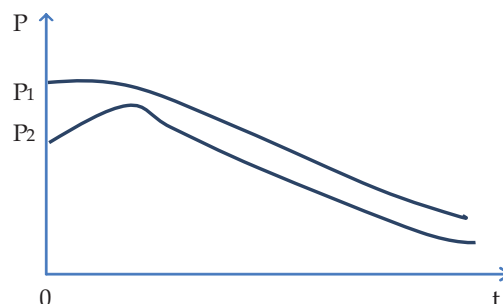
Эффективная и качественная взрывоподготовка горной массы оказывает прямое влияние на технико-экономические показатели добычи полезного ископаемого открытым способом. Производство взрывных работ на современном этапе характеризуется сложными горно-геологическими условиями ведения буровзрывных работ.

В этих случаях возникает необходимость в разработке технологий взрывных работ, позволяющих получать высокое качество дробления взрывающейся горной породы.

Характер процесса взрывного разрушения массива горных пород во многом определяется конструктивными особенностями скважинного заряда ВВ. Используя последние, возможно значительно уменьшить пиковое давление продуктов детонации на границе раздела заряд-порода, увеличить общее время воздействия взрывных нагрузок на разрушаемый массив и тем самым повысить КПД взрыва.

Для рационального использования энергии взрыва Н. В. Мельников, Л. Н. Марченко [1, 2] предложили использовать в зарядных камерах воздушные промежутки. При этом они считали, что процесс дробления породы находится в прямой зависимости от интенсивности напряжения и его можно улучшить при определенных условиях, даже снижая величину напряжения в разрушаемом массиве (рис. 1).

Исследуем процесс разрушения горного массива при наличии в скважинном заряде ВВ [3] воздушного промежутка и отражателя из сыпучих материалов.



**Рис. 1. Зависимость давления ПД от времени:**

- 1 – сплошной скважинный заряд ВВ;
- 2 – скважинный заряд ВВ с воздушным промежутком и отражателем из сыпучих материалов

При исследовании динамического разрушения твердой среды при взрыве вводятся в рассмотрение волны разрушения [3]. Под волной разрушения понимается распространяющаяся в разрушаемой среде поверхность, отделяющая материал среды от разрушенного. Так как разрушение происходит за конечное время, то удобнее рассматривать не поверхность, а слой некоторой толщины.

При взрыве скважинного заряда для продуктов детонации справедлив изоэнтропийный закон расширения, связывающий давление  $P$  и плотность  $\rho$ .

$$P = a \cdot \rho^n,$$

где  $n$  – константа данного ВВ.

При истечении продуктов детонации в какую-либо среду в последней всегда образуется ударная волна, скорость которой согласно работы [1] определяется из выражения:

$$U_{y\partial} = \frac{D}{n+1} \left( 1 + \frac{2n}{n-1} \left( 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{2n}} \right) \right),$$

где  $D$  – скорость детонации ВВ;  $P_1$  – давление во фронте детонационной волны,  $P_2$  – начальное давление во фронте ударной волны, образующейся в среде.

Очевидно, что структура и параметры волны разрушения зависят от импульсной нагрузки, в нашем случае ударной волны и физико-механических свойств разрушаемой среды.

Рассмотрим разрушающее действие скважинного (цилиндрического) заряда ВВ в плоскости, перпендикулярной к оси заряда, то есть рассмотрим плоскую картину течения разрушения. Закон сохранения энергии на фронте волны разрушения имеет вид

$$\omega_2 - \omega_1 = \frac{1}{2}(P_1 + P_2)(\rho_1^{-1} - \rho_2^{-1}),$$

где  $\omega_1, \omega_2$  – внутренняя энергия среды на поверхности, на которой начинается разрушение и соответственно на поверхности, где дальнейшее разрушение не происходит;  $P_1, P_2$  – напряжения, нормальные к поверхностям, где происходит и не происходит разрушение;  $\rho_1, \rho_2$  – плотность среды соответственно на указанных поверхностях.

Согласно [5], если внутреннюю энергию единицы массы материала обозначить через  $\omega_0$ , то для разрушенного материала

$$\omega = P^2 / 2k\rho_1 + \sum P^2 / 2\mu\rho_1 + \omega_0(T_1). \\ 3P = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$6 \sum^2 = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2, \quad \omega_0(T_1) = C \cdot T_1 \cdot \rho_1^{-1} \quad (1) \\ \omega_0(T_1) = c \cdot T_1 \cdot \rho_1^{-1},$$

где  $k$  – модуль векторного сжатия;  $\mu$  – модуль сдвига;  $c$  – теплоемкость.

За фронтом волны разрушения для разрушенного материала

$$\omega_2 = \sigma_x^2 (2E\rho_2)^{-1} + \omega_0(T_2) + \omega_s,$$

где  $\omega_s$  – поверхностная энергия.

Так как в нашем случае рассматривается задача на плоскости, то с учетом соотношений  $\sigma_y = \sigma_s; \sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$  получаем уравнение теплового баланса

$$\omega_2 + C(T_2 - T_1) = \sigma_x^2 (2E)^{-1} (1 - \nu(\rho_2 - \rho_1)(1 - \nu)^{-1} \sigma_x) \quad (2)$$

при  $\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x$ , где  $\varepsilon_x$  – предельная деформация растяжения.

Согласно уравнения (2) тепловые потери при разрушении равны

$$\Delta Q = \sigma_x^2 / 2E_1 - \omega_s. \quad (3)$$

С учетом осевой симметрии рассмотрения процесса разрушения окончательно имеем

$$\Delta Q = (\sigma_x^2 / 2E_1) \left[ (1 - \nu^2 - \rho\nu^2(\varepsilon_x \sigma_x)^{-1}) \right]. \quad (4)$$

Отсюда следует важный вывод, что чем интенсивнее происходит дробление, тем больше тепловые потери (рис. 2). Следовательно, изменяя величину взрывного воздействия на разрушаемую среду, можно влиять на КПД взрыва.

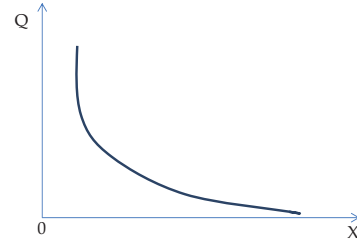


Рис. 2. Зависимость между потерями энергии на нагревание породы  $Q$  и интенсивностью разрушения среды  $X$

Как видно из последнего уравнения, потери энергии на нагревание породы тем больше, чем больше раздроблена среда. Это приводит к быстрому затуханию волны разрушения.

Как уже отмечалось, внутренняя структура волны разрушения состоит из двух поверхностей:  $L_1$  – поверхность, на которой начинается разрушение и  $L_2$  – поверхность, за которой дальнейшее разрушение не происходит. Очевидно, что перед поверхностью  $L_1$  среда подвергается растяжению, а за поверхностью  $L_2$ , растягивающие напряжения полностью сняты.

На образование трещины, очевидно, затрачивается энергия  $W$ , включающая в себя энергию разрыва внутренних связей, работу пластической деформации и другие виды энергии. Если длина трещины изменяется на величину  $dl$ , то производную  $\partial W / \partial l$  можно рассматривать как обобщенную силу. Обозначив через  $f$  удельную поверхностную энергию, получим:  $\partial W / \partial l = \partial f$ . Тогда согласно исследованиям [4], закон сохранения импульса на поверхностях  $L_1$  и  $L_2$  примет вид

$$P_2 S_2 - P_1 S_1 = j(\nu_2 - \nu_1) + 2f,$$

где  $j$  – поток вещества;  $\nu_1$  и  $\nu_2$  – массовая скорость на поверхности  $L_1$  и  $L_2$ ;  $S_1$  – сечение фрагмента в не разрушенной среде;  $S_2$  – сечение фрагмента в разрушенном материале.

Закон сохранения потоков вещества с учетом наших обозначений запишется в виде:

$$P_2^1 - P_1^1 = j^2 \left( (\rho_1^1)^{-1} - (\rho_2^1)^{-1} \right) + 2f, \quad (5)$$

$$P^1 = PS; \quad \rho^1 = \rho S, \quad (6)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность соответственно на каждой из поверхностей;  $P_1$  и  $P_2$  – нормальные напряжения.

Для случая, когда  $P'_1 = P'_2$  с учетом формул (5) и (6), получаем

$$\rho_1 S_1 (\rho_1 S_1 / \rho_2 S_2 - 1) = 2f / (C_r - v_1)^2, \quad (7)$$

где  $c_r$  – скорость волны разрушения.

Из предположения, что среда является упругопластической, имеем

$$S_1 = S_0(1 + \varepsilon_*), \quad S_2 = S_0(1 + \varepsilon'), \quad (8)$$

где  $S_0$  – размер рассматриваемого фрагмента в не напряженном состоянии;  $\varepsilon'$  – остаточная деформация.

Подставляя значения  $S_1$  и  $S_2$  из формул (8) в выражение (7), получим

$$S_2 = 2f / \rho(c_r - v_1)^2 (\varepsilon_* - \varepsilon'), \quad (9)$$

так как  $\varepsilon_* - \varepsilon' = \sigma_* / E$ , то окончательно формула по определению размера осколка, если известна окончательная скорость  $C_r$  волны разрушения, может быть записана в виде

$$S_2 = 2fE(\rho\sigma_*(c_r - v_1)^2)^{-1}. \quad (10)$$

Очевидно, что скорость распространения волны разрушения зависит от геометрии и кинематики движения.

Для случая радиального движения с осевой симметрией скорость фронта разрушения равна

$$dR / dt = v / 2\varepsilon_*, \quad (11)$$

где  $R$  – радиус фронта разрушения;  $t$  – время или

$$dR / dt = c_r - v_1. \quad (12)$$

Тогда с учетом формул (10), (11), (12) получим

$$S_2 = 8fE\varepsilon_*^2 (\rho\sigma_* \cdot v^2)^{-1}. \quad (13)$$

Формула (13) дает возможность определить поперечный размер куска разрушенного материала в зависимости от величины массовой скорости  $V$ . Если поперечный размер осколка обозначить через  $\langle x \rangle$ , а величину массовой скорости для цилиндрического заряда принять в виде

$$v = A(\sqrt{Q} \cdot R_*^{-1})^2, \quad (14)$$

где  $Q$  – вес заряда ВВ, приходящийся на единицу длины;  $R_*$  – расстояние от центра заряда;  $A, \alpha$  – эмпирические коэффициенты, то формула (13) примет окончательный вид

$$\langle x \rangle = (8fE\varepsilon_*^2 A^2 \sigma_*) (R / Q^{1/2})^\alpha. \quad (15)$$

Формула (15) определяет характерный размер осколков в зависимости от веса заряда и расстояния от центра заряда. В общем виде это может быть записано как

$$\langle x \rangle = X(Q_1 R). \quad (16)$$

Ранее отмечалось, что формула (14) дает зависимость между тепловыми потерями и ин-

тенсивностью дробления, то есть величиной  $\langle x \rangle$ . Эта зависимость может с большой точностью быть выражена соотношением:

$$\Delta Q = \langle x \rangle^{-2}. \quad (17)$$

Если обозначить через  $r$  границу разрушения, а через  $r_0$  радиус цилиндрического заряда, то средний размер куска грансостава взорванной горной массы может быть определен соотношением

$$\langle x \rangle = B \int_{r_0}^r R dr, \quad (18)$$

где

$$B = 2\pi^2 S_2 (r_2 - r_0^2)^{-1}. \quad (19)$$

Для области разрушения  $r_0 \leq r$  согласно формулы (14) имеем

$$\langle x \rangle = 8fE\varepsilon_*^2 / \rho A^2 (\alpha + 1) \sigma_* r^{2\alpha} / Q^\alpha. \quad (20)$$

Если ввести замену  $V = \pi r^2$ , то окончательно получим

$$\langle x \rangle = K(E\varepsilon_*^2 / \sigma_*) (V / Q)^\alpha, \quad (21)$$

где  $K$  – числовой коэффициент, зависящий от свойств разрушаемой среды.

Анализируя формулы (14) и (16), следует отметить, что наличие в скважинном заряде ВВ [3] воздушного промежутка и отражателя из сыпучих материалов позволит снизить тепловые потери и интенсивность дробления в ближней зоне от заряда и повысить тем самым эффективность использования энергии взрыва.

При условии  $\sigma_* = E\varepsilon_*$  – хрупкое разрушение, формула (21) примет вид

$$\langle x \rangle = K(\sigma_* / E)(V / Q)^\alpha. \quad (22)$$

теоретически оптимальный случай для процесса взрывного разрушения, если  $\Delta Q = 0$ , тогда согласно [5, 6]

$$\langle x \rangle_{opt} = \sigma_*^2 / 2Ef. \quad (23)$$

Выражение (22) нужно рассматривать как теоретический предел эффективности использования энергии взрыва, к которому необходимо стремиться в реальных условиях при проведении взрывных работ.

Перспективными и отвечающими необходимым требованиям для качественного взрывного дробления горных пород любой крепости и обводненности являются технология и организация взрывных работ с использованием эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ). ЭВВ при высоких взрывных характеристиках по сравнению с гранулированными ВВ имеют выше плотность заряжания (1,2-1,3 кг/м<sup>3</sup>), чем гранулированные ВВ. Следовательно, использование ЭВВ расширяет область эффективного использова-

ния скважинного заряда ВВ с воздушным промежутком и отражателем из сыпучих материалов, с целью изменения характера взрывного воздействия на разрушаемую среду, для повышения КПД взрыва.

### Выводы

На основании гидродинамической теории действия взрыва в твердой среде установлены закономерности распределения гранулометрического состава взорванной горной массы от энергетических характеристик образования зоны разрушения при взрыве скважинного заряда. Анализируя полученные результаты согласно формул (14)-(16), следует отметить, что наличие в скважинном заряде ВВ [3] воздушного промежутка и отражателя из сыпучих материалов позволяет снизить тепловые потери и интенсивность дробления в ближней зоне от заряда ВВ. Это позволяет повысить эффективность использования энергии взрыва.

### Библиографический список

1. Мельников Н. В., Марченко Л. Н. Энергия взрыва и конструкция заряда. – М.: Недра, 1964. – 138 с.
2. Эффективные методы управления процессами взрывного дробления и выброса / Н. В. Мельников, Л. П. Марченко, И. П. Сеинов и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1971. – № 2. – С. 37.
3. Пат. № 35423 Украина МПК F42D 1/00 F42D 3/00. Свердловинний заряд / Гапоненко А. Л. и др.
4. Кузнецов В. М. О плоской волне разрушения. ФГВ. – 1974. – № 1. – С. 124-127.
5. Механический эффект подземного взрыва / В. Н. Родионов, В. В. Адушкин и др. / Под ред. М. А. Садовского. – М.: Недра, 1971. – 220 с.
6. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

Поступила 26.01.2015



УДК 622.014.2

Наука

Зубко С. А. /к. т. н./  
ЗАТ «Запорізький залізорудний комбінат»

Кононенко М. М. /к. т. н./,  
Петльований М. В. /к. т. н./  
ДВНЗ «НГУ»

## Обґрунтування раціональних параметрів камер третьої черги відпрацювання при підземному видобутку залізної руди

Обґрунтовано ширину очисної камери третьої черги відпрацювання на контакті зі слабкими породами висячого боку, а також удосконалено методу розрахунку параметрів систем розробки із закладкою. Іл. 7. Бібліогр.: 7 найм.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, камери третьої черги відпрацювання, слабкі породи висячого боку, параметри систем розробки

*The width of stope chamber of third stage mining in contact with weak rocks of hanging wall is justified. The calculation technique of mining methods with backfilling is improved.*

**Keywords:** stress-strain state, chamber of third stage mining, weak rocks of hanging wall, technique of mining methods

### Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами

Одним з показників, що характеризує ефективність камерних систем розробки із закладанням, є збіднення руди. В умовах нестійких порід висячого боку Південно-Білозерського родовища збіднення сягає 12 %, що суттєво знижує

техніко-економічні показники по системі розробки. На шляху збільшення річної продуктивності понад 4,5 млн т на рік головним стримуючим фактором на приватному акціонерному товаристві «Запорізький залізорудний комбінат» (ПАТ «ЗЗРК») є недостатні темпи розкриття й підготовки нових горизонтів. З метою інтенси-