

С.В. ТИЩЕНКО, д-р техн. наук, Г.И. ЕРЕМЕНКО, канд. техн. наук,  
Криворожский национальный университет  
Д.Ю. МАЛЫХ, главный инженер, ПАО «ИнГок»

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА ПРИ ВЗРЫВАНИИ СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА ВЗРЫВЧАТЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

При взрыве скважинного заряда для продуктов детонации справедлив изоэнтропийный закон расширения, связывающий давление  $P$  и плотность  $\rho$  [1,2]

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

где  $n$  - константа данного ВВ.

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

$$U_{y0} = \frac{D}{n+1} \left( 1 + \frac{2n}{n-1} \left( 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{2n}} \right) \right),$$

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, т.е. рассмотрим плоскую картину течения разрушения. Закон сохранения энергии на фронте волны разрушения имеет вид

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

где  $\omega_1, \omega_2$  - внутренняя энергия среды на поверхности, на которой начинается разрушение, и соответственно на поверхности, где дальнейшего разрушения 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 [3], если внутреннюю энергию единицы массы неразрушенного материала обозначить через  $\omega_0$ , то для неразрушенного материала  $\omega = P^2 / 2k\rho_1 + \Sigma^2 / 2\mu\rho_1 + \omega_0(T_1)$ .

$$\begin{aligned} 3P &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z, \\ 6\Sigma^2 &= (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2, \quad \omega_0(T_1) = C \cdot T_1 \cdot \rho_1^{-1}, \\ \omega_0(T_1) &= c \cdot T_1 \cdot \rho_1^{-1}, \end{aligned} \quad (2)$$

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.

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

$$\omega_2 + C(T_2 - T_1) = \sigma_*^2 (2E)^{-1} (1 - \nu(\rho_2 - \rho_1)(1 - \nu)^{-1} \sigma_*) \quad \text{при } \sigma_* = E\varepsilon^*, \quad (3)$$

где  $\varepsilon^*$  - предельная деформация растяжения.

Согласно уравнению (3), тепловые потери при разрушении равны

$$\Delta Q = \sigma_*^2 / 2E_1 - \omega_s. \quad (4)$$

С учетом осевой симметрии рассмотрения процесса разрушения окончательно имеем

$$\Delta Q = (\sigma_*^2 / 2E_1) \left[ (1 - \nu^2 - \rho\nu^2(\varepsilon^* \sigma_*)^{-1}) \right]. \quad (5)$$

Отсюда следует важный вывод, что чем интенсивнее происходит дробление, тем больше тепловые потери. Следовательно, изменяя величину взрывного воздействия на разрушаемую среду, можно влиять на КПД взрыва. 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 дальнейшего разрушения 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 [5]. Если длина трещины изменяется на величину  $dl$ , то производную  $\partial W/dl$  можно рассматривать как обобщенную силу. Обозначив через  $f$  удельную поверхностную энергию, получим:  $\partial W/dl = df$ . Тогда согласно исследованиям [1], закон сокращения импульса на поверхностях  $L_1$  и  $L_2$  примет вид

$$P_2 S_2 - P_1 S_1 = j(v_2 - v_1) + 2f,$$

где  $j$  - поток вещества;  $v_1$  и  $v_2$  - массовая скорость на поверхности  $L_1$  и  $L_2$ ;  $S_1$  - сечение фрагмента в неразрушенной среде;  $S_2$  - сечение фрагмента в разрушенном материале.

Закон сохранения потоков вещества с учетом наших обозначений запишется в виде

$$P_2^1 - P_1^1 = j^2(\rho_1^1)^{-1} - (\rho_2^1)^{-1} + 2f, \quad (6)$$

$$P^1 = \rho S; \quad \rho^1 = \rho S, \quad (7)$$

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

Для случая, когда  $P_1^1 = P_2^1$  с учетом формул (6) и (7), получаем

$$\rho_1 S_1 (\rho_1 S_1 / \rho_2 S_2 - 1) = 2f / (C_r - v_1)^2, \quad (8)$$

где  $c_r$  - скорость волны разрушения.

Из предположения, что среда является упругопластической, имеем

$$S_1 = S_0(1 + \varepsilon^*), \quad S_2 = S_0(1 + \varepsilon'), \quad (9)$$

где  $S_0$  - размер рассматриваемого фрагмента в ненапряженном состоянии;  $\varepsilon'$  - остаточная деформация.

Подставляя значения  $S_1$  и  $S_2$  из формул (9) в выражение (8), получим

$$S_2 = 2f / \rho (c_r - v_1)^2 (\varepsilon^* - \varepsilon'), \quad (10)$$

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

$$S_2 = 2fE(\rho\sigma^*(c_r - v_1)^2)^{-1}. \quad (11)$$

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

Для случая радиального движения с осевой симметрией скорость фронта разрушения равна

$$dR/dt = v / 2\varepsilon^*, \quad (12)$$

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

$$dR/dt = c_r - v_1. \quad (13)$$

Тогда с учетом формул (11-13) получим

$$S_2 = 8fE\varepsilon_*^2(\rho\sigma^* \cdot v^2)^{-1}. \quad (14)$$

Формула (14) дает возможность определить поперечный размер куса 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

$$v = A(\sqrt{Q} \cdot R_*^{-1})^2, \quad (15)$$

где  $Q$  - вес заряда ВВ, приходящийся на единицу длины;  $R_*$  - расстояние от центра заряда;  $A, \alpha$  - эмпирические коэффициенты, то формула (18) примет окончательный вид

$$\langle x \rangle = (8fE\varepsilon_*^2 A^2 \sigma^*)(R/Q^{1/2})^\alpha. \quad (16)$$

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

$$\langle x \rangle = X(Q, R). \quad (17)$$

Ранее отмечалось, что формула (5) дает зависимость между тепловыми потерями и интенсивностью дробления, то есть величиной  $\langle x \rangle$ . Эта зависимость может с большой точностью быть выражена соотношением

$$\Delta Q = \langle x \rangle^{-2}. \quad (18)$$

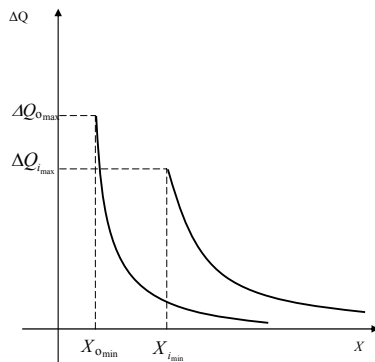
На рис. 1 показана общая закономерность соотношения между этими двумя параметрами.

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

$$\langle x \rangle = B \int_{r_0}^r R dr, \quad (19)$$

$$B = 2\pi^2 S_2 (r_2 - r_0^2)^{-1}, \quad (20)$$

**Рис. 1.** Зависимость между потерями энергии на нагрев породы и интенсивностью разрушения среды



Для области разрушения  $r_0 \leq r$ , согласно формуле (15), имеем

$$\langle x \rangle = 8 f E \varepsilon_*^2 / \rho A^2 (\alpha + 1) \sigma_* r^{2\alpha} / Q^\alpha. \quad (21)$$

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

$$\langle x \rangle = K (E \varepsilon_*^2 / \sigma_*) (V / Q)^\alpha, \quad (22)$$

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

При условии  $\sigma = E \varepsilon_*$  (хрупкое разрушение) формула (22) примет вид

$$\langle x \rangle = K (\sigma_* / E) (V / Q)^\alpha, \quad (23)$$

теоретически оптимальный случай для процесса взрывного разрушения, если  $\Delta Q = 0$ , тогда согласно [4]

$$\langle x \rangle_{opt} = \sigma_*^2 / 2 E f. \quad (24)$$

Выражение (23) нужно рассматривать как теоретический предел эффективности использования энергии взрыва, к которому необходимо стремиться в реальных условиях при проведении взрывных работ.

#### Список литературы

1. Детонационные волны в конденсированных средах / А.Н. Дремин, С.Д. Савров, В.С. Трофимов, К.К. Шведов. – М.: Наука, 1971. – 162 с.
2. Кузнецов В.М. О плоской волне разрушения // ФГВ. - 1974. - № 1. – С. 124-127.
3. Действие взрыва в горных породах / Друкованый М.Ф., Комир В.М., Кузнецов В.М. - К.: Наукова думка, 1973. - 184 с.
4. Родионов В.Н. О подобии процесса дробления при взрывах рудного масштаба // В кн. Механизм разрушения горных пород взрывом. - К.: Наукова думка, 1971. – С. 107-112.
5. Власов О.Е., Смирнов С.А. Основы расчета дробления горных пород взрывом. - М.: АН СССР, 1962. – 101 с.

Рукопись поступила в редакцию 04.01.14

УДК 622.062:622.281

Д.В. БРОВКО, канд. техн. наук, доц., Криворожский национальный университет

### БЕЗОПАСНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ ШАХТ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КОНСТРУКЦИЙ СООРУЖЕНИЙ

На основе руководств по формальной оценке безопасности выполнен анализ риска возникновения аварийных ситуаций в зданиях и сооружениях, на примере обрушения конструкций сооружения поверхности горнодобывающего предприятия.