

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВЗРЫВАМИ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ ИЗ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ

*И.В. Тимошин, инж. (ОАО «Взрывпром Юга Кузбасса», РФ)*

*З використанням зонної моделі камуфлетного вибуху циліндричного заряду в гірських породах досліджено вплив характеристик порід і вуглистих вибухових речовин на розміри зон впливу вибуху.*

В настоящее время наряду с промышленными взрывчатыми веществами (ВВ) широкое применение получают ВВ местного изготовления, в том числе углесодержащие. Оценку эффективности действия взрыва таких ВВ в различных горных породах можно выполнять как с помощью теоретических исследований, так и с использованием экспериментальных работ, зачастую трудоемких и требующих значительных материальных затрат. Поэтому теоретическое исследование зависимости между параметрами скважинного заряда, свойствами углесодержащих ВВ и горных пород, размерами зоны влияния камуфлетного взрыва является актуальным с научной и практической точек зрения.

В данной работе при решении задачи о распространении цилиндрической взрывной волны в горной породе в основу математической постановки положены предпосылки зонной теории взрыва в твердых средах [1–4]. Предполагается мгновенная детонация заряда. Принимается, что ударная волна быстро уходит от полости взрыва и основное деформирование происходит в точках породы после прохождения через них ударной волны. Поля напряжений и деформаций близки к статическим.

Развитие взрыва делится на следующие этапы. На первом этапе волна разрушения движется со скоростью, превышающей максимальную скорость развития трещин  $V_{тр}$ . При этом в горной породе имеются две зоны: пластическая при  $a(t) \leq r(t) \leq b(t)$  и упругая при  $r(t) > b(t)$ , где  $a(t)$  – радиус полости взрыва,  $b(t)$  – граница пластической зоны,  $r(t)$  – текущий радиус,  $t$  – время. На втором этапе при уменьшении скорости роста пластической зоны и выполнении неравенства  $\dot{b} \leq V_{тр}$  (точки над переменными величинами означают операцию дифференцирования по времени) появляется зона радиальных трещин

$$b(t) \leq r(t) \leq l(t),$$

где  $l(t)$  – радиус фронта зоны радиальных трещин. При этом зона упругости находится в области  $r > l(t)$ .

Давление газа в полости радиуса  $a$  рассчитывается по двучленной изэнтропе, предложенной в [5]:

$$p(a) = A \rho_0^n + B \rho_0^{\gamma+1}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – текущая плотность газа в полости;  $A, B, n, \gamma$  – параметры данного ВВ, рассчитываемые по его детонационным характеристикам.

Вблизи заряда в зоне переизмельчения выполняются уравнения движения и неразрывности породы (в рамках механики сплошной среды), которые для взрыва цилиндрического заряда имеют вид

$$\rho \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial r} \right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho V)}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

где  $\rho$  – текущая плотность породы;  $r$  – координата Эйлера;  $V$  – массовая скорость частиц породы;  $\sigma_r, \sigma_\theta$  – радиальная и тангенциальная компоненты напряжений.

За замыкающее систему (1)–(3) соотношение примем условие текущести в виде закона Кулона [4]:

$$|\tau| = c - \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

где  $\tau$  и  $\sigma$  – соответственно касательное и нормальное напряжения на площадке сдвига;  $c$  и  $\varphi$  – сцепление и угол внутреннего трения породы.

Условие текущести (4) можно записать в виде [4]

$$(1 + \alpha) \sigma_\theta - \sigma_r - Y = 0, \quad (5)$$

где  $Y = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$ ,  $\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$  означают соответственно сопротивление течению и коэффициент трения породы.

При предположении о несжимаемости породы за фронтом волны из уравнения неразрывности (3) следует:

$$V(r, t) = a \dot{a} / r. \quad (6)$$

Определив  $\frac{\partial V}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial V}{\partial r}$  из (6) и исключив  $\sigma_\theta$  из (2) с помощью (5), получим

для  $\sigma_r$  уравнение

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\alpha}{1 + \alpha} \frac{\sigma_r}{r} = \frac{Y}{(1 + \alpha)r} + \rho \left( \frac{\ddot{a}a + \dot{a}^2}{r} - \frac{(\dot{a}a)^2}{r^3} \right), \quad (7)$$

общее решение которого имеет вид

$$\sigma_r = \frac{Y}{a} + \rho \left[ \frac{(\ddot{a}a + \dot{a}^2)(1 + \alpha)}{\alpha} + \frac{(\dot{a}a)^2(1 + \alpha)}{2 + \alpha r^2} \right] + F(t) r^{-\frac{\alpha}{1 + \alpha}}. \quad (8)$$

В уравнении (8)  $F(t)$  – подлежащая определению произвольная функция времени.

На границе зоны переизмельчения  $r = b(t)$  для смещения частиц породы  $u_b$  из условия несжимаемости (3) следует:

$$a^2 - a_0^2 = b^2 - (b - u_b)^2. \quad (9)$$

В зоне радиальных трещин при  $b(t) \leq r \leq l(t)$  выполняются соотношения

$$\sigma_\theta = 0, \quad \sigma_r = -P_b b/r, \quad (10)$$

$$\frac{du}{dr} = -(1-\nu^2)P_b b/(Er), \quad u = u_0(t) - (1-\nu^2)(P_b/E)b \ln\left(\frac{r}{a_0}\right), \quad (11)$$

где  $P_b$  – давление при  $r = b$ ;  $u$  – радиальное смещение;  $E$ ,  $\nu$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона;  $u_0(t)$  – произвольная функция времени.

Общее решение в зоне упругости при  $r > l(t)$  имеет вид [6]

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -P - EB/[(1+\nu)r^2], \\ \sigma_\theta &= -P + EB/[(1+\nu)r^2], \\ u &= B/r - (1+\nu)(1-2\nu)rP/E, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $P$  – текущее давление;  $B$  – произвольная постоянная.

Произвольные функции времени  $F(t)$ ,  $u_0(t)$ ,  $B$  определяются из начальных и граничных условий задачи:

1) при  $r = a(t)$

$$\sigma_r = -P(a); \quad (13)$$

2) при  $r = b(t)$

$$(1 + \alpha_2) \sigma_\theta - \sigma_r - Y_2 = 0, \quad u|_{b=0} = u|_{b=0} = u_b. \quad (14)$$

Параметры  $\alpha_2$  и  $Y_2$  в критерии разрушения (14) определяются по пределам прочности при одноосных испытаниях на растяжение  $\sigma_p$  и сжатие  $\sigma_c$ :

$$\alpha_2 = \sigma_c/\sigma_p - 1, \quad Y_2 = \sigma_c. \quad (15)$$

Поскольку  $\sigma_r + \sigma_\theta = -2P$ , то из первого условия (14) имеем

$$\sigma_r|_{b=0} = -[Y_2 + 2P(1 + \alpha_2)]/(2 + \alpha_2). \quad (16)$$

С учетом этого из уравнений (12) находим выражения для константы  $B$  и смещения  $u_b$  при  $r = b$

$$\begin{aligned} B &= \frac{(Y_2 + P\alpha_2)(1+\nu)b^2}{(2 + \alpha_2)E}; \\ u_b &= \frac{(Y_2 + P\alpha_2)(1+\nu)b}{(2 + \alpha_2)E} - \frac{(1+\nu)(1-2\nu)Pb}{E}. \end{aligned} \quad (17)$$

Подставляя в общее решение (8) граничные условия (13)–(14) и используя (15)–(17), для  $a(t)$  получаем камуфлетное уравнение в безразмерном виде:

$$K_1(a)a\ddot{a} + [K_1(a) - K_2(a)]\dot{a}^2 + K_3(a) - P(a) = 0, \quad (18)$$

где

$$K_1(a) = \frac{1+\alpha}{\alpha} \left( m^{1+\alpha} - 1 \right); \quad K_2(a) = \frac{1+\alpha}{2+\alpha} \left( 1 - m^{-\frac{2+\alpha}{1+\alpha}} \right) - \frac{a^2}{2(a^2-1)} m^{1+\alpha};$$

$$K_3(a) = \left( \frac{Y_2 + 2(1+\alpha_2)P(a)}{2+\alpha} + \frac{Y}{\alpha} \right) m^{1+\alpha} - \frac{Y}{\alpha}; \quad m = \sqrt{\frac{E(2+\alpha_2)\left(1 - \frac{1}{\alpha^2}\right)}{(1+\nu)(Y_2 + P\alpha_2)}}.$$

Для второго этапа разрушения, при котором имеются три зоны, камуфлетное уравнение типа (18) получается из следующих граничных условий:

1) на полости взрыва

$$\sigma_r = -P(a) \quad \text{при } r = a(t); \quad (19)$$

2) на границе зоны переизмельчения

$$u|_{b-0} = u|_{b+0}, \quad \sigma|_{b-0} = \sigma|_{b+0} = -\sigma_1; \quad (20)$$

$$\sigma_1 \leq \sigma_c \quad \text{при } r = b(t);$$

3) на фронте радиальных трещин

$$u|_{l-0} = u|_{l+0}, \quad \sigma_{,l0} = \sigma_{,l\infty} = q \quad \text{при } r = l(t). \quad (21)$$

Камуфлетное уравнение для второго этапа взрыва имеет вид

$$\bar{K}_1(a)a\ddot{a} + [\bar{K}_1(a) - \bar{K}_2(a)]\dot{a}^2 + \bar{K}_3(a) - P(a) = 0, \quad (22)$$

где

$$\bar{K}_1(a) = \frac{1+\alpha}{\alpha} \left[ \left( \frac{b}{a} \right)^{1+\alpha} - 1 \right]; \quad \bar{K}_2(a) = \frac{1+\alpha}{2+\alpha} \left[ 1 - \left( \frac{b}{a} \right)^{-\frac{2+\alpha}{1+\alpha}} \right];$$

$$\bar{K}_3(a) = \left( \sigma_1 + \frac{Y}{\alpha} \right) \left[ \left( \frac{b}{a} \right)^{1+\alpha} - 1 \right] + \sigma_1.$$

Интегрирование дифференциального уравнения второго порядка (18) и (22) проводилось численно четырехшаговым методом Рунге–Кутты.

При численном решении задачи рассматривались алевролит, аргиллит и песчаник. В качестве базового ВВ был выбран граммонит 79/21, в качестве испытуемых – углеродсодержащие гранулиты марок УП-1, Д-5 и НП.

На рис. 1 представлены зависимости относительного радиуса полости  $\frac{a}{a_0}$  от относительного времени  $t \frac{c_0}{a_0}$ .

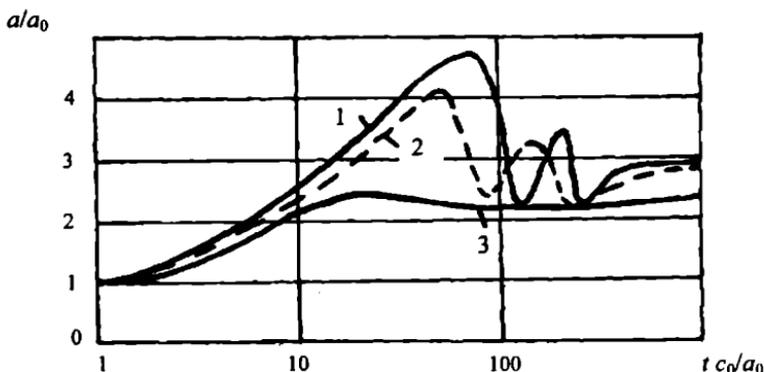


Рис. 1. Зависимость относительного радиуса полости от относительного времени для различных горных пород при взрыве цилиндрического заряда граммонита 79/21: 1 - аргиллит; 2 - алевролит; 3 - песчаник (масштаб по оси абсцисс логарифмический)

Из рисунка видно, что чем меньше крепость породы, тем больше максимальное значение радиуса полости. В более крепкой породе этот максимум достигается быстрее, так как в крепкой породе больше акустическая жесткость и, следовательно, и скорость распространения волн. На рис. 1 видны возвратные движения полости. Для песчаника эти колебания отсутствуют, что объясняется тем, что в крепкой породе при развитии зоны переизмельчения материал в фазе расширения попадает вглубь среды и после остановки не возвращается назад.

Колебание радиуса полости во время развития радиальных трещин приводит к остановкам и последующим нарастаниям длины трещин, а также к колебаниям зоны переизмельчения (рис. 2).

Из рис. 2 следует также, что большие значения величин  $\frac{a}{a_0}$ ,  $\frac{b}{a_0}$  и  $\frac{l}{a_0}$  достигаются в более слабой породе.

Из результатов численных расчетов влияния различных углесодержащих гранулитов на параметры  $\frac{a}{a_0}$ ,  $\frac{b}{a_0}$ ,  $\frac{l}{a_0}$  при взрыве цилиндрических зарядов в горных породах следует, что на развитие зон взрыва наибольшее значение оказывают такие характеристики, как начальное давление, плотность, скорость детонации и показатель политропы. Чем они выше, тем больше радиус

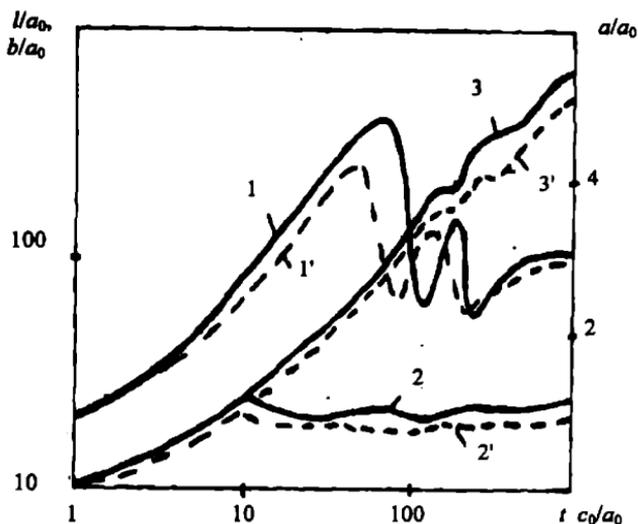


Рис. 2. Зависимости относительных радиусов полости  $\frac{a}{a_0}$  (кривые 1, 1'), зоны переизмельчения  $\frac{b}{a_0}$  (кривые 2, 2') и зоны радиальных трещин  $\frac{l}{a_0}(t)$  (кривые 3, 3') от относительного времени при взрыве цилиндрического заряда графмонита 79/21 в аргиллите (сплошные линии) и алевролите (штриховые линии)

полости. На размеры зон переизмельчения и радиальных трещин детонационные характеристики ВВ оказывают интегральное действие. Чем больше давление и ниже скорость детонации и показатель политропы, тем больше величины радиуса полости, зоны дробления и зоны радиальных трещин. Следует отметить, что физико-механические и детонационные характеристики углесодержащих гранулитов и графмонита 79/21 отличаются незначительно, поэтому и конечные значения  $\frac{a}{a_0}$ ,  $\frac{b}{a_0}$  и  $\frac{l}{a_0}$  близки. Этот факт позволяет сделать вывод о том, что углесодержащие гранулиты местного изготовления могут применяться столь же эффективно, как и промышленные ВВ.

2. Григорян С.С. Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород // Прикладная математика и механика. – 1967. – Т. 31. – Вып. 4. – С. 643–649.

3. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640.

4. Чедвик П., Кокс А., Гопкинс Г. Механика глубинных подземных взрывов. – М.: Мир, 1966. – 126 с.

5. Баум Ф.А., Орленко П.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. – М.: Наука, 1975. – 704 с.

6. Шер Е.Н. Пример расчета движения радиальных трещин, образующихся при взрыве в хрупкой среде в квазистатическом приближении // Физ.-техн. пробл. разраб. полезн. ископаемых, 1982. – № 2. – С. 40–42.

УДК 662. 216. 1

## ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПОРОХОВ И ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

*М.Ф. Буллер, канд. техн. наук (ГосНИИХП, г. Шостка)*

*Розглянуто методи оцінки хімічної стійкості порохів та вибухових речовин в аспекті безпечного проведення робіт по добуванню їх з боєприпасів для повторного використання при підірвних роботах.*

Оценка химической стойкости порохов и взрывчатых веществ (ВВ) приобретает в настоящее время особое значение в связи с их повторным использованием при проведении взрывных работ. Химически стойкие пороха и ВВ – это гарантия безопасного ведения работ на карьерах. Все существующие методы испытания химической стойкости порохов и ВВ основаны на их ускоренном разложении при высоких температурах. В основе этих методов лежит предположение, что разложение порохов и ВВ при высокой температуре идет в том же направлении, что и при низкой, отличаясь только по скорости.

Это предположение справедливо только в том случае, если условия разложения испытуемых порохов и ВВ при низких температурах практически не отличаются от условий разложения при высоких температурах. Поэтому при сравнении тех или иных методов испытания стойкости необходимо главное внимание обращать на условия, при которых протекает разложение.

Принято считать, что прогрессивное ускорение процесса разложения пороха наступает после того, как израсходуется активный стабилизатор. Поэтому при испытании химической стойкости очень важно установить “продолжительность жизни” или так называемый “запас химической прочности” пороха, то есть определить время, в течение которого разложение