

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ПРИ ВЗРЫВЕ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

*В. П. Куринной, канд. техн. наук (НГУ МОН Украины)*

*Выполнена оценка параметров ударных волн в горных породах при взрыве скважинных зарядов взрывчатых веществ.*

*Ключевые слова: ударные волны, скважинные заряды, горные породы, давление в полости взрыва.*

*Виконано оцінку параметрів ударних хвиль у гірських породах під час вибуху свердловинних зарядів вибухових речовин.*

*Ключові слова: ударні хвилі, свердловинні заряди, гірські породи, тиск у порожнині вибуху.*

*The estimation of the shock waves parameters in rocks during blasting of the blasthole explosive charges is carried out.*

*Key words: shock waves, blasthole, rocks, pressure in charge hole.*

Известно, что ударные волны (УВ), возникающие при взрыве взрывчатых веществ (ВВ), приводят к снижению коэффициента полезного действия взрыва. Поэтому рассмотрение вопроса об условиях возникновения ударных волн и о величине потерь в них энергии является весьма актуальным.

Ударные волны, возникающие при взрыве удлиненного заряда, приводят к потерям энергии ВВ. Величину этих потерь можно определить по формуле

$$\varepsilon = \int_{V_0}^{V_y} P(V) dV, \quad (1)$$

где  $P(V) = P_0 V^{k_0} / V^{k(V)}$ ;  $P_0, V_0$  – начальное давление и объем продуктов взрыва (ПВ);  $k_0, k(V)$  – начальный показатель адиабаты и показатель адиабаты при объеме  $V_0, V$ ;  $V_y$  – объем, при котором давление ПВ становится меньше необходимого для распространения УВ.

Зависимость показателя адиабаты от объема можно найти, если записать уравнение Пуассона для ПВ в виде

$$P_i (V_i - \alpha)^\gamma = P_{i+1} (V_{i+1} - \alpha)^\gamma, \quad (2)$$

где  $\gamma, \alpha$  – показатель адиабаты (в обычном смысле) и коволюм.

С другой стороны, это уравнение записывается так:

$$P_i V_i^k = P_{i+1} V_{i+1}^k. \quad (3)$$

Совместное решение уравнений дает

$$k = \gamma V / (V - \alpha). \quad (4)$$

Зависимости давления в полости взрыва для различных ВВ от относительного объема продуктов взрыва для случаев постоянного показателя адиабаты и показателя, зависящего от относительного объема, представлены на рис. 1–3.

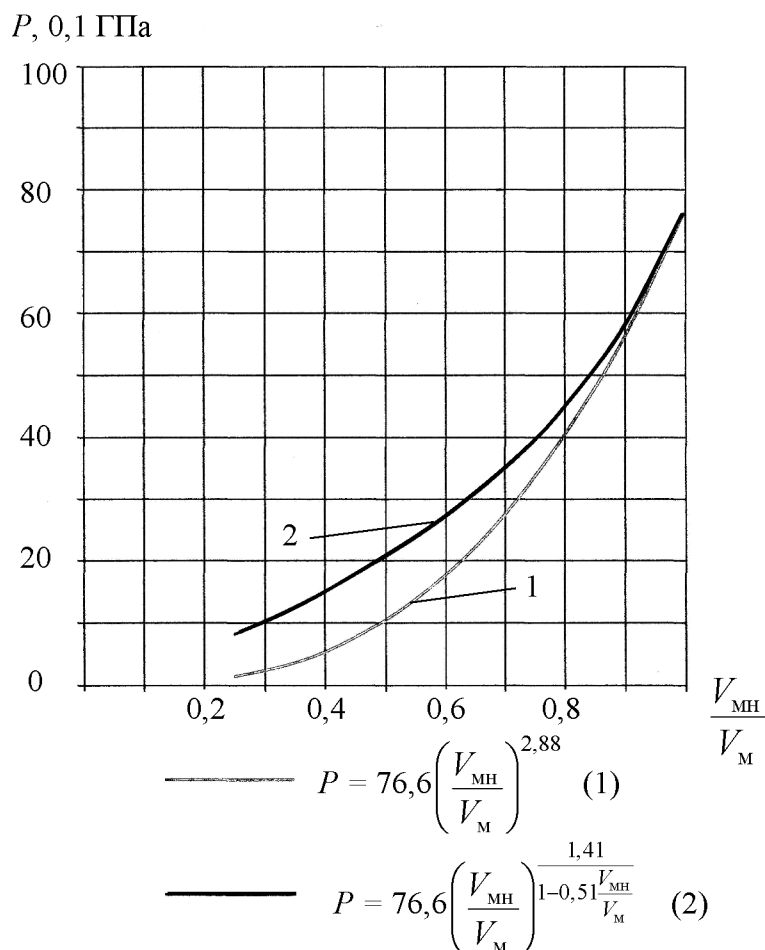


Рис. 1. Зависимости давления в полости взрыва от относительного объема продуктов взрыва для аммонита

Для определения  $V_y$  необходимо знать давление, при котором в породе возникают УВ. За фронтом УВ вещество движется со скоростью  $u$ . Импульс вещества, движущегося через единицу поверхности, для плоской волны равен

$$P = \rho_0 u D_y t, \quad (5)$$

где  $D_y$  и  $\rho_0$  – скорость УВ и плотность породе перед фронтом УВ;  $t$  – время.

Производная импульса (5) по времени дает величину давления ПВ, необходимого лишь для изменения импульса вещества:

$$P_p = \rho_0 u D_y. \quad (6)$$

Для того чтобы в породе возникла УВ, нужно дополнительно создать давление, превышающее ее динамический предел прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$ :

$$P_y > \sigma_{сж}. \quad (7)$$

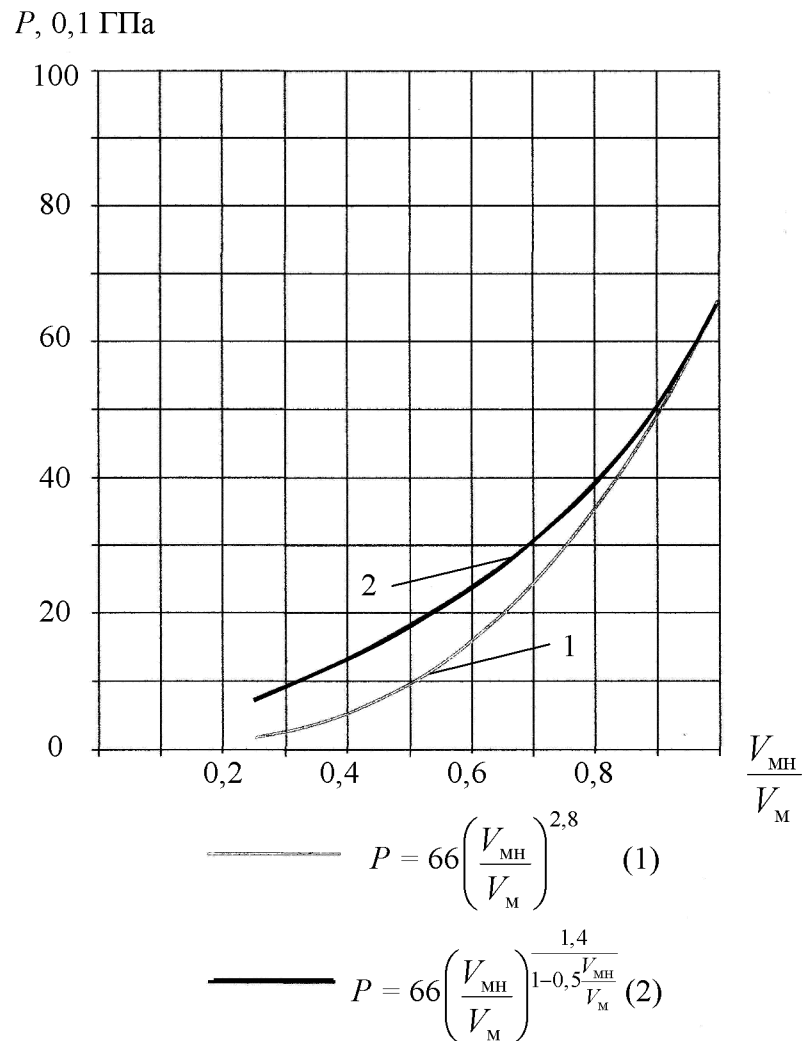


Рис. 2. Зависимости давления в полости взрыва от относительного объема продуктов взрыва для зерногранулита

Это давление больше величины критической сжимающей нагрузки  $P_{кр}$ , вызывающей переход тела в текучее состояние [1]:

$$P_{кр} = ((1 + \nu)/(1 - 2\nu))\sigma_s, \quad (8)$$

где  $\nu$  и  $\sigma_s$  – коэффициент Пуассона и предел прочности породы на сдвиг.

Таким образом, пластическое течение породы может происходить в отсутствие УВ.

Зная  $P_y$ , легко найти объем  $V_y$ , являющийся верхним пределом в формуле (1) [2]:

$$V_y = V_0 (P_0 / P_y)^{1/k}. \quad (9)$$

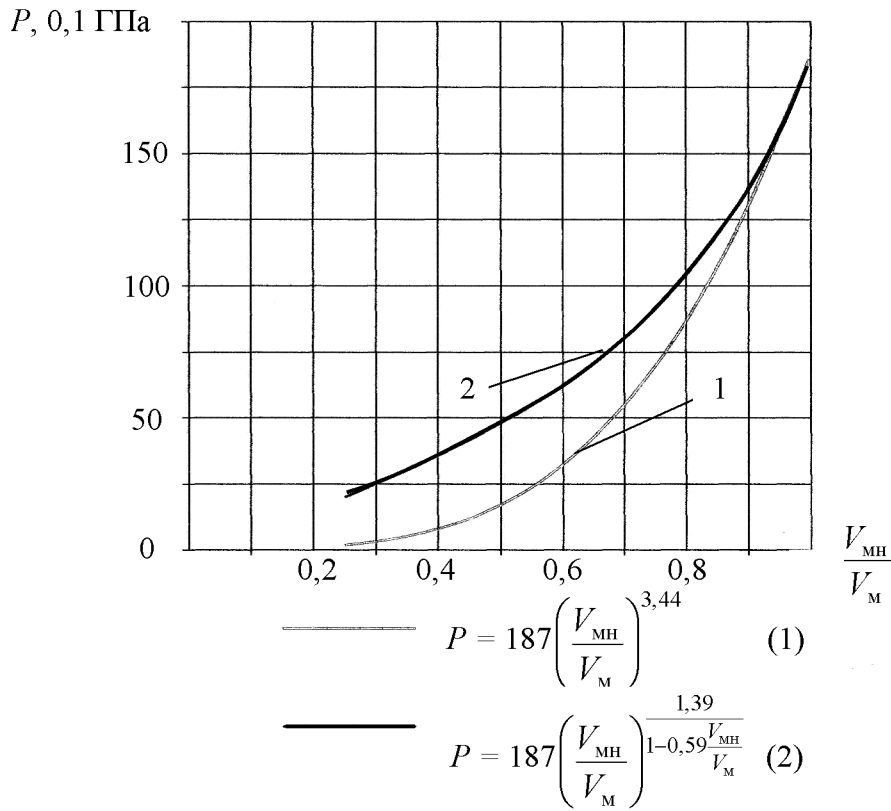


Рис. 3. Зависимость давления в полости взрыва от относительного объема продуктов взрыва для алюмотола

Для определения  $P_p$  по формуле (6) необходимо знать скорость породы за фронтом УВ, плотность  $\rho$  и скорость ударной волны  $D_y$ . Эти величины находят из уравнения (2):

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{P}{A} + 1 \right)^{1/m}; \quad D_y = \frac{P}{\rho_0 u};$$

$$u = \frac{2k_0 D}{k_0^2 - 1} \left( 1 - \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k_0 - 1}{2k_0}} = \sqrt{\frac{P}{P_0} \left( 1 - \left( 1 + \frac{P}{A} \right) \right)^{-1/m}}, \quad (10)$$

где  $\rho_0$  – начальная плотность породы;  $A$ ,  $m$  – эмпирические коэффициенты (для гранита  $A = 2,35 \cdot 10^{10}$  Па,  $m = 4$ );  $D$  – скорость детонации ВВ.

Скорость движения породы в зависимости от расстояния до оси скважины запишется в виде

$$u = u_H \cdot \frac{r_n}{r} = \sqrt{\frac{p_H \alpha}{\rho_0}} \cdot \frac{r_0}{r} \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{2\pi \cdot p_H}{\alpha \cdot \rho_0}} \cdot \frac{t}{r_0} \right)^{\frac{1}{n+1}}. \quad (11)$$

Зависимость скорости движения породы от расстояния до оси скважины в момент времени  $t = 0,05$  с представлена на рис. 4.

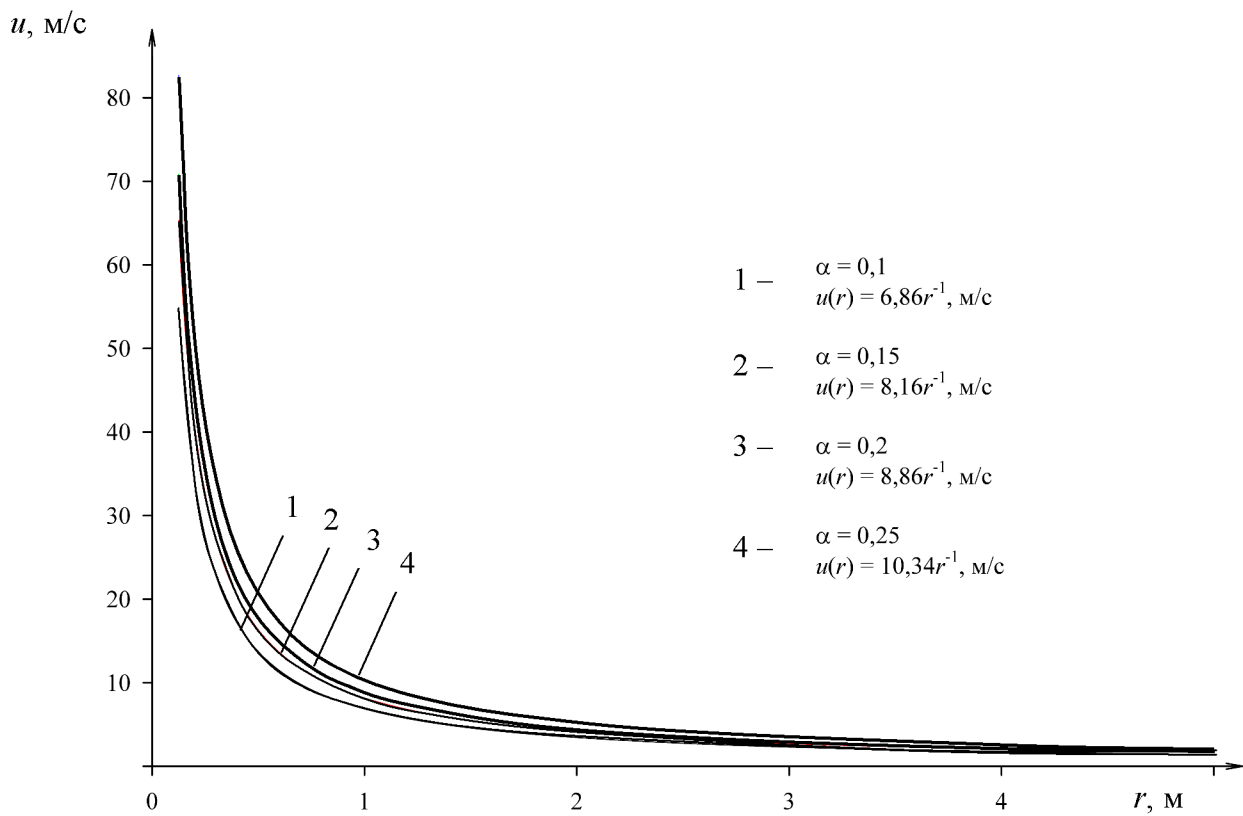


Рис. 4. Скорость движения породы в зависимости от расстояния до оси скважины в момент времени  $t = 0,05$  с

Предельное давление  $P_{пр}$  можно оценить по росту скорости волны напряжения  $C$  в сжатой УВ породе. Увеличение скорости  $C$  должно быть достаточным, чтобы получался сходящийся пучок характеристик, пересекающихся в непосредственной близости от стенок скважины. Скорость  $C$  находится из формулы

$$C = \sqrt{\frac{Am}{\rho_0} \left(1 + \frac{P}{A}\right)^{\frac{m-1}{2m}}}. \quad (12)$$

Результаты расчетов, выполненных для ВВ с  $P_0 = 4 \cdot 10^9$  Па,  $k_0 = 3$ ,  $D = 4200$  м/с в граните с  $\rho_0 = 2500$  кг/м<sup>3</sup>,  $m = 4$ ,  $A = 2,35 \cdot 10^{10}$  Па, приведены в таблице.

#### Начальные параметры ударной волны в граните

$u$ , м/с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$P$ , ГПа	$D_y$ , м/с	$P_y$ , ГПа	$V_y$ , м <sup>3</sup>	$k(V_y)$	$\epsilon$ , ГДж/м <sup>3</sup>
248	2925	3,997	5514	1,2	1,5	2,58	1,17

Приведенные данные показывают, что потери энергии ВВ в УВ велики, поэтому при управлении процессом разрушения горных пород взрывом важно иметь информацию о параметрах УВ в среде: скорости ударной волны, давления на ее фронте, а также скорости породы за фронтом УВ. Для определения начальных параметров УВ в породе необходимо учитывать соотношение скоростей детонационных и ударных волн [3]. При  $D > D_y$  начальные параметры УВ в породе определяются из системы уравнений (10). При  $D = D_y$  порода у

стенки скважины находится в напряженном состоянии и начальные параметры определяются из уравнений

$$u = \frac{2k_0 D}{k_0^2 - 1} \left( 1 - \frac{P - P_1}{P_0} \right)^{\frac{k_0 - 1}{2k_0}} = \sqrt{\frac{P - P_1}{\rho_0} \left( 1 - \left( 1 + \frac{P - P_1}{A} \right)^{-\frac{1}{m}} \right)}; D = \frac{P - P_1}{\rho_0 u}, \quad (13)$$

где  $P_1$  – давление в породе у стенки скважины в месте формирования УВ.

В случае  $D < D_y$  УВ обгоняет детонационную волну и выходит на свободную поверхность скважины, что приводит к возникновению волны разгрузки. При этом порода у скважины приобретает скорость  $u$ , направленную к оси скважины. Давление  $P$ , скорости УВ и породы за фронтом УВ можно определить из системы уравнений

$$u = u_0 - u_p = \frac{2k_0 D}{k_0^2 - 1} \left( 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k_0 - 1}{2k_0}} \right) - u_p = \sqrt{\frac{P}{\rho_0} \left( 1 - \left( 1 + \frac{P}{A} \right)^{-\frac{1}{m}} \right)}; D = \frac{P}{\rho_0 u}. \quad (14)$$

Для уменьшения потерь на УВ можно вводить в ВВ инертные добавки, которые снижают  $P_0$  и увеличивают ширину зоны химической реакции  $h$ . Кривая Гюгонио для ВВ с добавками может иметь излом [4]. Возникновение УВ в породе возможно на расстоянии  $l$  от стенки скважины, которое можно оценить из следующего соотношения:

$$\frac{l}{c_1} = \frac{h}{D} + \frac{l}{c_2} \Leftrightarrow l = \frac{c_1 c_2 h}{D(c_2 - c_1)} \approx \frac{c_1 h}{D - c_1}, \quad (15)$$

где  $c_1, c_2$  – скорости волны напряжения, начинающей и заканчивающей формирование УВ.

Таким образом, выбирая соответствующие размеры частиц и термодинамические параметры вещества, можно не только изменять максимальное давление в полости взрыва, но и управлять им вдоль образующей скважины. Добавки инертного вещества в ВВ препятствуют возникновению УВ в породах, уменьшая энергетические потери при взрыве ВВ.

1. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах / Ляхов Г. М. – М.: Недра, 1974. – 192 с.

2. Баум Ф. А. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. – М.: Наука, 1075. – 704 с.

3. Баранов Е. Г. Влияние промежутков из пористых низкоплотных материалов на эффективность взрыва скважинного заряда / Е. Г. Баранов, В. Н. Вилянский, О. Н. Оберемок, В. П. Куринной // Изв. вузов. Горный журнал. – 1990. – № 5. – С. 72–76.

4. Баранов Е. Г. Управление механизмом разрушения горного массива цилиндрическими зарядами взрывчатого вещества / Е. Г. Баранов, В. П. Куринной // Управление процессами разрушения горных пород. – К.: Наук. думка, 1984. – С. 37–42.