

УДК 532.593

Соболев В.В., докт. техн. наук., проф., Куливар В.В., аспирант, Мельников Д.В., аспирант

*Национальный технический университет «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина*

Кириченко А.Л., к-т. техн. наук, главный технолог

*ГП «НПО «Павлоградский химический завод», г. Павлоград, Украина*

## **ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ УДАРНОГО СЖАТИЯ ПОРОДЫ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗРЫВЕ ЗАРЯДА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА**

При решении практических и теоретических задач в области воздействия взрыва на материалы необходимо знание ударных адиабат продуктов взрыва для установления количественной зависимости между параметрами детонации взрывчатого вещества (ВВ) и ударных волн в материале [1-3]. В данной работе рассматривается удобный для практики графический способ оценки начального давления в каменных углях и различных породах на примере взрывания скважинных и шпуровых зарядов ВВ.

Уравнение состояния горной породы основано на ее ударной адиабате, которая для данной породы в определенном диапазоне давлений может быть выражена известной линейной зависимостью скорости ударной волны  $D_{ув}$  от массовой скорости частиц среды за фронтом волны  $u$ :

$$D_{ув} = a + bu,$$

где:  $a$  и  $b$  – коэффициенты.

Многолетняя практика взрывных работ, проводимых на горных предприятиях, свидетельствует о том, что используются промышленные ВВ, круг которых для каждого вида пород характеризуется близкими значениями скорости детонации  $D_{ВВ}$ . Плотности зарядов ВВ как правило не выходят за пределы диапазона 1000-1250 кг/м<sup>3</sup>.

В расчетах пористость горных пород не учитывалась [4,5]. Если акустическая жесткость породы превышает акустическую жесткость продуктов взрыва (что справедливо для многих горных пород), то при выходе детонационной волны на границу раздела порода–ВВ в породе и продуктах взрыва распространяются ударные волны, (рис. 1 и 2). Давление и скорость за фронтом обеих волн  $P^*$ ,  $u^*$  лежат на пересечении ударных адиабат породы (OD) и продуктов детонации (AC). Расчеты проводились с использованием известных выражений [1-3]:

$$\rho_D(D_1 + u_D) = \rho^*(u^* + D_1), \quad (1)$$

$$P^* - P_D = \rho_D(u_D + D_1)(u_D - u^*), \quad (2)$$

$$P_1 D_2 = \rho^{**} (D_2 - u^*), \quad (3)$$

$$P = \rho_1 D_2 u^*, \quad (4)$$

$$P^* = \rho_1 (a + bu^*) u^*, \quad (5)$$

$$P^* = A \rho^{*k}, \quad (6)$$

где:  $P_D$ ,  $\rho_D$  и  $u_D$  – соответственно давление, плотность и массовая скорость частиц за фронтом детонационной волны;  $P^*$ ,  $u^*$ ,  $\rho^*$  – соответственно давление, скорость частиц и плотность в ПВ за фронтом отраженной от поверхности породы (границы раздела) ударной волны;  $P^*$ ,  $u^*$ ,  $\rho^{**}$  – давление, скорость частиц и плотность породы за ударной волной, распространяющейся от границы раздела;  $P$ ,  $\rho_1$  и  $u$  – начальные параметры (давление, массовая скорость частиц и плотность) в породе;  $D_1$  и  $D_2$  – соответственно скорость ударной волны в ПВ и в породе

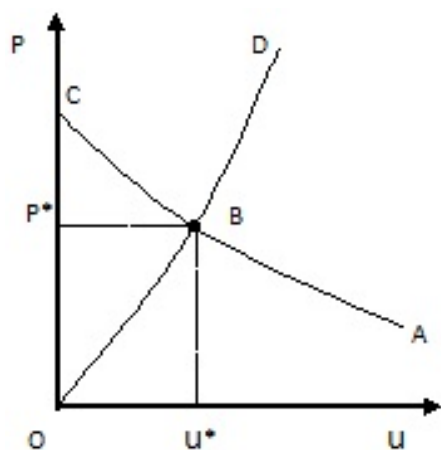


Рис. 1. Общий вид P–u-диаграмм

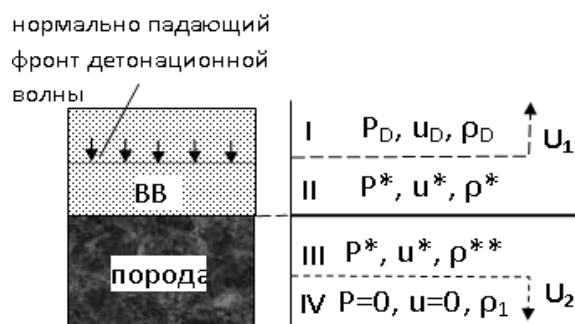


Рис. 2. Плоские волны в системе ВВ-порода (контактный взрыв)

Уравнения (1) и (2) – законы сохранения на ударной волне **I** в продуктах взрыва. Соотношения (3) и (4) справедливы для ударной волны **III** в породе, уравнение (4) – это диаграмма состояния породы, а (6) определяет политропу продуктов взрыва. Этих шести уравнений достаточно для определения  $P^*$  и  $u^*$ . В расчетах использованы экспериментальные значения массовой скорости патронированных эмульсионных ВВ ЕРА [6.7], некоторых горных пород и стали [8], каменных углей марок Г, К, Ж, ОС, Т (погрешность оценок находится в пределах 7- 10%), Ударные адиабаты горных пород, угля и изоэнтропы продуктов детонации ВВ представлены в координатах «P-u» на рис. 3. Видно, что начальному давлению в породе на границе ВВ-порода соответствуют точки пересечения ударных адиабат пород с ударными адиабатами продуктов детонации. Точки А, А<sup>1</sup> и В, В<sup>1</sup> на ударных адиабатах ЭВВ «ЕРА-РЗ» и тротила показывают соответственно величину давления в точке Жуге (А и В) и при соударении с абсолютно жесткой стенкой (А<sup>1</sup> и В<sup>1</sup>). Все остальные значения

давлений на границе с породами ( $P^*$ ) лежат между этими крайними значениями. Все оценки производились для условия нормального падения фронта детонации на поверхность породы.

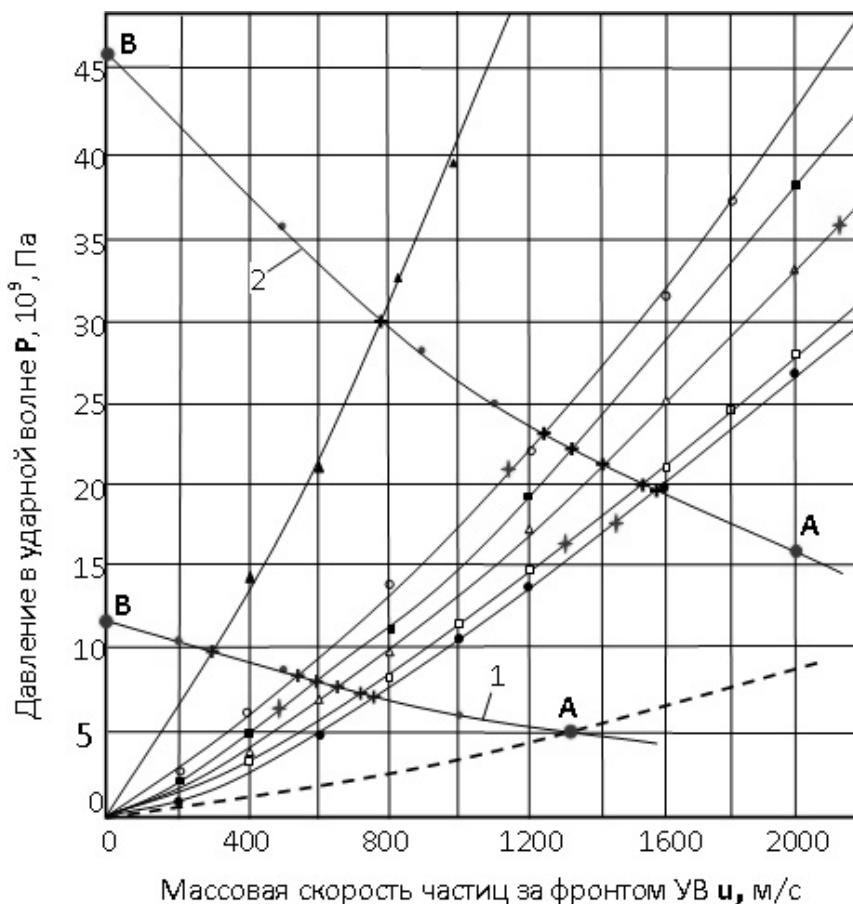


Рис. 3 Ударные адиабаты горных пород, угля, изэнтропы ПД ВВ:

● – песчаник; △ – кварц; ○ – доломитный кирпич; ▲ – малоуглеродистая сталь ( $D=3,8+1,58u$ ); □ – гранит; ■ – известняк; ✦ – пороговое давление, при котором происходит термоупругое разрушение породы; + – начальное давление в породе при взрыве прилегающего заряда ВВ (тротила); + – начальное давление в породе при взрыве прилегающего заряда ЭВВ; 1 – изэнтропа продуктов детонации ЭВВ ( $\rho_0=1120 \text{ кг/м}^3$ ;  $D=4175 \text{ м/с}$ ); 2 – изэнтропа продуктов детонации тротила ( $\rho_0=1637 \text{ кг/м}^3$ ;  $D=6940 \text{ м/с}$ ); пунктирная кривая – обобщенная ударная адиабата каменных углей

Какой интерес могут представлять зависимости, приведенные на рис. 3? Например, в случае применения ЭВВ «ЕРА-РЗ» вероятность переизмельчения будет уменьшаться, поскольку давление на границе ВВ-порода меньше пороговых давлений для песчаника, доломитного кирпича и гранита. Значение порогового давления известняка мало отличается от давления продуктов взрыва на границе ВВ-порода, однако эта оценка может изменяться в случае изменения физико-механических характеристик известняка.

Для песчаника, доломитного кирпича, известняка и гранита пороговые значения давления, при котором начинается интенсивное шелушение стенок шпура или скважины, меньше, чем давление на границе тротил-порода [8]. В этом случае порода за счет возникающих термонапряжений интенсивно разрушается в ближней зоне взрыва.

С нашей точки зрения наиболее интересный результат заключается в том, что патронированные ЭВВ марки «ЕРА» с химической газификацией, используемые в угольных шахтах, имеют мало отличающиеся взрывчатые характеристики, то их ударные адиабаты отличаются всего на 3-5%. Ударные адиабаты углей марок Г, Ж, К, ОС практически совпадают, что дает возможность производить оценку начального давления без заметной погрешности. Другими словами, для оценки давления на границе ЭВВ–каменный уголь достаточно знать давление в точке Чепмена-Жуге.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альтшулер Л.В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // Успехи физических наук. – 1965. – Т. 85, №2. – С.197–258.
2. Кузнецов Н.М., Шведов К.К. Детонационные и ударные адиабаты продуктов гексогена // Физика горения и взрыва. – 1969. – №3. – С. 362–369.
3. Свойства конденсированных веществ при высоких давлениях и температурах / Под ред. д-ра физ.-матр. Наук Р.Ф.Трунина. – Арзамас: ВНИИЭФ, 1992. – 398 с.
4. Соболев В.В., Чернай А.В. Применение ударных волн в экспериментальной минералогии // Минералогический журнал. – 1995. – №3. – С. 15-25.
5. Соболев В.В., Кириченко А.Л. Метод построения ударных адиабат и численный анализ ударного сжатия горных пород // X Міжнар. наук.-техн. Конф. «Розробка, використання й екологічна безпека сучасних гранульованих та емульсійних вибухових речовин, Кошице 2-9 лютого 2014. - Кременчук: КрНУ, 2014. – С. 12–16.
6. Безопасность процессов производства и применения эмульсионных взрывчатых веществ с компонентами утилизируемых вооружений / Л.И.Шиман, Е.Б.Устименко, В.И.Голинько, В.В.Соболев. – Днепропетровск: ЛИРА, 2013. – 526 с.
7. Соболев В.В., Кириченко А.Л., Соляник О.В. Оценка давления на стенки зарядной камеры с учетом изоэнтропы продуктов детонации ВВ и ударной адиабаты породы // Материали XI Міжнарод. Научно-технич. конференції «Розробка, використання і екологічна безпека сучасних гранульованих і емульсійних вибухових речовин» Кременчук-Сваліява, 01-07 лютого 2015 г. – Кременчук:КрНУ, 2015. – С. 7–9
8. Войтенко А.Е., Соболев В.В., Прокудин А.З. и др. Возможная причина измельчения горных пород в ближней зоне взрыва // Высокоэнергетические системы, процессы и их модели. – Д.: Акцент ПП, 2013. – С. 247–254.