УДК 622.235

М.Г.МЕНЖУЛИН, В.Е.БРОВИН
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*), *Россия*

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ И ОБЪЕМНЫХ ВОЛН В ОКРЕСТНОСТИ ПОЛОСТИ ПРИ ВЗРЫВЕ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Исследовано формирование продольных и объемных волн в окрестности полости взрывной камеры. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для оценки параметров волн напряжений на стенки взрывной полости может быть использована ударная адиабата упругого предвестника, так как наблюдается схожесть между адиабатами упругого предвестника и волны объемного сжатия.

Formation of longitudinal and volumetric waves in a vicinity of a cavity of the explosive chamber is investigated. By the received results the conclusion is made, that for an estimation of parameters of waves of pressure on walls of an explosive cavity the shock adiabatic curve of an elastic harbinger, because of affinity of adiabatic curves of an elastic harbinger and a wave of volumetric compression can be used.

Воздействие взрыва на окружающую среду определяется уровнем взрывных нагрузок на различных расстояниях от заряда. В настоящее время оценка нагрузок на среду при взрыве цилиндрических зарядов основывается на использовании эмпирических соотношений для параметров волн напряжений [1, 2]. Выполнение теоретических решений связано с привлечением серьезных допущений и упрощенных уравнений состояния [3, 4]. Область применения эмпирических соотношений ограничена расстояниями от заряда $\bar{r} > (8 \div 10) R_{0ç}$, где $R_{0ç}$ – радиус заряда. В то же время основные затраты энергии при взрыве происходят в области расстояний $1 \le \bar{r} \le (8 \div 10) R_{0ç}$. Для оценок параметров волн напряжений в этом диапазоне важное значение имеют параметры нагрузок в среде на границе с зарядом непосредственно после преломления детонационной волны. Взаимодействие детонационной волны со стенкой взрывной камеры зависит от способа инициирования. Фронт детонационной волны при осевом инициировании направлен по нормали к стенке взрывной камеры, при точечном инициировании – перпендикулярен оси заряда и со стенкой взрывной камеры взаимодействует зафронтовая часть детонационной волны. Кроме того, в реальных условиях плотный контакт между ВВ и стенкой взрывной камеры отсутствует.

Нормальное падение фронта детонационной волны на стенку взрывной камеры может быть рассмотрено на основании общих положений теории распада произвольного разрыва.

При подходе фронта детонационной волны к границе раздела между поверхностью ВВ и стенкой давление и скорость частиц во ВВ составляют $P_д$ и $u_д$.

В окружающей среде эти параметры соответственно $P_о$, $u_о$. Согласно общим законам механики после преломления детонационной волны давление и скорость частиц по обе стороны от границы раздела должны быть равны друг другу. В результате преломления в окружающей среде формируется ударная волна, параметры которой $P_ф$, $u_ф$ в общем случае не совпадают с $P_д$, $u_д$. Равенство давлений и массовых скоростей по обе стороны от границы раздела обеспечивается за счет изменения параметров в продуктах детонации. Характер таких процессов зави-

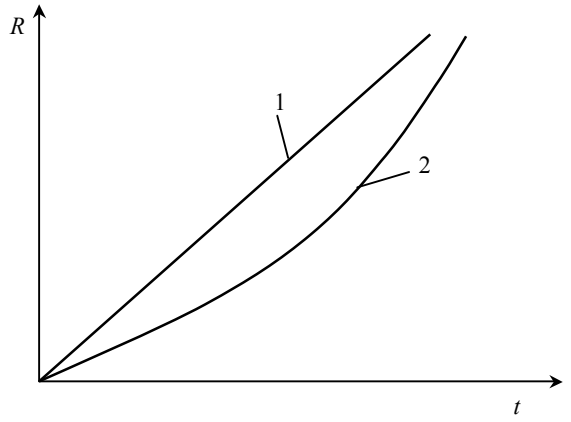


Рис.1. Зависимость распространения продольной (1) и объемной (2) волн от поверхности заряда

сит от соотношения между состоянием среды на фронте волны напряжения и детонационной волны.

После преломления детонационной волны в окружающую твердую среду в последней возникает двухволновая картина. Первой распространяется упругая продольная волна со скоростью C_l. За ней следует волна объемного сжатия C_v [5]. Величины C_l и C_v связаны соотношением [5]

$$C_v = \sqrt{\frac{1+\nu}{3(1-\nu)}} C_l , \qquad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

На рис.1 представлены годографы $R(t)$ для обеих волн – продольной и объемной, распространяющихся от поверхности заряда. Для упругой волны справедливо соотношение

$$P = \rho_0 C_l u , \qquad (2)$$

которое можно рассматривать как ударную адиабату.

Наличие упругого предвестника зарегистрировано в работах [5].

Для плавленого кварца и горных пород регистрируется только одна волна с плавным нарастанием напряжений до максимума и последующим спадом. Можно предположить, что и в этом случае распространяются продольные и объемные волны, однако особенности строения горных пород способствуют формированию протяженной области нарастания напряжений до максимума и отсутствию фронтов ударных волн. Горные породы представляют собой полиминеральные конгломераты, состоящие из разнотипных минеральных зерен различных размеров и формы. Минеральные зерна скреплены цементирующими прослойками различных составов. В естественном состоянии в горных породах обнаруживается большое количество микро- и макротрещин.

Все это создает большую неоднородность среды, способствующей возникновению различных значений локальных напряжений и скоростей распространения возмущений, их взаимодействию с неоднородностями и друг с другом. Тем не менее можно считать, что наиболее быстрые возмущения обусловлены продольной волной. Для обеих этих волн существуют свои ударные адиабаты. Для продольной упругой волны ударная адиабата описывается формулой (2). Для волны объемного сжатия на основании многочисленных экспериментальных данных ударную адиабату горной породы примем в виде

$$N = C_v + ku , \qquad (3)$$

где $k = (\Gamma + 1)/2$; Γ – коэффициент Грюнайзена [5],

$$\tilde{A} = \frac{\alpha V}{\beta C_v} ;$$

α – коэффициент объемного теплового расширения, $\alpha = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$; β – коэффициент сжимаемости, $\beta = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_T$.

Точка $P_д$, $u_д$ может находиться выше (A) ударной адиабаты среды E или ниже (B) (рис.2). В первом случае в продуктах детонации после преломления возникает волна разрежения, характеризующаяся уменьшением давления и увеличением скорости частиц в продуктах детонации на величину Δu.

В точке C давления и скорости частиц в окружающей среде и в продуктах детонации по обе стороны от границы станут одинаковыми.

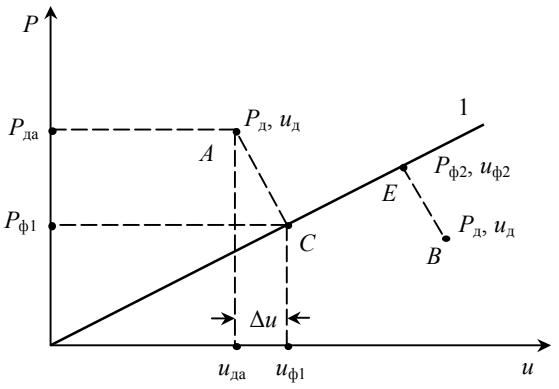


Рис.2. Преломление детонационной волны в окружающую среду

1 – ударная адиабата среды; *A*, *B* – состояния на фронте детонационной волны

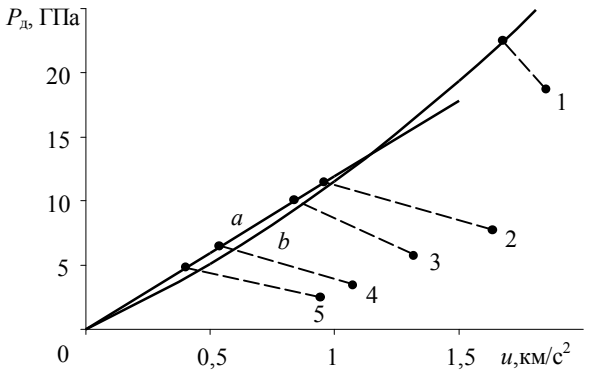


Рис.3 Ударные адиабаты предвестника (*a*), волны объемного сжатия (*b*) и состояния на фронте детонационной волны некоторых видов ВВ

1 – ТЭН; 2 – аммонит 6ЖВ; 3 – аммонит ПЖВ-20; 4 – граммонит 79/21; 5 – игданит

Ударную адиабату (3) совместно с условием $P_ф = \rho_0 N u$ преобразуем к виду

$$P_ф = \rho_0 (C_v + ku)u . \qquad (4)$$

Приращение скорости в продуктах детонации

$$\Delta u = \frac{2\gamma D}{\gamma^2 - 1}\left[1 - \left(\frac{P_ф}{P_д}\right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}\right], \qquad (5)$$

где D – скорость детонационной волны; $P_ф$ – давление на фронте ударной волны в окружающей заряд среде; $P_д$ – давление на фронте детонационной волны.

Суммарная скорость частиц в продуктах детонации после распада разрыва

$$u_\Sigma = u_д + \Delta u . \qquad (6)$$

Такой же должна быть и скорость частиц на фронте образовавшейся в окружающей среде ударной волны.

Ударная адиабата горной породы описывается формулами (2) или (4). Конкретное выражение для ударной адиабаты горной породы принимается исходя из результатов вычислений значений $P_ф$, которое должно быть максимальным.

При положении точки $P_д$, $u_д$ ниже ударной адиабаты горной породы для выполнения граничного условия равенства давлений и массовых скоростей частиц по обе стороны от границы раздела между ВВ и породой по продуктам детонации должна распространяться ударная волна вторичного сжатия, а в горной породе – ударная волна.

Принимая, что состояние продуктов детонации описывается адиабатой Пуассона и параметры начального состояния среды при вторичном ударном сжатии определяются значениями параметров на фронте детонационной волны, получим соотношение для скорости частиц в продуктах детонации после преломления детонационной волны:

$$u_\Sigma = u_д - \frac{\sqrt{2\gamma}(P_ф - P_д)}{\{\rho_{0ВВ}(\gamma-1)[(P_ф - P_д)(\gamma+1) - P_д(\gamma+1)]\}^{1/2}} .$$

Эта скорость совпадает со скоростью на фронте преломленной в горную породу ударной волны. Таким образом, давление в преломленной ударной волне определится из соотношения:

$$u_д - \frac{\sqrt{2\gamma}(P_ф - P_д)}{\{\rho_{0ВВ}(\gamma+1)[(P_ф - P_д)(\gamma+1) - P_д(\gamma+1)]\}^{1/2}} =$$

$$= u_{ó}(P_{ó}),$$

где $u_ф(P_ф)$ описывается формулами (2) или (3), а их конкретное выражение выбирается

из условия максимального из двух вычисленных значений $P_ф$.

На рис.3 представлены ударные адиабаты предвестника и волны объемного сжатия в граните, а также положения точек, соответствующих давлениям на фронте детонационной волны выбранных видов ВВ.

Согласно результатам расчетов наблюдается схожесть между адиабатами горных пород упругого предвестника и волны объемного сжатия, в связи с этим для оценки параметров волн напряжений на стенки взрывной полости может быть использована ударная адиабата упругого предвестника.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ванягин И.Ф.* Некоторые результаты экспериментального исследования волн напряжений в скальных породах / И.Ф.Ванягин, В.Г.Мыркин // Народнохозяйственное использование энергии взрыва. Новосибирск, 1959.

2. Волны напряжений в обводненном трещиноватом массиве: Учеб. пособие / В.А.Боровиков, И.Ф.Ванягин, М.Г.Менжулин, С.В.Цирель / ЛГИ. Л., 1989.

3. *Вовк А.А.* Основы прикладной геодинамики взрыва. Киев: Наукова думка, 1976.

4. Механический эффект подземного взрыва / В.Н.Родионов, В.В.Адушкин и др. М.: Недра, 1971.

5. *Райс М.* Сжатие твердых тел сильными ударными волнами / М.Райс, Р.Мак-Куин, Дж.Уолш // Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях. М.: Мир, 1965.