

Макеевка-Донбасс, 2003. – 101 с.

2. Левкин Н.Б., Кузьменко Н.С., Якуба Л.Н. О программе повышения безопасности труда на шахтах // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. / МакНИИ-Макеевка. – 2003. – С. 149-155.

3. Брюханов А.М., Кудинов Ю.В. О состоянии научных исследований по «Программе повышения безопасности труда на угольных шахтах» // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр./МакНИИ. – Макеевка. – 2003. – С. 11-16.

**УДК 534.222.2**

И.П. Гаркуша, В.П. Куринной

## **ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ГРУНТЕ**

Розглянуто особливості розповсюдження ударної хвилі у ґрунті.

## **THE CYLINDRICAL PERCUSSION WAVES IN THE SOIL**

The especial of cylindrical percussion waves propagation are described

В Украине достаточно часто используют взрывы на выброс и сброс горной породы. В настоящее время теоретическое обоснование этих процессов развито недостаточно. Связано это с тем, что выражения для ударных адиабат многокомпонентных сред очень громоздки и не определены точно. Громоздки и в основном численные расчеты затрудняют выяснение закономерностей процессов, протекающих при взрыве на выброс. В данной работе предлагается модель ударной сжимаемости грунта, которая позволяет получить в первом приближении простые формулы, определяющие параметры процессов, протекающих в грунте при взрыве.

Рассмотрим взрыв бесконечно длинного цилиндрического заряда фугасного взрывчатого вещества в грунте. Детонация мгновенная. Грунт состоит из минеральных зерен, связующего цемента, воды и воздуха. Ударную адиабату грунта можно рассматривать как сумму адиабат для каждой компоненты. Расчеты показывают, что при давлениях, развиваемых при взрыве фугасных взрывчатых веществ (ВВ) можно пренебречь сжимаемостью минеральных зерен и воды. При давлениях, больших 10 МПа, можно пренебречь объемом воздуха в грунте. Таким образом, если плотность грунта  $\rho_0$ , а относительный объем воздуха пор  $\alpha$ , то плотность грунта за фронтом ударной волны (УВ)  $\rho = \rho_0/(1-\alpha)$ .

С целью получения некоторых соотношений для цилиндрических УВ рассмотрим цилиндрическую полость с начальным радиусом  $r_0$ , расширяющуюся с начальной скоростью  $u_0$  (рис. 1).

В момент времени  $t$  радиус полости будет  $r_n$ . В породе распространяется цилиндрическая УВ со скоростью  $D$ . Скорость породы за фронтом УВ  $u$ . Закон сохранения массы можно записать в виде:

$$\rho_0 r d\beta dr D dt H = \rho r d\beta (D - u) dt \cdot H, \quad (1)$$

где  $d\beta$  – угол клина;  $dt$  – дифференциал времени;  $H$  – высота части заряда;

$dr$  – дифференциал расстояния.

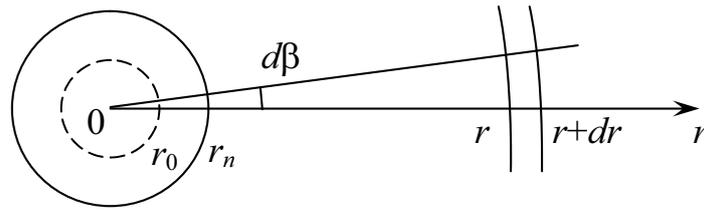


Рис. 1 – Расчетная схема определения параметров ударной волны

После сокращения выражение (1) записывается следующим образом:

$$\rho_0 D = \rho(D - u). \quad (2)$$

Скорость породы за фронтом УВ имеет вид

$$u = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) D. \quad (3)$$

Применяя закон Ньютона

$$P \cdot rd\beta H dt = \rho_0 D rd\beta H dt \cdot u, \quad (4)$$

где  $P$  – давление на фронте УВ,  
получаем

$$P = \rho_0 u D. \quad (5)$$

Из (2) и (5) получим выражение для скорости породы за фронтом УВ:

$$u = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}\right) P}. \quad (6)$$

Выражение для скорости цилиндрической волны получим, решая совместно уравнения (2) и (6):

$$D = \frac{1}{\rho_0} \sqrt{\frac{P}{\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}}} = \sqrt{\frac{P}{\rho_0 \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)}}. \quad (7)$$

Закон сохранения энергии в нашем случае записывается в виде

$$\rho_0 D rd\beta H dt \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2}\right) = P \cdot rd\beta H dt, \quad (8)$$

где  $\varepsilon$  – внутренняя энергия единицы массы породы за фронтом УВ.

Отсюда получаем выражение для энергии единицы массы породы за фронтом УВ

$$\varepsilon = \frac{Pu}{\rho_0 D} - \frac{u^2}{2} = \frac{P}{2} \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right). \quad (9)$$

Для единицы объема породы энергия  $w$  равна

$$w = \frac{Pu}{D} - \frac{\rho u^2}{2}. \quad (10)$$

Подстановка значения для плотности грунта за фронтом ударной волны в (2) дает следующее значение для скорости породы за фронтом УВ:

$$u = \alpha D. \quad (11)$$

Тогда давление за фронтом УВ будет равно

$$P = \alpha \rho_0 u^2. \quad (12)$$

Выражение для массовой скорости породы за фронтом УВ (6) записывается в этом случае в виде:

$$u = \sqrt{\frac{\alpha P}{\rho_0}}, \quad (13)$$

а скорость УВ будет равна

$$D = \sqrt{\frac{P}{\alpha \rho}}. \quad (14)$$

Энергия единицы массы породы за фронтом УВ равна

$$\varepsilon = \frac{P\alpha}{2\rho_0}. \quad (15)$$

Объемная плотность энергии породы имеет вид:

$$w = \frac{P\alpha}{2}. \quad (16)$$

При смещении стенок полости на  $dr_n$  перемещается масса породы  $dm$ , равная:

$$dm = r_n d\beta H dr_n \rho . \quad (17)$$

На расстоянии  $r$  от оси скважины перемещение массы  $dm$  равно

$$dm = r d\beta H dr \rho . \quad (18)$$

Из (17) и (18) вытекает, что

$$r_n u_n = r u . \quad (19)$$

В случае, когда радиус полости взрыва равен  $r_n$ , объем вытесненной породы при ее расширении равен  $V$

$$V = \pi (r_n^2 - r_0^2) H . \quad (20)$$

Объем сомкнувшихся пор будет равен  $V_1$

$$V_1 = \pi (r_y^2 - r_n^2) H \cdot \alpha , \quad (21)$$

где  $r_y$  – радиус переднего фронта УВ.

Так как  $V = V_1$ , то, приравняв правы части, получим

$$r_y = \sqrt{((1 + \alpha)r_n^2 - r_0^2) / \alpha} . \quad (22)$$

Давление в породе на расстоянии  $r$  от оси скважины равно  $P(r)$

$$P(r) = \rho_0 \alpha u^2 = \rho_0 \alpha \left( \frac{r_n}{r} \right)^2 u_n^2 = P_n \left( \frac{r_n}{r} \right)^2 , \quad (23)$$

где  $P_n$  – давление в полости взрыва

Давление в полости взрыва изменяется с радиусом самой полости по уравнению Пуассона

$$P_n = P_H \left( \frac{r_0}{r_n} \right)^k , \quad (24)$$

где  $k$  – показатель адиабаты;  $P_H$  – начальное давление.

Давление в породе с расстоянием от оси заряда будет изменяться по закону

$$P(r) = P_n \frac{r_0^{2k}}{r_n^{2k-2}} \frac{1}{r^2}. \quad (25)$$

Определим радиус полости взрыва в момент времени  $t$ . Рассмотрим элемент цилиндрического слоя породы, прилегающего к стенкам полости. Объем элемента (см. рис. 1)  $dV = r_n d\beta H dr_n$ , масса элемента  $dm = \rho r_n H d\beta \cdot dr_n$ . Давление продуктов взрыва на стенки полости имеет вид:  $P(r_n) = P_n (r_0 / r_n)^{2k}$ . С внешней стороны элемента породы давление равно

$$P(r_n + dr_n) = P_n \frac{r_0^{2k}}{r_n^{2k-2}} \frac{1}{(r_n + dr_n)^2}. \quad (26)$$

Разность давлений  $dP$  определяется следующим образом:

$$dP = P(r_n + dr_n) - P(r_n) = P_n \frac{r_0^{2k}}{r_n^{2k}} \frac{2dr_n}{r_n}. \quad (27)$$

Продукты взрыва действуют на элемент (с учетом противодействия породы) с силой  $dF$

$$dF = dP \cdot dS = P_n \frac{r_0^{2k}}{r_n^{2k}} \cdot \frac{2dr_n}{r_n} \cdot r_n d\beta H dr_n. \quad (28)$$

По второму закону Ньютона  $dF = dm \cdot du_n / dt$ ,

$$dF = P_n \left( \frac{r_0}{r_n} \right)^{2k} \cdot \frac{2dr_n}{r_n} \cdot r_n d\beta H dr_n = \rho r_n d\beta H dr_n du_n / dt. \quad (29)$$

Ускорение породы  $du_n / dt$  запишем в виде:  $(du_n / dr_n)(dr_n / dt) = u_n du_n / dr_n$  и проинтегрируем уравнение (29)

$$u_n^2 = C - \frac{2P_n}{k\rho} \left( \frac{r_0}{r_n} \right)^{2k}. \quad (30)$$

Постоянную  $C$  определяем из начальных условий и приходим к следующему интегралу

$$\int dt = \int \frac{dr_n}{\sqrt{\frac{P_n}{\rho_0} \left( \alpha + \frac{2(1-\alpha)}{k} - \frac{2}{k} \left( 1 - \left( \frac{r_0}{r_n} \right)^{2k} \right) \right)}}. \quad (31)$$

Этот интеграл довольно просто можно решить численными методами.

Таким образом, полученные соотношения позволяют в первом приближении оценить практически все величины, характеризующие процесс распространения цилиндрической ударной волны в грунте.

**УДК 550.3:622.831:622.3.016**

А.А. Яланский, Алекс.А. Яланский, В.В. Арестов

### **ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ АКУСТИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

Розглянуто особливості методики віброакустичного зондування глибинної побудови масиву гірських порід, зокрема контролю заколів, відшарувань, тріщинуватості, плоскопаралельних структур, а також кріплення гірничих виробок, тунельного оздоблення та ін.

### **FEATURES OF A TECHNIQUE OF SOUNDING (VIBROACOUSTIC CONTROL) OF A PLUTONIC CONSTITUTION OF A ROCK MASS**

The features of a technique of sounding (vibroacoustic control) of a plutonic constitution of a rock mass are reviewed. The attention is given to the control of block and flat-parallel structures of rock mass, mine working support, tunnels lining, etc.

Горная порода – неоднородная по структуре, текстуре и свойствам среда. Неоднородности изменяются в широких пределах, например, раскрытия трещин – от  $10^{-9}$  до  $10^{-1}$  м при длине от  $10^{-3}$  м до сотен метров, размеры включений и природных пустот в массиве – от  $10^{-4}$  м до нескольких метров в сечении, зоны концентрации напряжений – от  $10^{-3}$  м (вокруг скважин) до многих сотен метров (тектонические напряжения). Часто геологические процессы приводят к возникновению упорядоченной неоднородности массива: слоистости, блочности и периодичности элементов неоднородности, что обуславливает анизотропию среды. Для измерений неоднородность является относительным понятием. Когда область контроля значительно превышает размеры элементов неоднородности, то среду можно считать квазиоднородной, а неоднородности проявляют свои свойства только интегрально. Наоборот, если естественная неоднородность не укладывается в изучаемую область пространства, то она возможно и не будет обнаружена. Следовательно, неоднородности в массиве обладают масштабным эффектом. Степень неоднородности при измерениях условно разделяют на четыре группы: 1) неоднородности крупного масштаба, включающие фациальную изменчивость, тектонические разрывы, зоны выветривания и разгрузки, горно-технологические объекты; 2) неоднородности структуры и состава