

**ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАРЯДНОЙ ПОЛОСТИ  
НА РАЗРУШЕНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

Виконано дослідження впливу хвильових процесів у зарядній порожнечі на руйнування масиву гірських порід

**INFLUENCE OF THE WAVE PROCESSES IN THE CHARGE  
CAVITY ON DESTRUCTION OF ROCK MASSIF**

Influence of the wave processes in the charge cavity on destruction of rock massif are described.

Газодинамические процессы, протекающие в скважине при взрыве, в значительной мере влияют на механизм разрушения породы. При этом волны в продуктах детонации (ПД) генерируют волны напряжения в массиве горных пород, а импульсы взрыва вдоль образующей скважины определяют движение частей уступа. Расклинивающее действие ПД в трещинах зависит от давления продуктов взрыва (ПВ) в соответствующем месте полости взрыва. Сейсмик взрыва также зависит от волн (ударных, сжатия и разрежения) в ПД.

В настоящей главе рассмотрены возможности управления процессом разрушения горных пород с помощью волнового поля в полости взрыва. Изменяя амплитуды волн сжатия (разрежения) в скважине, можно тем самым изменять степень неоднородности поля напряжений в массиве. Рассмотрим заряды, при взрыве которых возникают поля напряжений с максимальной неоднородностью и максимальной однородностью.

К первой группе зарядов, создающих поля напряжений с максимальной неоднородностью, относятся следующие заряды ВВ:

- 1) с большой скоростью детонации и плотностью, детонирующие в нормальном режиме;
- 2) состоящие из чередующихся частей высоко- и низкобризантных ВВ, инициируемые в середине высокобризантного ВВ [1];
- 3) с инертными или воздушными промежутками.

При взрыве зарядов из чередующихся слоев двух типов ВВ ПД будут пульсировать у средин промежутков, пока волна разрежения от вылетающей забойки не сгладит пульсации.

В [2] показано, что импульсы взрыва зарядов с воздушным промежутком за первую мс с момента подхода детонационной волны к промежутку на стенках воздушной полости значительно меньше, чем на стенках скважины с ВВ. Если ударная волна в ПВ порождает ударную волну в породе, то диаметр взрывной полости у промежутка будет меньше, чем у ВВ. Первую миллисекунду заряд, рассредоточенный воздушным промежутком, действует как два заряда. Если после прохождения детонационной волны радиус полости возрастает в 1,1 раза, то работа ПВ в этом случае будет равна

$$A = \frac{RT}{k-1} \cdot \frac{m}{\bar{M}} \left( 1 - \left( \frac{V_H}{V_k} \right)^{k-1} \right), \quad (1)$$

где  $R$ ,  $k$  – газовая постоянная и показатель адиабаты;  $T$  – температура;  $m$ ,  $\bar{M}$  – соответственно масса и средняя молярная масса ПД;  $V_H$ ,  $V_k$  – начальный и конечный объем ПД.

При сравнении ее с полной работой

$$A_n = \frac{RT}{k-1} \cdot \frac{m}{\bar{M}} \quad (2)$$

получим

$$\frac{A}{A_n} = 1 - \left( \frac{V_H}{V_k} \right)^{k-1} \approx 0,3. \quad (3)$$

Таким образом, уменьшение среднего давления ПД в воздушном промежутке в течение первой мс приводит к неоднородному полю напряжений. У промежутка возникают большие растягивающие и сдвиговые напряжения.

Заряд с инертным промежутком тоже действует как два заряда. Давление в водном промежутке, например, первоначально почти равно давлению в других точках полости взрыва, но при малейшем уменьшении массы воды в промежутке за счет вытеснения ее или расширения диаметра полости взрыва давление будет уменьшаться. ПД не будут успевать «подпитывать» энергией водный промежуток. Промежуток из сухого отсева вначале сжимается приблизительно на треть [3]. При этом у промежутка порождаются две волны разрежения, идущие вниз и вверх. После сжатия вещества промежутка он частично разделит заряды.

Ко второй группе зарядов, создающих максимально однородное поле напряжений, относятся заряды ВВ:

- 1) с оболочкой из инертного материала и воздуха;
- 2) с оболочкой из вещества, поглощающего энергию ПД, а затем выделяющего энергию при экзотермической реакции;
- 3) с добавками, поглощающими энергию в детонационной волне и выделяющими ее при уменьшении температуры (или давления) в скважине до определенной величины.

Добавки поглощают энергию при их нагревании и фазовых превращениях. Детонационная волна в этом случае будет недосжатой. Возвращение энергии происходит при обратных процессах. Вещество добавок должно иметь большие теплоты фазовых превращений. Выбором критической температуры вещества добавок можно регулировать давление и температуру в полости взрыва.

Рассмотрим подробнее термодинамику взрывного процесса с учетом добавок, испытывающих фазовые переходы. Пусть в ВВ, масса которого  $m$ , теплота взрыва  $Q$ , скорость детонации  $D$  и плотность  $\rho_{вв}$ , введено вещество с молярной теплоемкостью  $C_v$  и теплотой фазовых превращений  $\Delta H$ . Пусть вещество до-

бавки массой  $m_g$  испарится при взрыве в зоне, примыкающей к зоне химической реакции. Время и место испарения можно задавать выбором размеров и структуры частиц. С уменьшением размеров частиц и с увеличением их пористости увеличивается скорость теплообмена.

Внутренняя энергия ПВ уменьшается на величину

$$\Delta U \approx m_g (\Delta H_1 + \Delta H_2 + C_{v1}(T_1 - T_k) + C_{v2}T_k), \quad (4)$$

где  $\Delta H_1$ ,  $\Delta H_2$  – соответственно удельная теплота превращения в жидкое и газообразное состояние;  $C_{v1}$ ,  $C_{v2}$  – молярные теплоемкости при постоянном объеме газообразного и жидкого вещества добавки;  $T_1$ ,  $T_k$  – температура ПВ после испарения добавки и температура кипения вещества. С другой стороны, изменение внутренней энергии  $\Delta U$  равно

$$\Delta U = \frac{m_g}{M_1} \left( C_v(T_n - T_1) - \frac{a}{V_m} \right), \quad (5)$$

где  $C_v$  – молярная теплоемкость ПВ при постоянном объеме;  $T_1$  – температура ПВ после испарения добавки;  $a$  – постоянная Ван-дер-Ваальса;  $V_m$ ,  $M_1$  – молярный объем и молярная масса ПВ.

Если уравнение состояния выбрать с учетом малости собственного объема молекул и пренебрежения роли упругого давления [3], то  $T_1 = T_n - \frac{\Delta U M_1}{m C_v}$ .

При испарении вещества добавки давление в ПД изменяется. Уравнение состояния имеет вид (уравнение Ван-дер-Ваальса)

$$\left( P_n + \frac{m}{M_1} a_1^2 / V^2 \right) \left( V - \frac{m}{M_1} b_1 \right) = \frac{m}{M_1} RT, \quad (6)$$

где  $a_1$ ,  $b_1$  – постоянные Ван-дер-Ваальса для продуктов детонации;  $R$  – газовая постоянная. Для испарившегося вещества можно записать

$$\left( P_2 + \frac{m_g}{M_2} a_2^2 / V^2 \right) \left( V - \frac{m_g}{M_2} b_2 \right) = \frac{m_g}{M_2} RT, \quad (7)$$

где индексом 2 обозначены соответствующие параметры для паров вещества добавки. Воспользовавшись законом Дальтона, можно записать выражение для давления в ПД с учетом давления пара вещества

$$P = \left( \frac{m}{VM_1 + mb_1} + \frac{m_g}{VM_2 + m_g b_2} \right) RT - \frac{M_2 m a_1^2 + m_g M_1 a_2^2}{M_1 M_2 V^2}. \quad (8)$$

Если пренебречь упругим давлением и собственным объемом ПВ, то

$$P = \left(1 + \frac{m_g}{m}\right) P_H / \left(1 + \frac{M_2}{M_1}\right). \quad (9)$$

Когда частицы добавки не испаряются, давление, как легко определить, равно

$$P' = P_H \frac{m + m_g}{m^2} m_g. \quad (10)$$

Давление  $P_k$  в ПД после испарения и расширения в волне разрежения до состояния с температурой, равной критической  $T_k$  ( $T_k = \frac{8a}{27bR}$ ), находится из формулы

$$P_k = P \left(\frac{T_H}{T_k}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \frac{1 + \frac{m_g}{m}}{1 + \frac{M_2}{M_1}} P_H \left(\frac{T_H}{T_k}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (11)$$

$$P_k = P_H \frac{(m + m_g) M_1 T_H^{\frac{k}{k-1}}}{(M_1 + M_2) m T_k^{\frac{k}{k-1}}}. \quad (12)$$

При  $T = T_k$  начнется процесс фазового превращения пара вещества добавки в жидкость. В ПД выделится энергия  $W = \Delta H_1 m_g$ . Этот процесс протечет за время изобарического расширения, при котором работа расширения  $A = \int P dV = \Delta H_1 m_g$ .

Таким образом, установлена зависимость процесса разрушения горного массива взрывом от параметров скважинного заряда. Вводя в ВВ добавки, критические параметры и масса которых выбираются, исходя из прочности и трещиноватости породы, можно уменьшить зону измельчения и увеличить тем самым «поршневое» действие взрыва. В этом случае коэффициент полезного действия взрыва существенно возрастет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев В.Д. Исследование процесса детонации комбинированных зарядов ВВ и эффективности их применения при разрушении гранитов / В.Д. Воробьев, В.П. Куриной, Б.Н. Мяделец и др. // Изв. вузов. Горный журнал. - 1977. - №2. - С. 82-90.
2. Кучерявый Ф.И. Исследование газодинамических процессов при взрыве скважинного заряда с воздушной полостью в перебуре / Ф.И. Кучерявый, В.П. Куриной, Е.А. Прищепа // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископаемых. - 1976. - №6. - С. 32-35.
3. Баум Ф.А. Физика взрыва / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович и др. - М.: Наука, 1075. - 704 с.