

## ВЛИЯНИЕ ЗАКРЕПЛЯЮЩЕГО СОСТАВА НА РАДИУС СФЕРИЧЕСКОЙ КАМУФЛЕТНОЙ ПОЛОСТИ

Кологривко А.А. (БНТУ, г. Минск)

Экономическая эффективность и простота сооружения камуфлетных полостей (емкостей) взрывоуплотнением обуславливает широкие возможности их использования в горной (для сброса и захоронения радиоактивных и наиболее вредных отходов химической и атомной промышленности, цветной металлургии; дроблении руд для подземного выщелачивания), нефтяной (для хранения дизельного топлива, керосина), газовой промышленности (для хранения сжиженного и природного газа), в сельскохозяйственном строительстве (фрукто- и овощехранилища, емкости для воды и жидких удобрений). Практика сооружения таких емкостей ограничивается созданием лишь сферических полостей временного характера путем многократного последовательного взрывания зарядов без последующего или с последующим закреплением стенок цементирующим составом. При этом обеспечивается доступ человека в подземную полость для ее крепления. Применение же способа взрывоуплотнения и одновременного крепления для подобных объектов в настоящее время ограничено. Прежде всего это связано со сложностью взрывных технологий образования сферических полостей при одновременном их креплении и зависимость от требуемых параметров. Поэтому, рассмотрение вопроса о влиянии закрепляющего состава на радиус сферической камуфлетной полости, сооружаемой способом взрывоуплотнения и одновременного крепления, представляет как научный, так и практический интерес.

Рассматривая сферический камуфлетный взрыв воспользуемся математическими моделями процесса образования камуфлетной полости в пластичных породах и моделями, учитывающими изменение начальных параметров источника возмущения, в зависимости от влияния сред между зарядом и стенками первоначальной полости [1-3].

При рассмотрении максимального радиуса полости и времени ее расширения можно не учитывать специфических свойств грунтов и рассматривать последние при взрыве как жидкость с внутренним гидростатическим давлением, равным прочностному сопротивлению грунта, а именно динамическому пределу [1]. Движение грунта при сферической симметрии может быть описано двумя уравнениями движения Эйлера:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 \left( \frac{dv}{dt} + v \frac{dv}{dr} \right) &= - \frac{dP}{dr}, \\ \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 v) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $v$  – массовая скорость грунта на границе его раздела с продуктами детонации;  $P$  – давление;  $\rho_1$  – плотность грунта за фронтом ударной волны;  $r, t$  – текущие радиус и время.

Граничными условиями (при которых грунт с начальной плотностью  $\rho_0$  под действием взрыва уплотняется до состояния  $\rho_1$ , после чего среда уже несжимаема) являются условия на фронте ударной волны.

Максимальный радиус расширения сферической газовой полости, т.е. радиус, при котором границы раздела «продукты взрыва - грунт» равны нулю:

$$R_{\infty} = R_0 \left[ \frac{v_0^2 + \frac{2p_n}{(9-a)\rho_1(1-\beta^{1/3})}}{\frac{2P_0}{a\rho_1(1-\beta^{1/3})}} \right]^{\frac{1}{a}} \quad (2)$$

где  $p_n = \frac{1}{8} \rho_{\text{вв}} D^2$  – начальное давление в среде (здесь  $\rho_{\text{вв}}$  – плотность взрывающегося вещества;  $D$  – скорость детонации);  $v = \frac{P_n}{\rho_0 c_0}$  – начальная скорость смещения частиц грунта (здесь  $\rho_0$  – начальная плотность грунта;  $c_0$  – скорость распространения упругих колебаний в грунте);  $\beta$  – объемная деформация грунта;  $P_0$  – прочностное сопротивление грунта;  $R_0$  – радиус заряда;  $a$  – безразмерный показатель, характеризующий уплотняемость грунта.

Теперь перейдем к вопросу о взрыве в жидкости, при этом будем считать жидкость несжимаемой, начиная с некоторого радиуса расширения продуктов детонации, т.е. когда ударная волна полностью сформировалась [7]. Выражение для скорости расширения газовой полости в жидкости (при условии равенства скорости и давления) имеет вид:

$$V_s = \sqrt{\frac{p_x - p_0}{\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{p_x}{2940} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{k}}}, \quad (3)$$

где  $p_0$  – начальное давление воды.

Зависимости (2) и (3) имеют общие закономерности. Поэтому представляется возможным соединить элементы теории взрыва в грунте и взрыва через закрепляющий состав с целью получения зависимости влияния закрепляющего состава на радиус сферической камуфлетной полости. При этом алгоритм решения задачи для сферической симметрии будет базироваться на симметрии [2].

Изменение радиуса сферической камуфлетной полости при введении закрепляющего состава будем оценивать с помощью коэффициента  $\lambda_{\text{эф}} = \frac{R_n}{R_w}$ , где  $R_n$  – радиус сферической полости, образованной взрывом заряда, помещенного в заполненную закрепляющим составом первоначальную сферическую полость.

Перепад давления на фронте ударной волны у стенки полости [5]:

$$\Delta p_n = \Delta p_s \left( \frac{R_0}{R_{\text{ин}}} \right)^a \left( \frac{P_{\text{звир}}}{B} + 1 \right)^{\frac{1.58a}{a-1}}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{ин}}$  – радиус первоначальной сферической полости.

Последний множитель, учитывающий влияние сжимаемости и гидростатического давления в закрепляющем составе практически равен единице, поэтому при решении данной задачи, т.е. при давлениях, близких к атмосферному, этим влиянием можно пренебречь. Для сферической волны  $a = 2,58$ , тогда:

$$\Delta p_n = \Delta p_s \left( \frac{r_1}{R_{\text{ин}}} \right)^{2,58}. \quad (5)$$

Теория распространения ударных волн не дает достаточно простых зависимостей, позволяющих непосредственно определять изменение скорости на фронте ударной волны в зависимости от радиуса, поэтому воспользуемся известным соотношением волновой механики [5]:

$$\Delta p = \rho c v. \tag{6}$$

Отсюда скорость частиц среды в закрепляющем составе на фронте ударной волны в момент подхода ее к стенке первоначальной полости:

$$v_n = \frac{\Delta p_n}{\rho_3 c_3}. \tag{7}$$

Далее получаем:

$$v_n = \frac{\Delta p_n}{\rho_3 c_3} \left( \frac{R_0}{R_{nn}} \right)^{2.58}. \tag{8}$$

По данным [4] начальное давление ударной волны  $\Delta p_3$  при взрыве в воде составляет  $0,7p_0$ , а при взрыве в грунте равно ему. Учитывая вышеприведенные формулы, зависимость (2) имеет вид:

$$R_n = R_{nn} \left[ \frac{0,49 p_n^2}{\rho_3^2 c_3^2} A^{-1,72} + \frac{1,4 p_n A^{-0,86}}{(9-a)\rho_1(1-\beta^{1/3})} \right]^{\frac{1}{a}} \tag{9}$$

где  $A = \frac{\frac{4}{3}\pi R_{nn}^3}{\frac{4}{3}\pi R_0^3} = \left( \frac{R_{nn}}{R_0} \right)^3$ .

Обозначив  $(9-a)\rho_1(1-\beta^{1/3}) = B$  и  $\left( \frac{R_{nn}}{R_0} \right)^3 = A$  получаем:

$$\lambda_{сф} = \left[ \left( \frac{p_0 c_0}{\rho_3 c_3} \right)^2 \frac{0,49 p_0 B A^{\frac{a}{2}-1,72} + 1,4 p_3^2 c_3^2 A^{\frac{a}{2}-0,86}}{B p_0 + 2 p_0^2 c_0^2} \right]^{\frac{1}{a}}. \tag{10}$$

Коэффициент  $\lambda_{сф}$  учитывает изменение радиуса сферической камуфлетной полости в зависимости от соотношения размеров первоначальной полости и заряда (A), физических свойств закрепляющего состава ( $\rho_3, c_3$ ), физических свойств породы ( $a, \rho_0, c_0, \rho_1$ ) и заряда ( $p_0$ ).

Образование полости представляет собой непрерывный двухфазный процесс [7], в ходе которого в первую фазу происходит пластичная деформация грунта, во вторую – его сдвиг в сторону открытой поверхности. Поскольку решение поставленной задачи

предполагает камуфлетный сферический взрыв без вертикальной составляющей деформации поверхности, вторую фазу не учитываем. Тогда проектируемый радиус сферической полости, сооружаемой способом взрывоуплотнения и одновременного крепления, можно определить по формуле:

$$R_n = \lambda_{\text{взр}} \frac{0,62K_c}{\mu^2} \sqrt{m_c} \quad (11)$$

где  $K_c$  – коэффициент сосредоточенного заряда;  $\mu$  – сжимаемость грунта;  $h$  – глубина заложения заряда;  $m_c$  – масса сосредоточенного заряда.

### Литература

1. **Евстропов Н.И.** Взрывные работы в строительстве. – М.: Стройиздат, 1965. – 207с.
2. **Каммерер Ю.Ю.** Влияние жидкого цементирующего состава на радиус цилиндрической камуфлетной полости. Сб. ст. Вопросы совершенствования технологии строительного производства. – М.: 1973. – 72 с.
3. **Кушнарев Д.Н.** Определение параметров взрывных волн в жидких цементирующих средах / Гидротехническое строительство. – 1970. – №11. – С.18-21.
4. **Станюкович К.П.** Неустановившиеся движения сплошной среды. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1971. – 855 с.
5. **Баум Ф.А., Державец А.С., Санасарян Н.С.** и др. Термостойкие взрывчатые вещества и их действие в глубоких скважинах. – М.: Недра, 1969. – 160 с.
6. **Ляхов Г.М.** Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах. – М.: Недра, 1964.
7. **Даниленко И.И.** Использование энергии взрыва в строительстве. – К.: Будівельник, 1981. – 168 с.