

## К ВОПРОСУ ПРАВОМЕРНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В СРЕДЕ ПРИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВАХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

Розглянуті питання, присвячені аналізу та порівнянню процесів, що відбуваються в середовищі у промислових умовах і на моделях при вибухах циліндричних зарядів.

## TO QUESTION OF THE ORTHODOXY OF THE PROCESSES MODELING IN THE MEDIUM ATTACHED TO INDUSTRIAL EXPLOSION OF CYLINDRICAL CHARGE

The questions, devoted to the analysis and comparison of processes in medium in industrial conditions and on models attached to explosions of cylindrical charge, are described.

Известно, что взрыв скважинного заряда взрывчатого вещества представляет собой сложный комплекс процессов, моделировать который "в целом" невозможно. Трудно выполнить даже необходимое условие геометрического моделирования – подобие формы. Кроме того, скорости всех волн у зарядов приблизительно одинаковы, причем скорость детонации тэна и гексогена всегда больше скорости детонации ВВ, применяемых в промышленных условиях на карьерах. Сложно применять даже приближенное моделирование, при котором часть процессов, играющих второстепенную роль при взрыве, не учитывается из-за недостаточной изученности как на модели, так и в натуре.

Для проведения сравнительного анализа процессов взрыва модельного и скважинного зарядов ВВ вводятся обозначения (индекс "с" принадлежит величинам, характеризующим взрыв скважинного заряда, а "м" – моделирующего):  $l_c, l_m$  – длина заряда;  $L_c, L_m$  – длина забойки;  $d_c, d_m$  – диаметр заряда;  $D_c, D_m$  – скорость детонации;  $c_c, c_m$  – скорость звука в продуктах взрыва (ПВ);  $C_c, C_m$  – скорость волны напряжений в породе. Полагается, что ВВ детонируют в режиме стационарной детонационной волны (ДВ). Роль детонаторов (для простоты) не рассматривается.

Сначала рассматриваются волновые процессы, протекающие в полости взрыва скважинного и модельного зарядов. В результате инициирования заряда модели по ВВ распространяется ДВ, которая порождает в материале модели коническую ударную волну (УВ). За фронтом УВ материал разрушается, и диаметр полости взрыва возрастает. Судя по кинограммам СФР,  $d/d_m \geq 2$ , где  $d$  – текущий диаметр полости модели (рис. 1) [1]. В этом случае из уравнения Пуассона следует, что давление  $P_m$  за фронтом ДВ в полости существенно уменьшается:

$$P_m V_m^3 = P_{mn} V_{mn}^3 \Rightarrow P_m = P_{mn} (d_{mn} / d_m)^6 = P_{mn} / 32 \sim 0,1 \text{ ГПа}, \quad (1)$$

где  $P_{mn}, V_{mn}$  – соответственно начальное давление и объем ПВ заряда модели;  $d_{mn}$  – начальный диаметр заряда модели.

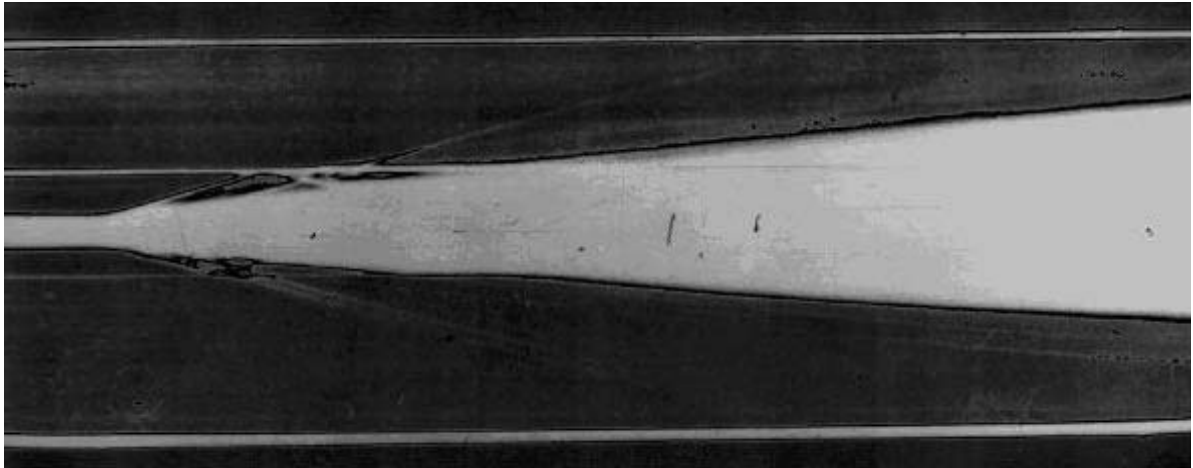


Рис. 1 – Кинограмма СФР

Положено, что показатель адиабаты для тэна в рассматриваемом диапазоне давлений постоянен и равен 3 (в действительности  $P_m$  будет несколько больше, так как показатель адиабаты при расширении ПВ уменьшается, но согласно [2] этими изменениями можно пренебречь). Расширение полости происходит равномерно, а скачкообразно. Это связано с волновыми процессами в нормальной к оси сечения полости. Время между амплитудами скачков  $t_m \sim d_m/c_m = 0,4 \div 1,5$  мкм.

При взрыве промышленных ВВ в скальных горных породах УВ образуется настолько слабая, что массовой скоростью породы можно пренебречь. Действительно, если, например, определить сжимаемость гранита из уравнения Тэта [2]

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{P}{2,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}} + 1 \right)^{0,25}, \text{ кг/м}^3 \quad (2)$$

( $\rho_0$  – начальная плотность гранита), то при давлениях во фронте УВ  $P = 2 \div 3$  ГПа (этому давлению соответствует давление ПВ  $P \approx 2,4 \div 3,5$  ГПа) плотность возрастает на 2-3 %, а скорость волны напряжений

$$C_c = 6132 \left( 1 + \frac{P}{2,35 \cdot 10^{10} \text{ Па}} \right)^{3/8} \text{ – на } 3\text{-}4,6 \text{ \%}.$$

Следовательно, в отличие от взрыва заряда модели, где почти сразу за фронтом ДВ давление падает более чем в 10 раз, в скважинном заряде диаметр полости взрыва в скальном грунте за фронтом ДВ не возрастает, а давление уменьшается незначительно. УВ в породе очень слабая, но напряжения достаточны, чтобы образовать зону пластических деформаций. Время установления среднего давления в полости взрыва  $t \sim 2l/C_n$  и равно (сразу после детонации)  $t_c \sim 10$  мс,  $t_m \sim 20$  мкс. Сравнение  $t_c$  и  $t_m$  с общей длительностью взрыва скважинного заряда и его модели позволяет заключить, что волновые процессы в модели протекают относительно медленнее. В дальнейшем  $t$  будет возрастать за счет увеличения полости взрыва и уменьшения скорости звука. Протекание

волновых процессов зависит от процесса вылета забойки.

Давление на фронте ДВ тэна или гексогена в 2-5 раз больше соответствующего давления при детонации ВВ в скважине, а длина забойки  $L_m$  измеряется в сантиметрах, поэтому УВ в забойке модели не гасится полностью. Это приводит к тому, что вылет забойки начинается сразу после прохождения по ней УВ. Кроме того, ПВ пронизывает забойку, уменьшая поверхность контакта между частицами, т.е. сцепление частиц в забойке. Если оценить силу трения забойки о боковую поверхность полости взрыва  $F = \mu dLP$  ( $\mu$  – коэффициент трения), то  $F_c/F_m = d_c L_c / d_m L_m \sim 10^4$  (это отношение самое большое из нескольких десятков рассмотренных отношений соответствующих величин для исследуемых зарядов). Быстрое сжатие и вылет забойки модели приводит к сильной волне разрежения в ПВ, идущей от забойки. Волна разрежения существует до полного вылета забойки и ПВ. В скважинном заряде УВ в забойке гасится полностью. Энергия УВ идет на перемещение, нагревание, уплотнение частиц забойки и образование запирающего слоя, который некоторое время (до прихода волны сжатия от дна скважины) удерживает материал забойки в скважине. Из этого следует, что взрыв модели отличается относительно большей не стационарностью, чем взрыв скважинного заряда, и что в модельном взрыве трудно выделить квазистатическую стадию.

Процессы в полости взрыва во многом определяют поле напряжений в среде. ДВ в заряде ВВ порождает УВ в среде, ширина фронта которой зависит от размеров частиц ВВ. Ширина фронта УВ (крутизна фронта волны напряжений) задает минимальный размер разрушений в среде. Пульсации давления в нормальном направлении к оси сечения также приводят к дроблению материала. Максимумы напряжений от пульсаций отстоят друг от друга на расстояниях  $\lambda \sim Vd/C$  ( $V$  – скорость УВ или волны напряжений);  $\lambda_m = 3 \div 10$  мм,  $\lambda_c \approx 0,8$  м.

Как правило, скорость детонации тэна или гексогена больше скорости волны напряжений в любом (кроме бериллия) материале, поэтому при взрыве заряда модели в материале образуется коническая УВ, в которой деформации не содержат поворотов. Скорость детонации при взрыве скважинного заряда ВВ в скальном грунте почти всегда меньше скорости волны напряжений. От ДВ в породе уходит волна, фронт которой представляет собой части двух сфер разного диаметра, соединенных с прямым круговым конусом [3]. В любой точке поля деформации содержат повороты в плоскостях, проходящих через ось скважины. Отношение  $l_c/d_c$  у скважинного заряда примерно в три раза больше  $l_m/d_m$  модели, поэтому волны в скважине хорошо отделяются одна от другой и неоднородности поля в породе также разделены в пространстве и времени. Это приводит к более равномерному дроблению породы в поле скважинного заряда ВВ. Следует отметить, что обгон ДВ ударной волной в породе практически не моделировался.

При моделировании проникновения ПВ в трещины очень трудно обеспечить равенство соответствующих критериев подобия. Например, для числа Рей-

нольдса  $Re_m \sim Re_c$ , т.е.  $\rho_m V_m h_m / \eta_m \sim \rho_c V_c h_c / \eta_c$ , где  $\rho$  – плотность ПВ в трещине;  $V$  – скорость;  $h$  – определяет раскрытие трещины;  $\eta$  – динамический коэффициент вязкости ПВ.

При рассмотрении выброса разрушенного вещества, ускорения отдельных при грубых предположениях (метание куба стороной  $a$  в ПВ)  $a_m/a_c \sim b_c \rho_c P_m / b_m \rho_m P_c \sim 100$ , т.е. отдельные скважинного заряда оказываются относительно более подвижными, чем отдельные модели. Так как давление в полости взрыва в каждом сечении различное, то с учетом отношений  $l/d$  можно сказать, что в разрушении породы скважинным зарядом соударение отдельных играет бóльшую роль, чем при взрыве заряда модели. Расчеты показывают, что в процессе распространения волны в скважине прилегающие к ней блоки породы успевают не только смещаться, но и (если расстояния между блоками позволяют) поворачиваться в процессе прохождения волны по блоку.

Таким образом, анализ процессов, протекающих при взрыве скважинного и модельного зарядов, позволяет заключить, что из-за отсутствия их физического подобия невозможно производить количественный перерасчет на натуре экспериментальных результатов, полученных на модели.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучерявый Ф.И., Куринной В.П., Прищепа Е.А. Исследование газодинамических процессов при взрыве скважинных зарядов с воздушной полостью в перебуре // Физико-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1976. – №6 – С. 32-35.
2. Физика взрыва / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович и др. - М.: Наука, 1975. – 704 с.
3. Литвин Л.Н., Нефедов Ф.А., Щеглов Г.В. Исследование суперпозиции волн сжатия в прозрачных материалах при взрывной нагрузке // Способы разрушения и управления состоянием горного массива. - К.: Наук. думка, 1985. – С. 100-103.