

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ
РАЗРУШЕНИЯ НЕГАБАРИТОВ НАКЛАДНЫМИ ЗАРЯДАМИ
ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

В статті приведено результати теоретичних досліджень особливостей руйнування негабаритів накладними зарядами вибухових речовин.

**THEORETICAL RESEARCH INTO THE PECULIARITIES OF
BOULDER'S BLASTED BREAKING BY PLASTER EXPLOSIVE CHARGES**

The results of research into the peculiarities of boulder's blasted breaking by plaster explosive charges are adduced in the paper.

В настоящее время к разработке новых методов и способов взрывного дробления для подготовки горной массы, соответствующей определенным технологическим требованиям для различных предприятий, предъявляются жесткие требования, удовлетворение которых возможно лишь на основе теории действия взрыва и научных экспериментов, которые позволят повысить эффективность взрывных работ путем разработки инженерных методов управления энергией взрыва и повышения полезной работы взрыва.

Повышение интенсивности дробления горных пород энергией взрыва обычно связано с увеличением удельного расхода ВВ, что, как правило, ведет к возрастанию затрат энергии взрывчатого вещества на получение единицы готовой продукции. В свою очередь, повышение энергонасыщенности массива на карьерах нерудных строительных материалов приводит к нежелательному увеличению выхода переизмельченной горной массы, разупрочнению и разлету кусков породы и усилению сейсмического эффекта. Поэтому необходимо создание разнообразных методов и способов взрывного воздействия на массив, позволяющих без увеличения энергозатрат достигать требуемой степени дробления пород взрывом, что неразрывно связано с созданием и разработкой теоретических основ взрывного разрушения горных пород.

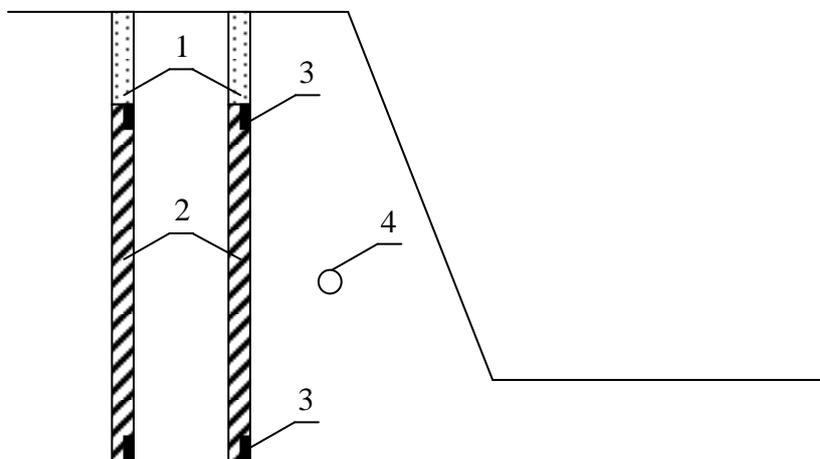
Для разрушения негабарита на карьерах нередко используют накладные заряды взрывчатых веществ (ВВ). Рассмотрим некоторые процессы, протекающие при взрыве таких зарядов.

При взрыве кумулятивного заряда с металлической облицовкой образуется кумулятивная струя из материала облицовки, температура которой $T \approx 800-1000$ °С (металл струи не расплавлен), скорость струи $V \approx 8$ км/с, эффективная длина струи $l \approx 3l_0$, где l_0 – длина образующей облицовки. Глубина проникания струи в породу

$$L \approx l\sqrt{\rho_1/\rho_2}, \quad (1)$$

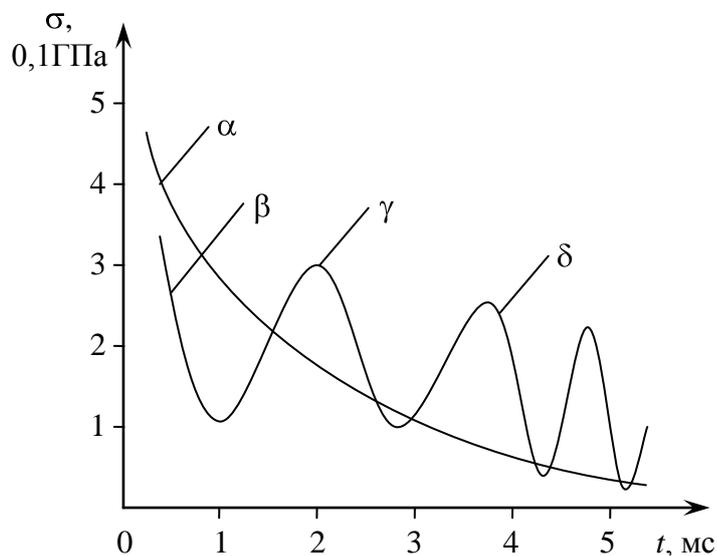
где ρ_1 и ρ_2 – соответственно плотность материала струи и породы.

Кумулятивная струя продавливает в породе узкий канал. Трещины в породе не успевают развиться, и такие заряды недостаточно эффективно разрушают негабарит



1 – забойка; 2 – ВВ; 3 – боевик; 4 – трещина

Рис. 1 – Начальное развитие трещинообразования в породе при взрыве сплошного скважинного заряда



α – зависимость напряжений от времени в породе у трещины при отсутствии волновых процессов (мгновенная детонация); β – максимальные напряжения у трещины от детонационной волны (верхний боевик); γ – максимальные напряжения у трещины от детонационной волны (нижний боевик); δ – максимальные напряжения у трещины от столкновения детонационных волн в скважине

Рис. 2 – Зависимость изменения напряжений со временем у трещины при различных условиях распространения детонационных волн

При взрыве кумулятивного заряда без облицовки не всё ВВ участвует в образовании кумулятивной струи, а лишь малая его часть. Когда высота кумулятивного заряда достигает своего предельного значения $H_{np} \approx 2r + h$, где r – радиус заряда, h – высота выемки, масса ВВ, идущего на образование струи, находится следующим образом:

$$m_a = \frac{m_{BB}}{5 + 2h/r} \approx \frac{m_{BB}}{9} \div \frac{m_{BB}}{6}, \quad (2)$$

где m_{BB} – масса ВВ.

Если заряд плоский (некумулятивный), то масса активной части заряда, то есть части, идущей на разрушение негабарита, равна (при $h = 0$) $m_a = m_{BB}/5$.

Для увеличения активной части заряда ВВ его можно покрывать оболочкой. Какими свойствами она должна обладать? Очевидно, что оболочка не должна быть твердым телом. Плотность материала оболочки должна быть большой, а динамическая сжимаемость минимальной. Действительно, начальные параметры ударной волны (УВ) в материале можно определить из уравнений, которые можно записать в виде

$$D_y = P_y / \rho_0 u_x; \quad u_x = \sqrt{\frac{P_y}{\rho_0} \left(\frac{\rho_y}{\rho_0} - 1 \right)}; \quad \bar{u}_x = \frac{1}{4} D \left(4 - 3(P_y / P_n)^{\frac{1}{3}} \right), \quad (3)$$

где D_y – скорость УВ;

\bar{u}_x – скорость материала оболочки за фронтом УВ;

P_y – давление во фронте УВ;

ρ_0 и ρ_y – соответственно плотность материала перед и за фронтом УВ;

D – скорость детонации,

P_n – начальное давление продуктов взрыва (ПВ).

В качестве материала оболочки проще всего взять воду или отсев, заполненный водой. В этом случае для воды $\rho_y/\rho_0 = (P_y/4,3 \cdot 10^8 + 1)^{0,156}$, а для гранита $\rho_y/\rho_0 = (P_y/2,35 \cdot 10^{10} + 1)^{0,25}$. Сжимаемость отсева в воде легко получить, учитывая, что это аддитивная величина. Определить параметры УВ в оболочке можно лишь численно. При $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $D = 4200 \text{ м/с}$ и $P_n = 3 \cdot 10^9 \text{ Па}$ расчеты дают следующие значения для воды: $P_y = 3,3 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $\bar{u}_x = 972 \text{ м/с}$, $D_y = 3395 \text{ м/с}$; для гранита при $\rho_0 = 2600 \text{ кг/м}^3$ параметры УВ равны: $P_y = 5,65 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $\bar{u}_x = 338 \text{ м/с}$, $D_y = 6429 \text{ м/с}$. Когда заряд ВВ не имеет оболочки, в воздухе образуется воздушная УВ (ВУВ), параметры которой можно определить из уравнений:

$$D_{ey} = (k + 1) \bar{u}_x / 2; \quad P_{ey} = (k + 1) \rho_a \bar{u}_x^2 / 2;$$

$$\bar{u}_{ex} = \sqrt{\frac{2P_y}{\rho_0(k+1)}}; \quad \bar{u}_x = \frac{1}{4}D(4-3(P_y/P_n)^{0.333}), \quad (4)$$

где $k = 1,4$ – показатель адиабаты для воздуха;

$\rho_a = 1,29 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха.

Численный расчет позволяет получить следующие значения величин: $P_{ey} = 1,86 \cdot 10^7 \text{ Па}$, $\bar{u}_{ex} = 3623 \text{ м/с}$, $D_{ey} = 3985 \text{ м/с}$.

Сопоставление параметров ударных волн показывает, что если заряд без оболочки, то давление в продуктах взрыва за время, равное $t = h/C_n$, где h – высота заряда, а $C_n = 3D/4$ – скорость звука в продуктах взрыва, уменьшится в 100 раз. Когда из этого времени вычесть время прохождения детонационной волны по ВВ $\tau = h/D$, то получим, что время действия начального давления ПВ на породу приблизительно равно $\Delta t_1 = h/C_n - h/D = 5,5 \text{ мкс}$. За это время образовавшиеся трещины смогут вырасти на длину $l_1 \sim 3 \text{ см}$. Когда заряд находится в оболочке, то с момента инициирования по ВВ распространяется детонационная волна, а по оболочке – ударная. По истечении времени $t_y = d/D_y$ (d – толщина оболочки) начнется движение верхнего края оболочки и в ПВ возникнет волна разряжения, которая за время $t_p = h/C_n$ достигнет породы. Таким образом, давление $P \approx 3 \cdot 10^9 \text{ Па}$ будет действовать на породу в течение времени $\Delta t_2 = t_y + t_p = d/D_y + h/C_n = 34 \text{ мкс}$. За это время трещина вырастет на длину $l_2 \approx 9,3 \text{ см}$. Если бы оболочка не потеряла сплошности, то для снижения давления в два раза необходимо время h/\bar{u}_x , которое равно $70 \div 200 \text{ мкс}$. В действительности, по истечении $30 \div 40 \text{ мкс}$ оболочка начнет терять сплошность, кроме того, продукты взрыва начинают истекать с боковой поверхности.

Таким образом, можно сделать вывод, что оболочка, покрывающая кумулятивный заряд ВВ, на несколько десятков мкс ($\Delta t \sim 40 \div 50 \text{ мкс}$) «запирает» продукты взрыва у кумулятивной выемки. Кроме этого, если заряд без оболочки, то по истечении времени $t = 40 \text{ мкс}$ давление в продуктах взрыва уменьшается до величины $P \sim 10^7 \div 5 \cdot 10^7 \text{ Па}$. Таким образом, оболочка увеличивает бризантное действие. Известно, что накладные заряды порождают сильные воздушные ударные волны (ВУВ). Оценим параметры ВУВ при наличии оболочки у накладного заряда и сравним их с параметрами ВУВ без оболочки. Когда оболочка из воды, начальные параметры ВУВ можно найти из (4). Имеем $\bar{u}'_{ey} = 972 \text{ м/с}$, $D'_{ey} = 1069 \text{ м/с}$, $P'_{ey} = 1,62 \cdot 10^6 \text{ Па}$. Начальные параметры ВУВ заряда с оболочкой существенно ниже, чем без нее. Когда оболочка начнет разлетаться, продукты взрыва будут образовывать ВУВ непосредственно, но давление в ПВ к этому времени снизится в несколько раз (при смещении оболочки на h давление в продуктах взрыва уменьшится в $P_n/P = V_n^3/(V_n + \Delta V)^3 \approx 64$ раза).

Рассмотрим простейший и очевидный случай, когда вместо инертного материала взята вода и отсев. Когда потерями на нагревание и фазовые переходы

можно пренебречь с большой степенью точности. Такой способ весьма технологичен. Применение оболочки позволяет укреплять заряды на наклонной поверхности ($\alpha \leq 30^\circ$).

Более тонким способом поглощения энергии неактивной части заряда ВУВ, возникающей при взрыве, является способ, когда в материал оболочки помещают вещества, сильно поглощающие энергию УВ. Известно, что УВ слабо поглощается водой и не сильно твердым веществом с малой пористостью. Если значительно увеличить объем пор в материале, то при адиабатном сжатии воздуха пор происходит его разогрев до температур $T \leq 10^4$ К. Так как поверхность контакта «воздух пор – вещество» может быть громадной (например, если объем пор равен 1 см^3 и диаметр поры $0,1 \text{ мм}$, то общая поверхность пор равна $S = 6,3 \cdot 10^4 \text{ м}^2$), то и скорость теплообмена также будет очень большой. Вещество оболочки или его прослойка будут испытывать фазовый переход. Теплота взрыва промышленных ВВ имеет тот же порядок, что и теплота фазового перехода или даже меньше. Таким образом, пористое вещество при прохождении по нему УВ может поглотить большую часть энергии УВ и во много раз уменьшить ВУВ.