

УДК 622.235.535 (575.2) (04)

**ОЦЕНКА УРОВНЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА
ПРИ ПРЯМОМ И ОБРАТНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ ЗАРЯДОВ**

В.И. Нифадьев – акад. НАН КР, докт. техн. наук

Я.М. Додис – докт. техн. наук

Results of physical modelling of process of explosion are submitted under various conditions and directions of initiation of charges. Efficiency of return initiation is revealed at detonation on the buffer which is higher 30%, than direct initiation. The area of use of this way is determined.

Использование простейших взрывчатых смесей на основе аммиачной селитры с различными добавками заводского изготовления или приготавливаемых непосредственно на месте применения, как правило, требует для инициирования зарядов промежуточных детонаторов в виде боевиков из патронов или шашек бризатных ВВ.

В настоящее время повсеместно применяются в качестве средств монтажа взрывной сети неэлектрические системы инициирования типа НОНЕЛЬ или СИНВ, в таком случае конструкция зарядов представляется с обратным (от забоя скважины) и реже с прямым (от устья скважины) инициированием.

Расположение боевика в начале и в конце заряда при его взрыве обуславливает совершенно различное направление фронта волны напряжений, положение которого определяется соотношением скоростей детонации ВВ (D) и скорости волны напряжений (C_p) в массиве горных пород.

Известно, что скорость детонации является показателем скорости нагружения горной породы, зависящая от свойств, состава и состояния данного типа ВВ. Величина скорости волны напряжений в основном определяется физико-механическими свойствами горной породы.

Детонация отдельных частей заряда по его высоте обуславливает различное предвари-

тельно (до разрушения) напряженно-деформированное состояние (НДС) объемов горной породы, окружающих заряд. Как показано в [1], в зависимости от соотношения D/C_p уровень НДС будет изменяться, что отразится на результатах взрыва. Так, в [1] установлено, что при $D > C_p$ со стороны инициатора куски более крупные, а сама зона дробления более узкая. С противоположной стороны – куски более мелкие и сама зона дробления более широкая.

В случае, когда $D < C_p$, вокруг непродетонировавшего заряда ВВ порода приводится в НДС, а детонация очередного слоя ВВ обуславливает передачу энергии в предварительно нагруженную среду. За счет снижения скорости нагружения, несмотря на снижение амплитуды импульса, общее время воздействия увеличивается, т.е. повышается использование энергии взрыва и, следовательно, снижаются потери за счет переизмельчения породы в ближней зоне.

В настоящее время в проектах горных предприятий и фактически отбойка горной массы производится при многорядном расположении зарядов. Запасы обуренной горной массы, как правило, значительно превышают подготовленные взрывными работами для непосредственной выемки. В таких условиях очередной взрыв блоков производится на неубранную, ранее взорванную горную массу (буфер). Эта технология позволяет решить за-

дачи управления шириной развала и использования рабочих площадок горизонтов, а также и кинетической энергии движущейся породы для ее дополнительного дробления. Эффективность этого способа управления энергией взрыва зависит от физико-механических свойств взрывааемых пород и геомеханического состояния буфера, которое можно характеризовать интегральным показателем – коэффициентом разрыхления (K_p).

Нашими исследованиями [2] установлено, что величина коэффициента разрыхления изменяется по рядам скважин и по высоте уступа в соответствии с соотношениями:

$$K_{PI} = \frac{\bar{K}_P}{0,960N^{0,07}} \text{ – при взрыве на обнаженный откос уступа;}$$

$$K_{PI} = \frac{\bar{K}_P}{0,960N^{0,1}} \text{ – при взрыве на буфер.}$$

$K_{PH} = K_{PI} \cdot H^{-\eta}$, где $\eta = 0.13N^{-0.4}$ и $\eta = 0,14N^{-0,75}$ – при взрыве на обнаженный откос уступа и на буфер соответственно.

В формулах N – порядковый номер ряда скважин, считая от откоса уступа, H – высота уступа, считая от его поверхности.

Соударение между движущейся горной массой и неподвижным буфером обеспечивает дополнительное дробление породы и одновременное уплотнение самого буфера.

Экспериментальная оценка эффективности взрывных работ при прямом и обратном инициировании и при отсутствии и наличии буфера осуществлена методом моделирования действия взрыва на эквивалентных материалах.

Из общего термодинамического критерия подобия Н.А.Наседкина следует, что при разрушении и перемещении взрывом прочных материалов необходимо соблюдение в основном двух механических критериев. Один из них, критерий Фруда, является определяющим при изучении процесса перемещения:

$$Fr = \frac{gl}{v^2} = idem,$$

где g – ускорение силы тяжести; l – любой линейный параметр; v – скорость смещения.

Соблюдение при моделировании второго критерия – подобия Коши – является обязательным при учете прочности материала:

$$Ca = \frac{\rho v^2}{E} = idem,$$

где ρ – плотность материала, E – модуль упругости.

Из критериев подобия следует, что соотношения скоростей смещения, времен, прочности и линейных размеров могут быть выражены через масштаб модели соответственно:

$$n = \frac{l_H}{l_M}; \quad \frac{v_H}{v_M} = \sqrt{n}; \quad \frac{t_H}{t_M} = \sqrt{n}; \quad \frac{\sigma_H}{\sigma_M} = n,$$

где n – масштаб модели, в данном случае равный 75 при условии равенства плотностей материала модели ρ_M и природы ρ_n .

Масса модельного скважинного заряда может быть установлена, исходя из импульса давления на стенки скважины, который, согласно [1,3], равен:

$$I = \frac{16}{27} \sqrt{M_O \cdot E_O},$$

где M_O – масса ВВ, кг, E_O – общая потенциальная энергия ВВ, МДж.

Средняя величина давления в скважине равна:

$$P_O = \frac{1}{8} \rho_{BB} \cdot D^2,$$

где ρ_{BB} – плотность ВВ, кг/м³, D – скорость детонации заряда, м/с.

Общая потенциальная энергия ВВ определяется через удельную энергию единицы массы:

$$E_O = u_1 \cdot M_O,$$

где u_1 – удельная энергия, МДж/кг.

Из приведенных выше выражений следует:

$$I = \frac{16}{27} M_O \sqrt{u_1}.$$

Поскольку импульс может быть выражен через давление и время, то:

$$I = k_K \cdot P_O \cdot t = \frac{1}{8} k_K \cdot \rho_{BB} \cdot D^2 \cdot t,$$

где t – время действия продуктов взрыва на стенки скважины, мкс; k_K – коэффициент, учитывающий изменение давления в процессе истечения продуктов взрыва из скважины.

Приравнивая значения импульса, получим:

$$\frac{1}{8} k_K \cdot \rho_{BB} \cdot D^2 \cdot t = \frac{16}{27} M_O \sqrt{u_1}.$$

В большинстве случаев в модели используют ВВ иного типа в сравнении с ВВ в природе (с учетом критического диаметра), из условия

равенства импульсов можно определить массу ВВ модельного заряда:

$$\frac{1/8 \cdot k_{k1} \cdot \rho_{BB1} \cdot D_1^2 \cdot t_1}{16/27 \cdot M_{O1} \cdot \sqrt{u_1}} = \frac{1/8 \cdot k_{k2} \cdot \rho_{BB2} \cdot D_2^2 \cdot t_2}{16/27 \cdot M_{O2} \cdot \sqrt{u_2}},$$

откуда:

$$M_{O2} = M_{O1} \cdot \sqrt{K_U} \cdot k_r \cdot k_\rho \cdot k_D^2 \cdot k_t,$$

где $K_U = \frac{u_1}{u_2}$; $k_\rho = \frac{\rho_{BB1}}{\rho_{BB2}}$; $k_D = \frac{D_2}{D_1}$; $k_t = \frac{t_1}{t_2}$;

$k_k = \frac{k_{k2}}{k_{k1}}$ – масштабы соответствующих показателей.

Принимая в первом приближении, согласно [4] $k_t = 0,94$, на основе теории размерностей, определим массу модельного заряда ВВ иного типа:

$$M_{O2} = \frac{1}{n^3} \cdot M_{O1} \cdot \sqrt{K_U} \cdot k_\rho \cdot k_D^2 \cdot k_t$$

Объемная модель (рис.1) была сложена из шести равноценных по всем физико-механическим свойствам слоев, но окрашенных в белый и темный цвета, из того же материала был использован буфер.

В соответствии с правилами физического моделирования при масштабе 1:75 на модели располагалось четыре ряда скважин по четыре в каждом, в которые помещали заряды ТЭНа, при плотности 0,6 г/см³, что обеспечивало скорость детонации 3500 м/с при длине заряда 12 см.

Весь процесс регистрировали с помощью скоростной кинокамеры СКС-1м при частоте 2700 кадров в секунду. Покадровый анализ позволил вычислить основной показатель – скорость смещения всех элементов уступа. Под постоянным контролем во всех экспериментах находились массы взрываемого блока и буфера (m , m_6) и их плотности до (ρ_1, ρ_{61}) и после взрыва (ρ_2, ρ_{62}).

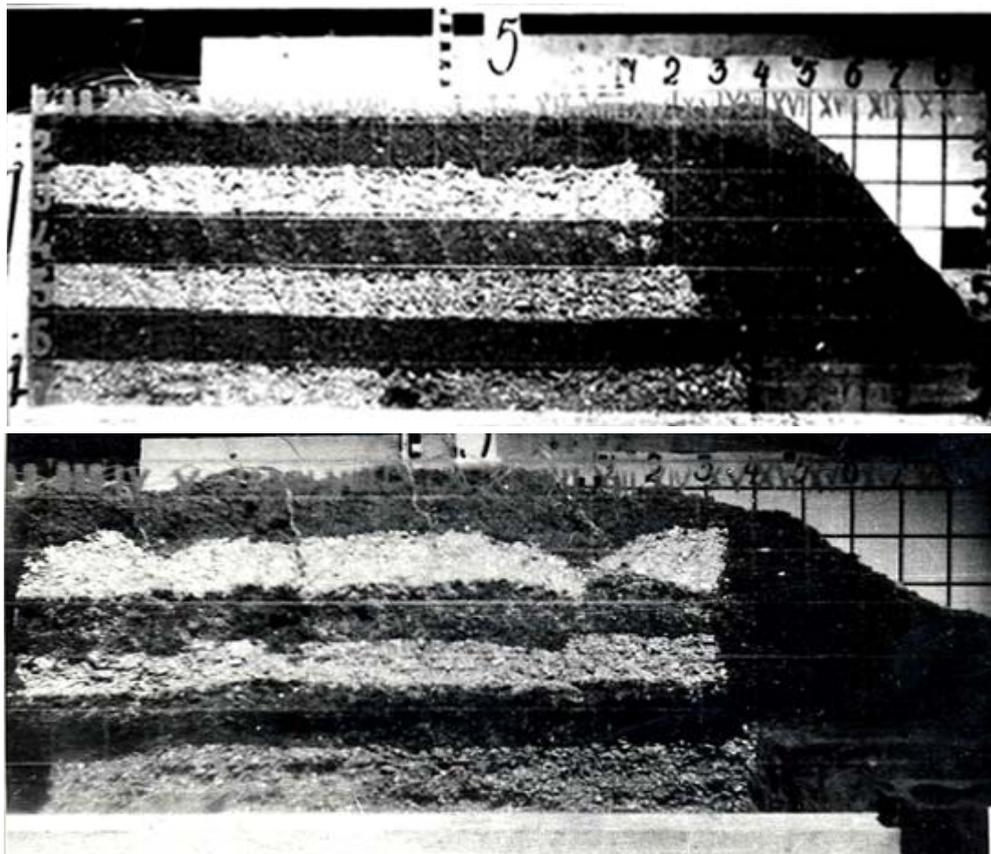


Рис. 1. Вид модели до и после взрыва.

Расчет параметров буфера выполнен при следующих условиях. Принято, что, в соответствии с законом сохранения импульса, общая кинетическая энергия, которой обладают расширяющиеся продукты детонации, расходуется на разрыв связей между частицами эквивалентного материала, на перемещение взорванной части модели, уплотнение буфера, возможные перемещения самого буфера и различные виды потерь энергии, в том числе обусловленные взрывчатым превращением.

Плотность ранее взорванной горной массы, служащей в качестве буфера, отличается от плотности породы в массиве на величину коэффициента разрыхления:

$$\rho_{\delta 1} = \frac{\rho_1}{K_{P_{и}}}$$

При испытании материала буфера получены следующие средние данные:

предел прочности на сжатие, $\sigma_{сж} = 0,0014$ МПа;

плотность буфера до взрыва массива, $\rho_{\delta 1} = 2,1$ г/см³;

скорость продольной волны, $C_p = 400$ м/с.

В расчет вводится $[\sigma_{сж}]$, так как при взрыве массива буфер воспринимает сжимающие нагрузки со стороны движущейся массы откоса уступа.

Величина максимальной средней скорости разрушенного взрывом массива, которая может быть погашена, ограничена прочностью материала буфера и может быть определена из соотношения:

$$v_{1\max} = \frac{[\sigma_{сж}]}{\rho_{,1} \cdot C_{P\delta}}$$

В соответствии с 3-м законом Ньютона, неполный баланс импульсов позволяет определить в первом приближении мощность буфера для природы:

$$I_{BB} = I_M + I_{\delta},$$

где I_{BB} , I_M и I_{δ} – соответственно импульсы продуктов взрыва, разрушенной взрывом массы блока и массы буфера.

Используя известные соотношения [3], выражение можно заменить на следующее:

$$\theta \sqrt{2M_O \cdot E_O} = M_1 \cdot v_1 + m_{\delta H} \cdot v_{1\max},$$

где θ – коэффициент, учитывающий не стационарность движения продуктов детонации, принятый равным 0,85; v_1 – средняя скорость перемещения контура разрушенной взрывом

массы; M_1 – масса блока; m_{δ} – масса буфера; $v_{1\max}$ – скорость смещения буфера.

Из последнего выражения определяется масса буфера модели:

$$m_{\delta M} = \left(\frac{\theta \sqrt{2M_O \cdot E_O} - M_1 \cdot v_1}{v_{1\max}} \right) \cdot \frac{1}{n^3}.$$

Если допустить, что при соударении разрушенной массы модели с массой буфера, последний должен уплотняться без изменения прилегающей к откосу площади и это уплотнение в пределе имеет значение плотности материала модели до взрыва, то мощность буфера по линии главного удара (направление, соответствующее положению средине заряда) определится:

$$Z_{\delta M} = \frac{m_{\delta M} \cdot g}{K_{Pi} \cdot \rho_{\delta 1} \cdot S_{\delta 1}},$$

где S_{δ} – площадь откоса уступа, соприкасающаяся со стенкой буфера, см².

В данном эксперименте мощность буфера составила 20 см, т.е. была равна высоте уступа модели.

Непосредственными измерениями на моделях установлено, что объем буфера после взрыва уменьшается на 12–15%, т.е. его плотность также увеличивается в тех же пределах при первоначальной плотности 2,05–2,1 г/см³. Во всех опытах конечная средняя плотность буфера не превышала 2,3–2,4 г/см³. Таким образом, коэффициент уплотнения составил около 1,12–1,15, при этом установлено также, что средняя высота буфера после взрыва никогда не была больше высоты до взрыва. Это свидетельствует о неизменности площади поперечного сечения буфера. В таком случае перемещение плоскости откоса уступа может быть определено с учетом коэффициента уплотнения:

$$l_1 = \frac{\rho_{\delta 2}}{\rho_{\delta 1}} \cdot Z_{\delta M}.$$

Это условие обуславливает явление гашения скорости, но при коэффициенте уплотнения меньше критического перемещение самого буфера стремится к 0.

В ходе скоростной киносъемки установлены скорости смещения точки откоса уступа, расположенной по линии главного удара, также скорости движения точек внутри массива v_1 внутри буфера $v_{1\max}$ и на его поверхности v_2 . Все это позволило определить остальные части баланса импульса, куда входят величины смещений элементов уступа и буфера.

Определение баланса импульса взрыва по результатам экспериментов

| Показатель | Прямое инициирование | | Обратное инициирование | |
|--|----------------------|-----------|------------------------|-----------|
| | Без буфера | С буфером | Без буфера | С буфером |
| Всего зарядов в блоке, шт. | 16 | 16 | 16 | 16 |
| Суммарная масса ВВ, г | 7,8 | 8,0 | 7,8 | 8,0 |
| Импульс взрыва, $I_{пв}$, кгм/с | 8,58 | 8,82 | 8,58 | 8,82 |
| Масса взрываемого блока, $m_{б1}$, кг | 11,65 | 10,5 | 11,0 | 9,75 |
| Средняя скорость смещения взорванного блока, v_1 , м/с | 0,7 | 0,78 | 0,75 | 0,86 |
| Количество движения взорванного массива, I_M , кгм/с | 8,17 | 7,90 | 8,25 | 8,40 |
| Масса буфера, $m_б$, кг | – | 3,1 | – | 3,1 |
| Скорость движения массы буфера, v_{1max} , м/с | – | 0,0915 | – | 0,0940 |
| Импульс уплотнения буфера, $I_{упл.буф.}$, кгм/с | – | 0,284 | – | 0,291 |
| Скорость смещения поверхности буфера, v_2 , м/с | – | 0,073 | – | 0,0 |
| Импульс смещения буфера, $I_{см.буф.}$, кгм/с | – | 0,226 | – | 0,0 |
| Потери импульса, $I_{пот.}$, кгм/с | 0,41 | 0,41 | 0,33 | 0,281 |
| Снижение потерь, % | – | – | 19,5 | 31,5 |

Полагая, что все виды потерь энергии равноценны при взрывах с буфером и без него, а также при прямом и обратном инициировании зарядов, баланс количества движения представляется в виде:

$$I_{пв} = I_M + I_{упл.буф.} + I_{см.буф.} + \Sigma I_{пот.},$$

где $I_{пв}$ – импульс продуктов взрыва; I_M – импульс движущихся взорванного массива; $I_{упл.буф.}$, $I_{см.буф.}$ – импульсы уплотнения и смещения буфера, соответственно; $\Sigma I_{пот.}$ – суммарные потери импульса.

Элементы баланса соответственно равны:

$$I_{пв} = \theta \sqrt{2M_{DD} \cdot C_{ВВ} \cdot U_{ВВ}},$$

$$I_M = M_1 \cdot v_1,$$

$$I_{упл.буф.} = m_{б1} \cdot v_{1max},$$

$$I_{см.буф.} = m_{б1} \cdot v_2$$

Подставив значения элементов баланса импульса в исходное соотношение, получим:

$$I_{пот.} = \theta \sqrt{2M_{ВВ} \cdot C_{ВВ} \cdot U_{ВВ}} - m_{б1}v_1 - m_{б1}(v_{1max} + v_2).$$

В сводной таблице приведены результаты вычислений.

Снижение уровня потерь энергии взрыва при обратном инициировании очевидно в обоих вариантах (с буфером и без него), а уменьшение их почти на 30% в случае наличия буфера открывает новые перспективы в активном способе управления энергией взрыва, особенно при использовании простейших смесевых ВВ.

Литература

1. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. – М.: Наука, 1975.
2. Баранов Е.Г., Тангаев И.А., Додис Я.М. Некоторые параметры физического состояния взорванного массива и их связь с коэффициентом разрыхления // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск: СО АН СССР, 1972. – N2.
3. Друкованый М.Ф., Ефремов Э.И., Комир В.М. и др. Теоретические исследования влияния величины подпорной стенки на ширину развала горной массы // Взрывное дело, 62/19. – М.: Недра, 1967.
4. Покровский Г.И., Федоров И.С. Действие удара и взрыва в деформируемых средах. – М., 1957.