

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

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

**Я.М. Додис** – докт. техн. наук, профессор

---

Представлены результаты физического моделирования процесса взрыва при различных условиях и направлениях инициирования зарядов. Выявлена эффективность обратного инициирования при взрывании на буфер, которая на 30% выше, чем прямом инициировании. Определена область использования этого способа.

*Ключевые слова:* энергия взрыва; инициирование зарядов; буфер; баланс импульса взрыва.

Использование простейших взрывчатых смесей на основе аммиачной селитры с различными добавками заводского изготовления или приготавливаемых непосредственно на месте применения, как правило, требуют 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 устья 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, зависящей 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 предварительно (до разрушения) напряженно-деформированное

состояние (НДС) объемов горной породы, окружающих заряд. Как показано в работе [1], в зависимости от соотношения  $D/C_p$  уровень НДС будет изменяться, что отразится на результатах взрыва. Так, в этой работе 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.

Применение высокопроизводительных буровых станков привело к тому, что 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). Это технологическое решение позволяет решить задачи 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:

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

$K_{PI} = \frac{\bar{K}_p}{0,960N^{0,1}}$  – 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 иницировании 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  $\rho$  – 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  $\rho_m$  и природы  $\rho_n$ .

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  $\rho_{\text{ВВ}}$  – плотность ВВ, кг/м<sup>3</sup>;  $D$  – скорость детонации заряда, м/с.

Общая потенциальная энергия ВВ определяется через удельную энергию единицы массы:

$$E_0 = u_1 \cdot M_0,$$

где  $u_1$  – удельная энергия, МДЖ/кг.

Из приведенных выше выражений следует:

$$I = \frac{16}{27} M_0 \sqrt{u_1}.$$

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

$$I = k_K \cdot P_0 \cdot t = \frac{1}{8} k_K \cdot \rho_{\text{ВВ}} \cdot D^2 \cdot t,$$

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

Приравнявая значения импульса, получим:

$$\frac{1}{8} k_K \cdot \rho_{\text{ВВ}} \cdot D^2 \cdot t = \frac{16}{27} M_0 \sqrt{u_1}.$$

В большинстве случаев в модели используют ВВ иного типа по сравнению с ВВ в натуре (с учетом критического диаметра), из условия равенства импульсов можно определить массу ВВ модельного заряда:

$$\frac{1/8 \cdot k_{K1} \cdot \rho_{\text{ВВ1}} \cdot D_1^2 \cdot t_1}{16/27 \cdot M_{O1} \cdot \sqrt{u_1}} = \frac{1/8 \cdot k_{K2} \cdot \rho_{\text{ВВ2}} \cdot D_2^2 \cdot t_2}{16/27 \cdot M_{O2} \cdot \sqrt{u_2}},$$

откуда:

$$M_{O2} = M_{O1} \cdot \sqrt{K_u} \cdot k_r \cdot k_\rho \cdot k^2_D \cdot k_t,$$

где  $K_U = \frac{u_1}{u_2}$ ;  $k_\rho = \frac{\rho_{\text{ВВ1}}}{\rho_{\text{ВВ2}}}$ ;  $k_D = \frac{D_2}{D_1}$ ;  $k_t = \frac{t_1}{t_2}$ ;

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

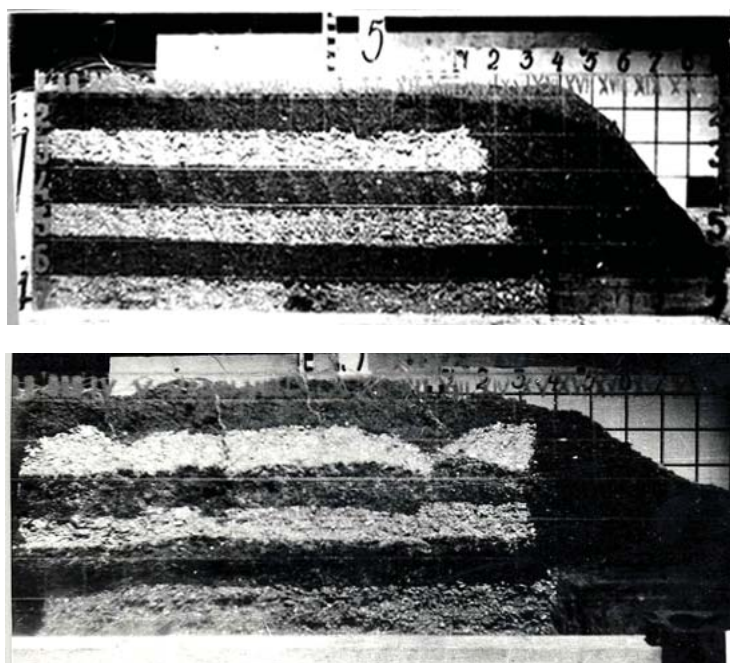
Принимая в первом приближении, согласно [4]  $k_t = 0,94$ , на основе теории размерностей определим массу модельного заряда ВВ иного типа:

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

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

В соответствии с правилами физического моделирования при масштабе 1:75 на модели располагались четыре ряда скважин по 4 в каждом, в которые помещались заряды ТЭНа, при плотности 0,6 г/см<sup>3</sup>, что обеспечивало скорость детонации 3500 м/с при длине заряда 12 см.

Весь процесс регистрировался с помощью скоростной кинокамеры СКС-1м при частоте 2700 кадров в секунду. Покадровый анализ по-



Вид модели до и после взрыва.

зволит вычислить основной показатель, каким является скорость смещения всех элементов уступа. Под постоянным контролем во всех экспериментах находились массы взрывающегося блока и буфера ( $m$ ,  $m_6$ ) и их плотности до ( $\rho_1, \rho_{61}$ ) и после взрыва ( $\rho_2, \rho_{62}$ ).

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:

$$\rho_{61} = \frac{\rho_1}{K_{Puu}}.$$

При испытании материала буфера получены следующие средние данные:

- предел прочности на сжатие,  $\sigma_{сж} = 0,0014$  МПа;
- плотность буфера до взрыва массива,  $\rho_{61} = 2,1$  г/см<sup>3</sup>;
- 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:

$$v_{1max} = \frac{[\sigma_{сж}]}{\rho_{,1} \cdot C_{P6}}.$$

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

$$I_{BB} = I_M + I_6,$$

где  $I_{BB}$ ,  $I_M$  и  $I_6$  – соответственно импульсы продуктов взрыва, разрушенной взрывом массы блока и массы буфера.

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

$$\theta \sqrt{2M_O \cdot E_O} = M_1 \cdot v_1 + m_{6H} \cdot v_{1max},$$

где  $\theta$  – коэффициент, учитывающий не стационарность движения продуктов детонации, принятый равным 0,85;  $v_1$  – средняя скорость перемещения контура разрушенной взрывом массы;  $M_1$  – масса блока;  $m_6$  – масса буфера;  $v_{1max}$  – скорость смещения буфера.

Из последнего выражения определяется масса буфера модели:

$$m_{6M} = \left( \frac{\theta \sqrt{2M_O \cdot E_O} - M_1 \cdot v_1}{v_{1max}} \right) \cdot \frac{1}{n^3}.$$

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 середины заряда) определится:

$$Z_{6M} = \frac{m_{6M} \cdot g}{\bar{K}_{Pi} \cdot \rho_{61} \cdot S_{61}},$$

где  $S_6$  – площадь откоса уступа, соприкасающаяся со стенкой буфера, см<sup>2</sup>.

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/см<sup>3</sup>. Во всех опытах конечная средняя плотность буфера не превышала 2,3–2,4 г/см<sup>3</sup>. 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. Этот факт говорит о неизменности площади поперечного сечения буфера. В таком случае перемещение плоскости откоса уступа может быть определено с учетом коэффициента уплотнения:

$$l_1 = \frac{\rho_{62}}{\rho_{61}} \cdot Z_{6M}.$$

Это условие обуславливает гашение 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, а также скорости движения точек внутри массива

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

$v_1$ , внутри буфера  $v_{1max}$  и на его поверхности  $v_2$ . Все это позволило определить остальные части баланса импульса, куда входят величины смещений элементов уступа и буфера.

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 (см. таблицу).

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:

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

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. – №2.
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.