Записки Ленинградского горного института им.Г.В.Плеханова.
Т. 125. Л., 1991

УДК 622.235.5/6

НАПРАВЛЕННОЕ РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД УДЛИНЕННЫМИ КУМУЛЯТИВНЫМИ ЗАРЯДАМИ

М.А.НЕФЕДОВ, А.Н.МУРАХИН, О.А.РЫЖУХИН

С середины 60-х годов в отечественной и зарубежной практике начинает развиваться и совершенствоваться новое прогрессивное направление ведения открытых и подземных горных работ, в основе которого лежит контурное взрывание шпуровых или скважинных зарядов ВВ.

Применение контурного взрывания в технологии горных работ обеспечивает направленное разрушение массива: создание плоскостей разрыва с сохранением целостности приконтурных зон [1,2,4]. Анализ используемых в горном деле технологий направленного разрушения позволил установить, что традиционный подход к созданию протяженных плоскостей разрыва и контуров, который сводится к бурению ряда параллельных шпуров или скважин и взрыванию в них осесимметричных удлиненных зарядов, является в настоящее время основным.

Научные исследования методов направленного разрушения ведутся в основном в двух направлениях:

1) разработка специальных осесимметричных конструкций зарядов из низкобризантных составов ВВ для осуществления контролируемого и достаточно легко регулируемого по энергетике нагружения массива;

2) разработка способов направленного разрушения горных пород взрывом единичного шпурового или скважинного заряда.

Механизм разрушения породы в последнем случае обусловлен концентрацией напряжений на поверхности шпура или скважины по линии преимущественного направления плоскости разрыва массива. На стенках шпуров (скважин) механическим или взрывным способом в нужном направлении создаются насечки, которые выполняют роль концентраторов напряжений и стимулируют рост магистральной трещины при последующем взрывном нагружении массива [3]. Многоступенчатый технологический процесс, связанный с созданием концентраторов механическим способом, представляется недостаточно эффективным. Наиболее перспективным направлением реализации подобного механизма направленного разрушения горных пород является использование конструкций зарядов, которые создавали бы на первом этапе функционирования концентраторы напряжений, а на втором – импульс давления в шпуре (скважине), способствующий росту магистральной трещины.

Одним из типов зарядов, обеспечивающих направленное действие при взрывании, являются удлиненные кумулятивные заряды (УКЗ), которые представляют собой металлическую или пластмассовую трубку, наполненную бризантным взрывчатым веществом (ВВ). На боковой поверхности трубки выполняется кумулятивная канавка цилиндрической, клиновой или сферической формы. При детонации заряда УКЗ происходит метание его облицовки продуктами взрыва. Кумулятивная канавка является зоной, в которой фокусируется материал облицовки при метании: там происходит схлопывание метаемых элементов с последующим формированием высокоплотного двумерного кумулятивного ножа (КН), который движется в направлении, противоположном оси симметрии УКЗ, и несет в себе основную энергию заряда. При воздействии КН на породу происходит его внедрение с образованием кратера глубиной, определяемой размерами КН, его скоростью и акустическими свойствами материала.

При исследовании процесса направленного разрушения горных пород удлиненными кумулятивными зарядами были проведены следующие эксперименты. Взрывом УКЗ, установленных в шпурах или над поверхностью блоков из органического стекла, мрамора или гранита, создавались трещины, размеры которых фиксировались. Применялись заряды диаметром 9 мм, с полуцилиндрической кумулятивной выемкой, заполненные октогеном. Диаметр шпуров 29 мм. Расстояния между кумулятивной выемкой заряда и стенкой шпура (поверхностью блока) менялись от 0 до 20 мм.

Результаты эксперимента (см. таблицу) показывают, что длина трещин при взрывании УКЗ в шпурах и над поверхностью материалов значительно различается. Полная длина трещин в блоках, созданных взрывом наружного заряда, практически не отличается от глубины кратера, полученного при внедрении КН, а при расколе блоков шпуровыми зарядами полная длина трещин превышает глубину кратера от 2,5 до 32 раз в зависимости от параметров расположения УКЗ в шпуре и исследуемого материала. Таким образом, эффект направленного разрушения УКЗ имеет место только при внутреннем расположении зарядов.

Это связано с более полным использованием энергии взрыва: сначала при срабатывании УКЗ формируется КН, внедряющийся в блок с образованием кратера, который является концентратором напряжений на границе системы полость – массив, затем при расширении продуктов детонации (ПД) в шпуре создается избыток давления, под действием которого происходит растяжение внутреннего контура полости, и создаются тангенциальные растягивающие напряжения, обеспечивающие рост трещины из кратера, созданного КН.

Длительность действия давления в полости определяется длиной шпура, т.е. временем распространения детонационной волны и волны разгрузки.

При взрывании УКЗ над поверхностью разрушаемого материала происходит быстрое расширение ПД в окружающую среду без создания сколько-нибудь существенного избыточного давления внутри кратера и дальнейшего роста трещины практически не наблюдается.

Эксперименты по направленному разрушению среды УКЗ, расположенными в шпурах, показали, что, изменяя геометрические размеры УКЗ, тип ВВ, форму

Экспериментальные и расчетные параметры трещин отрыва при разрушении образцов взрывом УКЗ

Материал образца	Расстояние от УКЗ до стенки шпура, мм	Эксперимент		Расчетная полная длина трещины, мм
		Глубина кратера, мм	Полная длина трещины, мм	
Органическое стекло	0	16,5 / 16,7	16,8 / 43,0	17,2 / 47,7
	5	27,0 / 27,2	27,2 / 88,0	27,4 / 88,6
	10	34,0 / 34,2	34,2 / 101,0	35,1 / 102,3
	20	28,0 / 28,2	28,0 / 90,0	26,0 / 90,3
Мрамор	0	5,0 / 5,2	5,0 / 108,0	5,6 / 106,5
	5	21,0 / 11,3	11,2 / 140,0	11,9 / 138,7
	10	8,0 / 8,6	8,1 / 226,0	8,5 / 129,2
	20	3,7 / 3,9	3,9 / 96,0	3,3 / 95,2
Гранит	0	3,0 / 3,0	3,1 / 96,1	3,2 / 96,4
	5	6,0 / 6,1	6,2 / 140,0	6,3 / 142,0
	10	9,0 / 9,1	9,0 / 210,0	9,1 / 211,5
	20	2,5 / 2,6	2,6 / 88,0	2,8 / 93,0

Примечание. В числителе и знаменателе – при взрыве заряда, расположенного над поверхностью блока и в шпуре соответственно.

кумулятивной выемки, можно добиться увеличения глубины кратера при внедрении КН в горную породу, а следовательно, и увеличения полной длины магистральной трещины.

Процесс взаимодействия КН с горной породой можно представить следующим образом. Предположим, что КН формируется суперпозицией отдельных кумулятивных струй (КС) при последовательном сложивании элементарных сечений УКЗ по его длине. Каждая отдельная КС при движении к породе и взаимодействии с ней ведет себя одинаково, причем это взаимодействие можно рассматривать как взаимодействие стержней с породой в рамках модернизированной гидродинамической теории [6,7]. Единственным существенным отличием от

классической теории является изменение скорости по длине КС, которую можно учесть следующим образом:

$$V(x) = V_{\Gamma} - (V_{\Gamma} - V_{\text{ХВ}})\frac{x}{\ell}, \qquad (1)$$

где $V(x)$ - скорость элемента КС, располагающегося на расстоянии x от головного элемента КС; V_{Γ} и $V_{\text{ХВ}}$ - скорости головного и тыльного элементов КС; ℓ - длина КС.

Для применения классической теории следует также рассматривать КС как суперпозицию отдельных элементов, имеющих постоянную скорость движения. При этом общая глубина внедрения КН в породу L равна сумме глубин внедрения отдельных элементов: $L = \sum_{i=1}^{n} L_i$.

Взаимодействие каждого элемента КС с породой, которая рассматривается как полубесконечная преграда, рассчитывается по модели несжимаемой жидкости. Эта модель приемлема потому, что при скоростях головных элементов КС УКЭ в интервале $(2{,}7\text{–}4{,}0)\cdot 10^3$ м/с, которые имеют место на практике, давление в зоне взаимодействия намного превышает предел текучести горных пород [6,7]. Следовательно, для описания взаимодействия двух потоков несжимаемой жидкости, в качестве которых рассматриваются КС и порода, можно использовать уравнение Бернулли [6]

$$\frac{1}{2}\rho_{\text{с}}(V(x)-U)^2 + \frac{1}{2}\rho_{\text{п}}U^2 + \sigma_{\text{с}} - \sigma_{\text{п}} = 0, \qquad (2)$$

где U - скорость проникания КС в породу; $\rho_{\text{с}}$ и $\rho_{\text{п}}$ - плотность струи и преграды соответственно; $\sigma_{\text{с}}$ - предел прочности материала струи; $\sigma_{\text{п}}$ - динамический предел прочности породы на сжатие.

Тогда процесс внедрения элемента КС в породу можно описать системой уравнений

$$\frac{dL}{dt} = U; \quad \frac{d\ell}{dt} = V(x) - U; \quad \rho_{\text{с}}\ell_1\frac{dV(x)}{dt} = \sigma_{\text{с}}, \qquad (3)$$

где ℓ_1 - длина невнедрившейся части элемента.

Начальные условия для уравнений (3)

$$\ell\big|_{t=0} = \ell_0; \quad V = V(x)\big|_{t=0}; \quad V = 0\big|_{t=0}; \quad \frac{dV_{\Gamma}}{dt}\Big|_{t=0} = 0. \qquad (4)$$

Совместное решение системы уравнений (1)–(4) описывает процесс внедрения КН в породу.

Процесс роста трещин из вершин кратера под действием ПД изучался на основе теории разрушения хрупких сред [3,5].

Скорость распространения трещины

$$\frac{d\ell_{\text{т}}}{dt} = \alpha C_R\sqrt{1 - \frac{K_{Ic}}{K_I}}, \qquad (5)$$

где $\ell_{\text{т}}$ - длина трещины; C_R - скорость волны Рэлея; K_{Ic} - модуль сцепле-

ния: α – коэффициент пропорциональности, $\alpha = 0{,}8 \div 1{,}0$; K_I – коэффициент интенсивности напряжений,

$$K_I = P(t)\sqrt{\frac{\pi \ell_т}{2}} \; ; \qquad (6)$$

$P(t)$ – закон изменения давления в полости,

$$P(t) = \begin{cases} P_0 & t < \dfrac{L_{шп}}{C_0} \; ; \\ P_0 \left(\dfrac{L_{шп}}{C_0 t}\right)^3 & \text{при} \quad t \geq \dfrac{L_{шп}}{C_0} \; ; \end{cases} \qquad (7)$$

$$P_0 = \begin{cases} P_{00}\left(\dfrac{d}{d_{шп}}\right)^k & \text{при } P \geq P_к \; ; \\ P_к \left(\dfrac{d}{d_{шп}}\right)^\gamma & \text{при } P < P_к \; ; \end{cases}$$

C_0 – закон изменения скорости звука в ПД,

$$C_0 = C_{00}\sqrt{\frac{P(t)}{P_{00}}} \; ; \qquad (8)$$

P_{00} – давление мгновенной детонации заряда УКЗ; d и $d_{шп}$ – диаметры УКЗ и шпура соответственно; C_{00} – начальная скорость звука в ПД; $P_к$ – давление, соответствующее изменению закона расширения ПД; k и γ – коэффициенты изоэнтропы и политропы ПД соответственно.

Система уравнений (5)–(8) решалась при начальном условии $\ell|_{t=0} = \ell_0$.

Расчетные результаты совместного решения системы (I)–(4) и (5)–(8) представлены в таблице. Высокая степень их сходимости с экспериментальными данными говорит об адекватности математической модели реальному процессу и позволяет интерпретировать на ее основе результаты экспериментов.

Зависимости, на основании которых можно оценить влияние параметров установки УКЗ в шпуре на эффективность их действия, получены при полигонных экспериментальных исследованиях в гранитных массивах (рис.I–3). Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что эффективность действия УКЗ при использовании их для направленного разрушения горных пород увеличивается при установке УКЗ на оптимальном расстоянии от стенки шпура, увеличении глубины шпура и соответственно длины УКЗ. При этом для каждого конкретного материала существует своя оптимальная плотность заряжания шпура. Это связано с тем, что давление, создаваемое в шпуре, управляет двумя конкурирующими процессами. Один из них ускоряет движение трещины, рост интенсивности напряженного состояния в вершине трещины; другой замедляет ее движение, снижая длительность действия давления за счет увеличения скорости волны разгрузки.

Таким образом, для максимального развития трещины нет необходимости создавать в шпуре высокое давление за счет увеличения массы заряда

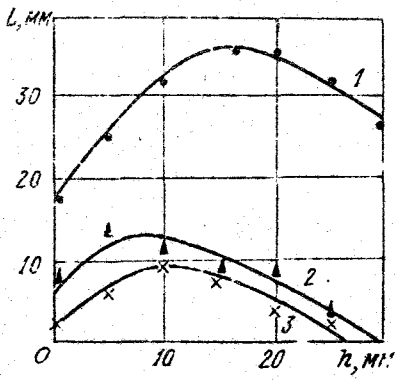


Рис.1. Зависимость глубины внедрения кумулятивного ножа L в различные материалы от расстояния h между кумулятивной выемкой заряда и стенкой шпура
1 – оргстекло; 2 – мрамор; 3 – гранит

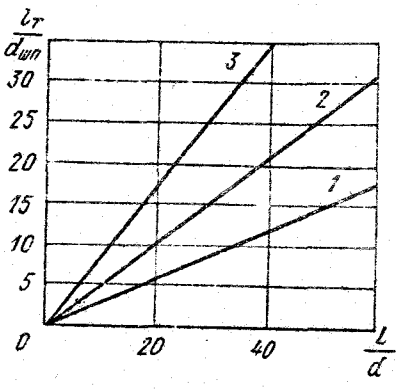


Рис.2. Зависимость относительной длины магистральной трещины $l_т/d_{шп}$ от относительной глубины шпура L/d
1 – оргстекло; 2 – мрамор; 3 – гранит; d и $d_{шп}$ – диаметр заряда и шпура соответственно; $l_т$ и L – длина трещины и шпура соответственно

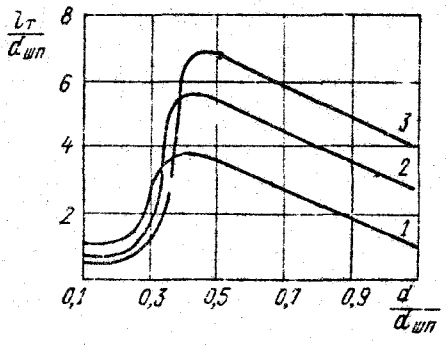


Рис.3. Зависимость относительной длины магистральной трещины от плотности заряжания шпура $d/d_{шп}$
1 – оргстекло; 2 – мрамор; 3 – гранит

или использования забойки. Необходимо только обеспечивать оптимальное соотношение $d/d_{шп}$, которое, по нашим данным, лежит в интервале 0,13–0,5. В этом случае при взрыве УКЗ в шпуре (скважине) возникает давление от 100 до 300 МПа, которое не может вызвать разрушения законтурной части массива.

Линейность зависимости относительной длины магистральной трещины от относительной глубины шпура связана с тем, что рост глубины шпура определяет увеличение длительности действия продуктов детонации (рис.2).

Эффективность использования УКЗ усиливается при одновременном взрывании зарядов в смежных шпурах, причем длина магистральной трещины увеличивается при встречном расположении кумулятивных выемок.

Согласно результатам испытаний систем из двух УКЗ в блоках из органического стекла, мрамора и гранита, полная длина трещин, созданных взрывом в двух шпурах, характеризуется следующими данными:

Материал блока	Длина трещин, мм
Оргстекло	254/126
Мрамор	415/275
Гранит	423/278

Примечания. 1. Расстояние между УКЗ и стенкой блока 5 мм.
2. В числителе и знаменателе – при встречном и параллельном взрывании соответственно.

Представленные результаты легли в основу разработки устройств направленного разрушения. Устройство представляет собой металлический каркас, на наружной поверхности которого профилированы симметричные канавки, в которых располагаются УКЗ, закрепляемые на каркасе с помощью упругих элементов. Устройство, имеющее длину 1,5–2,0 м, может стыковаться в интегральную колонку любой длины. Для ориентирования и закрепления заряда в шпуре имеются упоры.

ВЫВОДЫ

1. Исследован механизм направленного разрушения сред с помощью УКЗ.
2. Разработаны математические модели, описывающие разрушение горных пород при действии УКЗ.
3. Разработаны основные принципы создания устройств на основе УКЗ.
4. Разработана и проведена промышленная эксплуатация устройств направленного разрушения горных пород.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барон Л.И., Ключников А.В. Контурное взрывание при проходке выработок. Л.: Недра, 1967.
2. Барон Л.И., Тургаников И.А., Ключников А.В. Нарушение пород при контурном взрывании. Л.: Недра, 1975.
3. Исаков А.Л. Расчет динамики развития направленных трещин при предварительном щелеобразовании // ФТПРПИ. 1984. № 3.
4. Ключников А.В. Современный уровень развития, эффективность применения и задачи внедрения контурного взрывания на открытых и подземных горных работах и совершенствование проектирования и производства горных пород с применением контурного взрывания. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1983.
5. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела. Новосибирск: Наука, 1977.
6. Самогонян А.Л. Проникание. М.: Изд-во МГУ, 1974.
7. Тейт А. Теория торможения длинных стержней после удара по мишени // Механика: Сборник переводов. 1968. № 5.