

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАРЯДОВ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД КОНТАКТНЫМ ВЗРЫВОМ

А. В. Михалюк, П. А. Паршуков

Институт геофизики НАН Украины, 252054 Киев, Украина

Дано сравнение разрушающей способности зарядов контактного действия различной конструкции нескольких взрывчатых веществ. Показано, что эффективность контактного взрыва возрастает с увеличением плотности и скорости детонации взрывчатых веществ, плотности прилегания заряда к разрушаемой поверхности и зависит от акустических свойств разрушаемой среды.

Разрушению горных пород и конструктивных материалов зарядами контактного действия уделяется мало внимания. По-видимому, это объясняется сравнительно низкой эффективностью взрыва вследствие свободного разлета продуктов детонации. В настоящее время такие заряды используются в основном как накладные для разделки негабарита на открытых разработках. Однако интерес к контактному взрыву возрождается в связи с новыми перспективами их практического использования: взрывная проходка скважин различного назначения [1], разрушение железобетонных и каменных конструкций [2], создание горнопроходческих комплексов и проходка горных выработок [3]. Особое значение контактный взрыв приобретает в условиях, когда традиционные методы взрывных работ затруднены или неприменимы: для проходки горных выработок в подводных условиях, при вскрытии подземных сооружений (бункеров, убежищ, хранилищ), при разделке завалов в районах катастроф, в военном деле и т. п. Естественно, что выполнение подобного рода работ связано, прежде всего, с выбором заряда, наиболее эффективного по разрушающему действию и в то же время обладающего минимальной массой.

Разрушающее действие взрыва определяется свойствами разрушаемой среды, типом взрывчатого вещества, конструкцией и формой зарядов, особенностями их взаимодействия. Ниже изложены результаты сравнительного анализа разрушения горных пород разнообразными зарядами контактного действия. Настоящая работа продолжает исследования, представленные в [3].

В исследованиях участвовали сотрудники Конструкторского бюро средств механизации

(г. Санкт-Петербург) А. П. Сивков, Л. С. Чернявский, В. А. Кудрявцев, организовавшие эксперименты и их материальное обеспечение. Всем им авторы выражают искреннюю благодарность.

Взрывы проводили в сухих крупнозернистых порфировидных гранитах со следующими свойствами: плотность  $2,66 \div 2,68 \text{ т/м}^3$ ; пористость  $0,42 \div 0,58 \%$ ; модуль упругости  $(6,34 \div 8,06) \cdot 10^{10} \text{ Па}$ ; коэффициент Пуассона  $0,21 \div 0,28$ ; скорость продольных упругих волн  $5,85 \div 5,95 \text{ км/с}$ ; предел прочности при одноосном сжатии  $167 \div 259 \text{ МПа}$ . Использовали различные по форме и конструкции заряды тротила, гексогена и октогена (в том числе кумулятивные и газокумулятивные). Так же, как и в [3], разрушающее действие зарядов оценивали по перемещению поверхности контакта разрушаемой среды и заряда за один взрыв в режиме проходки горных выработок типа скважин. Масса взрывчатого вещества варьировалась от 25 до 400 г, поэтому результаты обрабатывали в соответствии с принципом геометрического подобия.

Прежде всего было найдено рациональное соотношение между диаметром  $d$  и высотой заряда  $h$ . Опыты проводили с цилиндрическими зарядами прессованного тротила с плоской и сферической контактными поверхностями. Соотношение  $h/d$  варьировалось в диапазоне  $0,25 \div 1,8$ . Радиус сферической части заряда приблизительно соответствовал радиусу закругления забоя выработки [3]. На рис. 1 представлена зависимость установившегося перемещения поверхности контакта за один взрыв ( $\Delta r$ ), отнесенного к радиусу эквивалентного тротилового заряда сферической симметрии ( $r_3$ ), от соотношения  $h/d$ . Видно, что наиболее эффек-

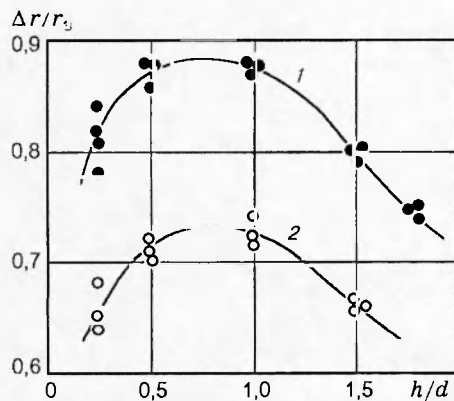


Рис. 1. Зависимость углубления скважины за один взрыв от соотношения между высотой и диаметром заряда со сферической (1) и плоской контактными поверхностями

тивны заряды с  $h/d = 0,6 \div 1,0$ . При меньших значениях  $h/d$  работоспособность заряда падает в связи с быстрым уменьшением его массы (энергии); при  $h/d > 1$  эффективность взрыва снижается вследствие нерационального использования энергии взрывчатого вещества (ВВ) тыльной части заряда. На этом основании во всех последующих опытах принимали  $h/d = 1$ . Это тем более удобно, что стандартные тротильные шашки Т-400 цилиндрической формы имеют аналогичное соотношение между высотой и диаметром.

При оптимальной форме зарядов среднее углубление выработки за один взрыв составляет  $(0,7 \div 0,73)r_3$  для зарядов с плоской и  $(0,8 \div 0,88)r_3$  для зарядов со сферической контактной поверхностью. Эти данные, удовлетворительно согласующиеся с изложенными в [3], свидетельствуют о том, что работа заряда контактного действия тем эффективнее, чем плотнее он прилегает к разрушаемой поверхности: при оптимальном соотношении  $h/d$  заряды со сферической контактной поверхностью оказались эффективнее более чем на 20% зарядов с плоским торцом. Заметим, что установленное углубление выработки за взрыв на порядок меньше размеров зоны дробления и в  $2 \div 2,5$  раза меньше радиуса подземной полости, образующихся при камуфлетных взрывах в аналогичных гранитных массивах [4]. Столь низкий коэффициент полезного действия контактного взрыва обусловлен как относительно свободным истечением продуктов детонации (по стволу скважины) и связанным с этим снижением давления на границе с разрушаемой средой, так и интенсивным переизмельчением разру-

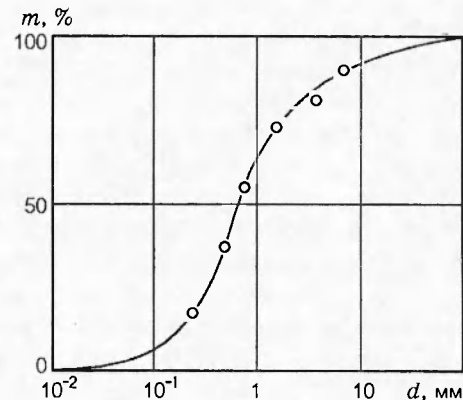


Рис. 2. Гранулометрический состав продуктов разрушения гранитов контактным взрывом

шаемого материала. Об этом свидетельствует granulometricкий состав продуктов разрушения, приведенный на рис. 2. Анализ состава показывает, что 65% дробленого материала составляют частицы размером до 1 мм, а содержание частиц размером более 10 мм не превышает 7%.

Изменение полезной работы контактного взрыва в зависимости от плотности прилегания ВВ к разрушаемой поверхности послужило основанием для испытаний зарядов, призабойная часть которых покрыта пластичным ВВ, обеспечивающим надежный контакт заряда с разрушаемой поверхностью. Как показали наблюдения, если заряд с плоской контактной поверхностью опирается на забой через пластинку Г-75, гексопласт 74 или ЛТИ-4, его разрушающее действие увеличивается с  $0,72r_3$  до  $(1,06 \div 1,14)r_3$  или в  $1,47 \div 1,58$  раза, хотя детонационные свойства подложки существенно не отличаются от детонационных свойств основного ВВ (тротила). Это обстоятельство может быть использовано при разработке конструкций зарядов с эластичной контактной поверхностью (например, для горно-проходческих комплексов с принудительной подачей зарядов на забой).

Можно предположить, что усиление разрушающего действия зарядов с пластичной подложкой и зарядов с контактной поверхностью, идентичной поверхности разрушения, связано с возбуждением в породном массиве более интенсивного напряженного состояния. Если этот вывод справедлив, то аналогичный эффект должен наблюдаться и при использовании зарядов ВВ с более высокими детонационными свойствами. Для экспериментальной

проверки этого вывода проведены испытания зарядов ВВ одинаковой массы со сферической контактной поверхностью из тротила, гексогена и октогена. Изменение глубины выработки  $r$  для таких зарядов показано на рис. 3, на основании которого можно сделать следующие выводы. Во-первых, линейный характер увеличения глубины выработки подтверждает установленную в [3] постоянную величину углубления выработки за взрыв, которая в экспериментах составила:  $0,875r_3$  для зарядов тротила,  $1,093r_3$  для гексогена и  $1,310r_3$  для октогена. Однако если в [3] скорость углубления стабилизировалась лишь после  $2 \div 4$  взрывов, в описываемых экспериментах только при первом взрыве наблюдалось углубление, в  $1,5 \div 2$  раза (как и в [3]) превышающее установившееся, и фактически со второго взрыва скорость углубления стабилизировалась. Во-вторых, усиление бризантности ВВ способствует заметному увеличению разрушающего действия контактного взрыва: заряды из гексогена оказались на 25%, а заряды из октогена на 50% эффективнее зарядов прессованного тротила. Сравним полученный результат с изменением давления на фронте детонационной волны, рассчитанным по известной формуле [5]:  $p = \rho D^2/4$ , где  $\rho$  — плотность ВВ,  $D$  — скорость его детонации. Расчеты с использованием данных о свойствах ВВ, приведенных в [6], показывают, что давление продуктов детонации гексогена и октогена соответственно на 34 и 57% больше, чем у тротила. Это качественно и количественно соответствует отмеченному выше результату для скорости проходки выработок. Таким образом, вывод о том, что эффективность контактного взрыва возрастает с увеличением амплитуды контактного давления, достаточно объективный и может послужить основанием для выбора рациональной конструкции заряда. Одним из путей решения такой проблемы может быть создание зарядов, работающих по принципу газокумулятивного действия [5, 7]. Их эффективность основана на том, что при детонации трубчатых зарядов ВВ в их полости образуется ударная волна, распространяющаяся вдоль канала со скоростью, значительно превышающей скорость детонации ВВ (в 1,75 раза для плотных ВВ и в 1,65 раза для ВВ малой плотности), причем с увеличением окружающего давления скорость ударной волны существенно возрастает. Поскольку давление на поверхность разрушения пропорционально квадрату скорости потока продуктов детонации,

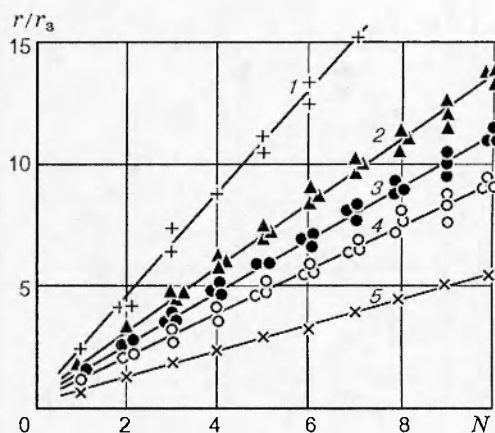


Рис. 3. Изменение глубины скважины при последовательном взрывании сплошных зарядов октогена (2), гексогена (3) и тротила (4), а также газокумулятивных зарядов из тротила (1) и аммонита 6ЖВ (5) ( $N$  — количество взрывов)

можно ожидать, что применение газокумулятивных зарядов будет способствовать повышению эффективности контактного взрыва.

Необходимо отметить следующее. Если оптимальное соотношение между диаметрами заряда  $d_2$  и его внутренней полости  $d_1$  обеспечить достаточно просто (согласно [7]  $d_2/d_1 \approx 2 \div 3$ ), то оптимальную длину полости  $l$  ( $7 \leq l/d_1 \leq 25$ ) не всегда удастся выдержать, поскольку при проведении технологических операций сложно обеспечить пространственную ориентацию удлиненного заряда на контакте с разрушаемой поверхностью. Поэтому в описываемых ниже экспериментах использовали укороченные заряды следующих размеров:  $d_2 = 50$  мм;  $d_1 = 25$  мм;  $l = 130$  мм; общая длина заряда 150 мм;  $l/d_1 = 5,2$ . В качестве ВВ брали прессованный тротил (масса заряда 360 г) и уплотненный аммонит 6ЖВ (масса заряда 230 г). Сыпучее взрывчатое вещество размещали в специальном корпусе из плотной бумаги.

Результаты экспериментов иллюстрируют зависимости 1 и 5 на рис. 3. Видно, что для газокумулятивных зарядов из аммонита 6ЖВ среднее углубление скважины за взрыв составляет  $(0,5 \div 0,55)r_3$ , в то время как для зарядов из тротила оно возрастает до  $(2,1 \div 2,2)r_3$ , что почти в 2,5 раза больше, чем для аналогичных по массе сплошных тротильных зарядов (заметим, что данные по зарядам из аммонита 6ЖВ удовлетворительно совпадают с тем, что изложено в [8] для зарядов с  $l/d_1 = 2$ ). Отсюда можно сделать вывод, что газокумуля-

Углубление скважин за один взрыв при проходке в гранитах зарядами с кумулятивной выемкой

ВВ	$\alpha$ , град	Углубление	
		$\Delta r$ , см	$\Delta r/r_3$
Тротил	75	1,52–1,63	0,39–0,41
	90	1,80–1,91	0,46–0,48
	120	2,17–2,34	0,55–0,59
	135	2,81–2,91	0,71–0,74
	180 (0)	2,92–3,00	0,74–0,76
Гексоген	75	3,39–3,49	0,86–0,88
	120	3,67–3,71	0,93–0,94
	180 (0)	3,71–3,79	0,94–0,96
Октоген	75	3,83–3,91	0,97–0,99
	120	3,61–3,79	0,91–0,96
	180 (0)	4,45–4,54	1,13–1,15

Примечание. Эксперименты с  $\alpha = 180^\circ$  (0) выполнены при отсутствии облицовки.

тивные заряды обладают значительно большей разрушительной способностью вдоль оси газокумулятивного канала, чем сплошные заряды вдоль своей оси.

Из практики взрывных работ известно, что разрушающее действие взрыва зависит от наличия в разрушаемой среде поверхностей обнажения, влияющих на формирование ее напряженного состояния. При проходке горных выработок типа скважин искусственно создать такие поверхности обнажения не представляется возможным. Лишь при применении кумулятивных зарядов можно достичь некоторого подобия поверхности обнажения в виде кумулятивного отверстия, образование которого может сопровождаться предразрушением среды, что облегчает работу последующего заряда. Эти рассуждения послужили основанием для изучения разрушающего действия кумулятивных контактных зарядов. опыты проводили с зарядами из тротила, гексогена и октогена массой  $\approx 400$  г; кумулятивная выемка имела конусообразный вид с углом при вершине  $\alpha = 75 \div 135^\circ$  с облицовкой из листовой меди толщиной 1 мм.

Результаты наблюдений разрушающего действия зарядов с кумулятивной выемкой представлены в таблице. Видно, что углубление выработки за взрыв при применении зарядов с кумулятивной выемкой меньше, чем для самых эффективных зарядов с плоской контактной поверхностью ( $\alpha = 180^\circ$  или 0). Этот эффект отмечен для всех трех типов ВВ, что, по-видимому, связано со снижением контактно-

го давления продуктов детонации, обусловленным уменьшением массы ВВ на контакте заряда с разрушаемой поверхностью за счет формирования кумулятивной выемки. Подтверждением этого вывода служит увеличение разрушающего действия заряда с увеличением угла при вершине кумулятивной выемки, т. е. при уменьшении ее объема.

Следует отметить, что при взрывах кумулятивных зарядов в гранитах наблюдалось образование кумулятивных отверстий диаметром  $6 \div 8$  мм и глубиной до 8 см. Однако появление дополнительной обнаженной поверхности в виде кумулятивного отверстия не компенсирует отрицательное влияние снижения контактного давления. В отдельных опытах кумулятивное отверстие оказывалось заполненным медным «пестом» из материала облицовки, наличие которого снижало разрушающее действие взрыва на  $12 \div 23$  %.

Изложенные выше данные о разрушении горных пород зарядами контактного действия в режиме проходки скважин свидетельствуют о низком коэффициенте полезного действия контактного взрыва. Попытки увеличить его не всегда оказывались достаточно успешными: лишь при использовании высокобризантных ВВ большой плотности в зарядах, работающих по принципу газокумулятивного действия, можно существенно увеличить скорость горно-проходческих работ. Другое направление повышения эффективности контактного взрыва может быть связано с изменением акустической жесткости разрушаемой среды.

Как известно [4], под влиянием взрыва (в том числе контактного) свойства породы в пределах зоны разрушения существенно изменяются: в ней формируется затухающая с расстоянием искусственная пустотность трещиновато-порового типа, снижающая плотность породы, ее упругие и прочностные характеристики. Как следствие, акустическая жесткость породы вблизи контактной поверхности значительно уменьшается. Оценим влияние этого эффекта на механическое действие контактного взрыва.

Согласно уравнению Горансона давление в ударной волне, перешедшей из среды с волновым импедансом  $A_1$  в среду с импедансом  $A_2$ , определяется соотношением [9]

$$p_2 = 2p_1(1 + R)^{-1},$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — давление в ударных волнах в первой и второй средах соответственно;  $R =$

$A_1/A_2$ . Используя данные о свойствах гранитов в естественном состоянии и ВВ, нетрудно установить, что для первого контактного взрыва на неразрушенной поверхности гранита  $R_0 = 0,68$ . Под действием взрыва пористость гранитов вблизи контактной поверхности увеличивается примерно на  $10 \div 15\%$  [10], в связи с чем плотность разрушенной среды снижается до  $2,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , а скорость продольных волн — до  $2,2 \text{ км/с}$ . При таких условиях для контактного взрыва на разрушенной поверхности  $R_p \approx 2,01$ . Поскольку давление в детонационной волне определяется лишь свойствами ВВ, легко оценить снижение давления в породном массиве, вызванное разрушением призабойной зоны:

$$n = \frac{p_0}{p_p} = \frac{1 + R_p}{1 + R_0} = \frac{1 + 2,01}{1 + 0,68} = 1,79,$$

где индексы нуль и «р» относятся к естественному и разрушенному состоянию гранитов соответственно. Отсюда видно, что разрушение забоя скважины существенно снижает давление в разрушаемой среде.

Заметим, что эта оценка давления в породном массиве достаточно близко совпадает с упомянутым выше снижением углубления скважины при втором и последующих взрывах. Дополнительным фактором, снижающим эффективность контактного взрыва на разрушаемой поверхности, является более интенсивное затухание взрывных волн с увеличением пористости [4].

Трещиновато-пористое состояние породы в зоне разрушений отличается высокой проницаемостью. Это дает возможность изменить ее акустический импеданс за счет насыщения жидкостью. Используя закон Вилли [11], несложно подсчитать, что при полном влагонасыщении плотность среды в зоне разрушений возрастает до  $2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , скорость упругих волн — до  $4,5 \div 4,6 \text{ км/с}$ , а  $R = 0,93$ . При этих условиях давление в породе снизится всего на  $15\%$ , что должно отразиться на углублении выработки за взрыв.

Экспериментальная проверка этого вывода выполнена с использованием зарядов из тротила со сферической рабочей поверхностью. Как показали наблюдения, заводнение забоя скважины приводит к увеличению углубления выработки на  $18 \div 26\%$  (до  $(1,04 \div 1,19)r_3$ ). Это несколько ниже прогнозной оценки изменения давления в горной породе, что может быть связано с увеличением сопротивления породы разрушению за счет возрастания в обводненной

среде шаровой составляющей тензора напряжений, генерируемых взрывной волной. Можно ожидать, что выбором жидкости, заполняющей область разрушений, можно усилить положительный эффект от направленного изменения акустических свойств объекта разрушения. В частности, перспективными могут быть жидкости с высокой диэлектрической проницаемостью, способные значительно снизить прочность разрушаемой среды за счет эффекта Ребиндера.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для разрушения горных пород взрывами контактного действия следует применять заряды из плотных взрывчатых веществ с высокой скоростью детонации.

2. Наибольшей разрушающей способностью отличаются газокумулятивные заряды; в условиях бесшпуровой проходки выработок их следует использовать во всех случаях, когда можно обеспечить необходимую ориентацию заряда относительно разрушаемой поверхности и безопасность подающего (доставочного) устройства.

3. Если газокумулятивные заряды по какой-либо причине неприменимы, для контактного взрывания следует применять заряды с контактной поверхностью, аналогичной поверхности разрушения, высота которых равна их диаметру.

4. Усилению разрушающего действия контактного взрыва способствуют любые мероприятия, направленные на увеличение акустической жесткости разрушаемой среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Veselinovic V. Metode bušenja minskih busotina eksplozivom // Miniranje. 1978. God. X, br. 1. S. 17.
2. Вайхельт Ф. Руководство по промышленным взрывным работам. М.: Госстройиздат, 1960.
3. Вовк А. А., Михалюк А. В., Паршуков П. А. Некоторые закономерности проходки выработок контактным взрывом // Горн. журн. 1982. № 1. С. 31.
4. Михалюк А. В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. Киев: Наук. думка, 1980.
5. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, Р. П. Чельшев, Б. И. Шехтер. М.: Наука, 1975.
6. Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1973.

7. Мержиевский Л. А., Титов В. М., Фаденко Ю. И. и др. Высокоскоростное метание твердых тел // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 77.
8. Михалюк А. В., Писарев Ю. А. Механическое действие газонакопительных зарядов в горных породах // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 123.
9. Кук М. А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. М.: Недра, 1980.
10. Ковтун И. Н., Федоренко П. И. Внедрение и исследование рациональных параметров взрывной отбойки горной массы. Киев: Знание, 1979.
11. Михалюк А. В., Мухин Е. А. Изменение акустических свойств пород под влиянием дилатансии при допредельном динамическом нагружении // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1995. № 2. С. 23.

*Поступила в редакцию 6/V 1997 г.*

---