Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVII, вып. 1, 1975 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ КАМУФЛЕТНЫХ ВЗРЫВОВ

Канд. техн. наук *Г. Г. Юревич*
(Ленинградский горный ин-т)

В последние годы горной наукой большое внимание уделяется проблеме использования энергии взрыва мощных зарядов. Разрушение больших объемов руды, проведение открытых горных выработок, строительство подземных нефте- и газохранилищ, добыча руд металлов и солей подземным выщелачиванием, создание подземных тепловых котлов — вот далеко не полный перечень возможного применения подземных ядерных взрывов в мирных целях.

Решение той или иной задачи, связанной с механическим действием взрыва, обычно предполагает прогнозирование размеров зон его разрушительного воздействия на горные породы: зоны сжатия (полости взрыва), дробления (раздавливания), трещинообразования (радиальных трещин), микротрещин, упругих колебаний. Размеры указанных зон в общем случае зависят от ряда факторов и в первую очередь от физико-механических свойств среды (горной породы), веса заряда (для ядерных взрывов — его тротилового эквивалента), глубины заложения заряда. Последний фактор изучен недостаточно, вместе с тем при использовании мощных подземных взрывов в ряде случаев (например, при создании циркуляционных систем извлечения тепла Земли) предполагается проведение взрывов на глубинах 3—5 *км* и более.

Для количественной оценки размеров зон действия камуфлетного взрыва в Проблемной лаборатории горной теплофизики ЛГИ предложен графо-аналитический метод [6], основанный на анализе и обобщении результатов подземных ядерных взрывов, проведенных в СССР и США [1, 3, 4, 5]. Предполагалось, что радиусы полости взрыва $R_п$ зон дробления $R_{др}$ и трещинообразования $R_{тр}$ зависят от системы определяющих параметров, включающей: W — тротиловый эквивалент взрыва, R_0 — радиус заряда, H — глубину его заложения, $\rho_п$ — среднюю плотность покрывающих горных пород, A — модуль ударного сжатия, $\sigma_{сж}$ — предел прочности при сжатии, $\sigma_р$ — предел прочности при растяжении, C — скорость распространения волны.

В пределах рассматриваемых зон действия взрыва происходят сложные процессы, связанные с распространением ударных волн, температурными явлениями, разрушением горных пород. Скорость распространения напряжений изменяется от максимального значения на перемещающейся границе зарядной камеры до скорости продольной волны $C_р$. Прочностные характеристики также являются переменными,

зависящими от величины напряжений и формы напряженно-деформированного состояния, меняющегося от гидростатического сжатия вблизи зарядной камеры до состояния, характеризующегося сжатием в радиальном направлении и растяжением в тангенциальном. При этом соотношение минимальных и максимальных напряжений в волне меняется с расстоянием от центра взрыва как по величине, так и по знаку. Величина модуля ударного сжатия A в общем случае также является переменной, зависящей от энтропии.

В качестве более или менее постоянных и достаточно представительных физико-механических характеристик, отражающих способность той или иной горной породы оказывать сопротивление всестороннему деформированию в зоне полости взрыва, разрушению сжатием в зоне дробления и растяжением в зоне радиальных трещин, принимаются: модуль ударного сжатия A, являющийся коэффициентом пропорциональности между всесторонним давлением в ударной волне и изменением объема горной породы [2], пределы прочности пород при одноосном сжатии $\sigma_{сж}^{дин}$ и растяжении $\sigma_{р}^{дин}$ с учетом динамического действия нагрузки и скорость распространения продольной волны $C_р$.

Таким образом, при рассмотрении процесса образования полости взрыва система определяющих параметров включает величины $R_п$, R_0, W, H, $\rho_п$, $C_р$, A, при рассмотрении зоны дробления — $R_{др}$, R_0, W, H, $\rho_п$, $C_р$, $\sigma_{сж}^{дин}$ и при рассмотрении зоны трещинообразования — $R_{тр}$, R_0, W, H, $\rho_п$, $C_р$, $\sigma_{р}^{дин}$.

В качестве искомых функций принимаются безразмерные симплексы:

$$\text{для полости взрыва } \overline{R}_п = \frac{R_п}{R_0}; \tag{1}$$

$$\text{для зоны дробления } \overline{R}_{др} = \frac{R_{др}}{R_0}; \tag{1'}$$

$$\text{для зоны трещинообразования } \overline{R}_{тр} = \frac{R_{тр}}{R_0}, \tag{1''}$$

а в качестве аргументов — безразмерные комплексы, построенные с использованием формального аппарата теории размерностей [6]:

$$\text{для полости взрыва } \chi_п = \frac{C_р (\rho_п H)^{1/2}}{(A W)^{1/4}}; \tag{2}$$

$$\text{для зоны дробления } \chi_{др} = \frac{C_р (\rho_п H)^{1/2}}{(\sigma_{сж}^{дин} W)^{1/4}}; \tag{2'}$$

$$\text{для зоны трещинообразования } \chi_{тр} = \frac{C_р (\rho_п H)^{1/2}}{(\sigma_{р}^{дин} W)^{1/4}}. \tag{2''}$$

Обработка экспериментальных данных по 22 подземным ядерным взрывам, сведения о которых приведены в табл. 1, показала [6], что, несмотря на значительные различия физико-механических свойств горных пород (от аллювия и туфов до гранита и диабаза), тротилового эквивалента взрывов (от 0,47 до 122 *кт*) и глубин заложения зарядов (от 48 до 2566 *м*), могут быть получены искомые обобщенные зависимости в виде непрерывных функций координат ($R_п$, $\chi_п$), ($R_{др}$, $\chi_{др}$) и ($R_{тр}$, $\chi_{тр}$).

Таблица 1

Радиусы зон механического действия подземных ядерных взрывов

Взрыв		Горные породы	Тротиловый эквивалент взрыва, W, *кт*	Глубина заложения заряда, H, *м*	Измеренный радиус зоны разрушения, *м*		
Номер	Название				$R_п$	$R_{др}$	$R_{тр}$
1	Райнир	Туф	1,8	274,0	19,8	40,0	86,0
2	Логан	»	5,4	283,5	28,0	—	—
3	Бланка	»	22,0	301,1	44,2	—	—
4	Энтлер	»	2,7	402,0	19,8	—	—
5	Плэтт	»	2,0	191,4	21,6	—	—
6	Мэд	Аллювий	0,47	181,1	11,3	—	—
7	Стилуотер	»	2,8	181,1	24,7	—	—
8	Бразос	»	8,3	256,3	27,7	—	—
9	Циммарон	Туф—аллювий	12,0	304,8	32,6	—	—
10	Хусик	»	3,4	187,1	25,9	—	—
11	Хардхэт	Гранит	5,0	286,2	19,2	—	90,0
12	Шоул	»	13,4	367,4	25,6	—	133,0
13	Хэндкар	Доломит	12,0	402,3	21,3	—	—
14	Гном	Каменная соль	3,4	360,9	18,7	22,0	65,0
15	Сэлмон	»	5,3	827,8	16,7	24,0	80,0
16	СССР-I	»	1,1	176,0	14,0	20,5	—
17	СССР-II	»	25,0	600,0	32,3	—	—
18	СССР-III	»	30,0	2440,0	25,6	35,0	125,0
19	Гэсбагги	Песчаник	26,0	1292,0	24,0	—	136,0
20	СССР-1003	Алевролит	1,1	48,0	15,0	25,0	60,0
21	СССР-1004	Сланцы	122,0	200,0	62,0	120,0	285,0
22	Рулисон	Песчаник	40,0	2566,0	21,9	—	—

Специально проведенные опыты на блоках-моделях из диабаза, мрамора, каменной соли и угля позволили дополнить и конкретизировать полученные результаты *. Исследования выполнялись на специально сконструированной экспериментальной установке с камерой, позволявшей проводить эксперимент на блоках-моделях в форме куба со стороной до 350 *мм* при всестороннем давлении до 600 *кгс/см²*. Электроввод особой конструкции позволил ввести в камеру взрывную магистраль для инициирования прессованных сферических зарядов ТЭНа весом 0,1—3 *г* в зависимости от размеров блока-модели и приложенного внешнего давления. Всего в экспериментальной установке было проведено около 100 взрывов в блоках-моделях.

Существенной частью исследований являлось доказательство возможности сопоставления результатов разрушительного действия подземных ядерных взрывов в натурных условиях и модельных экспериментов на блоках с имитацией глубины путем приложения всестороннего внешнего давления. С этой целью предложена система безразмерных координат, построенная, например, для радиусов зоны трещинообразования, исходя из следующих определяющих параметров: $\rho_п H$, $C_р$, $\sigma_р^{дин}$, $W/R_{тр}^3$.

Если в качестве основных единиц измерения выбрать единицы силы F, длины L и времени T, то размерности выбранных параметров могут быть записаны в виде:

$$[\rho_п H] = FL^{-3}T^2;$$

$$[C_р] = LT^{-1};$$

$$[\sigma_р^{дин}] = FL^{-2};$$

$$[W/R_{тр}^3] = FL^{-3}.$$

* Работа выполнена совместно с В. Д. Трофимовым.

При этом теорией размерностей гарантируется получение требуемого одного безразмерного комплекса.

Матрица размерностей в этом случае будет иметь вид:

Основные единицы	$\rho_п H$	$C_р$	$\sigma_р$	$W/R^3_{тр}$
F	1	0	1	1
L	−3	1	−2	−3
T	2	−1	0	0

Составим однородные линейные алгебраические уравнения с коэффициентами, равными элементам строк матрицы:

$$\left.\begin{aligned} k_1 + k_3 + k_4 &= 0; \\ -3k_1 + k_2 - 2k_3 - 3k_4 &= 0; \\ 2k_1 - k_2 &= 0. \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Решение системы уравнения (3) позволяет получить искомый безразмерный комплекс

$$П_{тр} = \frac{C_р (\rho_п H)^{1/2}}{\sigma_р^{дин}} \cdot \left(\frac{W}{R^3_{тр}}\right)^{1/2}. \qquad (4)$$

Данные опытов на моделях сопоставлены с девятью результатами подземных ядерных взрывов, после проведения которых были оценены величины радиусов зоны трещинообразования (рис. 1). На графике в соответствии с табл. 1 цифрами обозначены результаты подземных ядерных взрывов, остальные точки относятся к опытам на моделях.

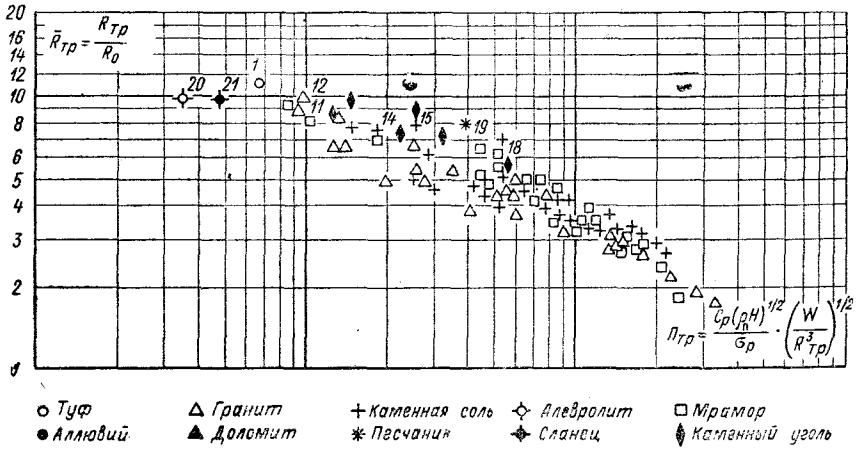

Рис. 1. Зависимость радиуса зоны трещинообразования $\bar{R}_{тр}$ от безразмерного комплекса $П_{тр}$ по данным подземных ядерных взрывов и опытов на моделях

Из графика видно, что, несмотря на значительные различия физико-механических свойств горных пород, глубины H, а главное — масштабов взрывов, экспериментальные точки показывают единую зависимость относительного радиуса зоны трещинообразования от указанных величин. Кроме того, видно, что доля тротилового эквивалента взрыва, приходящаяся на единицу объема зоны трещинообразования у натурных и модельных взрывов сопоставима, что свидетельствует, в частности, о выполнении в рассматриваемых условиях геометрического закона подобия.

Последнее оказывается чрезвычайно важным, так как безразмерные комплексы (2), (2′) и (2″) из-за различия на несколько порядков величин W в натуре и модели зависят от масштаба W. Из геометрического закона подобия при взрыве следует зависимость между масштабами тротилового эквивалента и линейным

$$\alpha_W = \alpha_R^3. \tag{5}$$

Линейный масштаб моделирования может быть получен из соотношений между радиусами зарядов натуры и модели. Для применявшихся в натуре и моделях зарядов $\alpha_R = 10^3$, т. е. масштаб тротилового эквивалента для моделей $\alpha_W = 10^9$.

Зависимости $\overline{R}_п = f(\chi_п)$, $\overline{R}_{др} = \varphi(\chi_{др})$ и $\overline{R}_{тр} = \psi(\chi_{тр})$, построенные по данным натурных подземных ядерных взрывов и опытов на моделях с введением масштаба тротилового эквивалента (рис. 2), позволяют

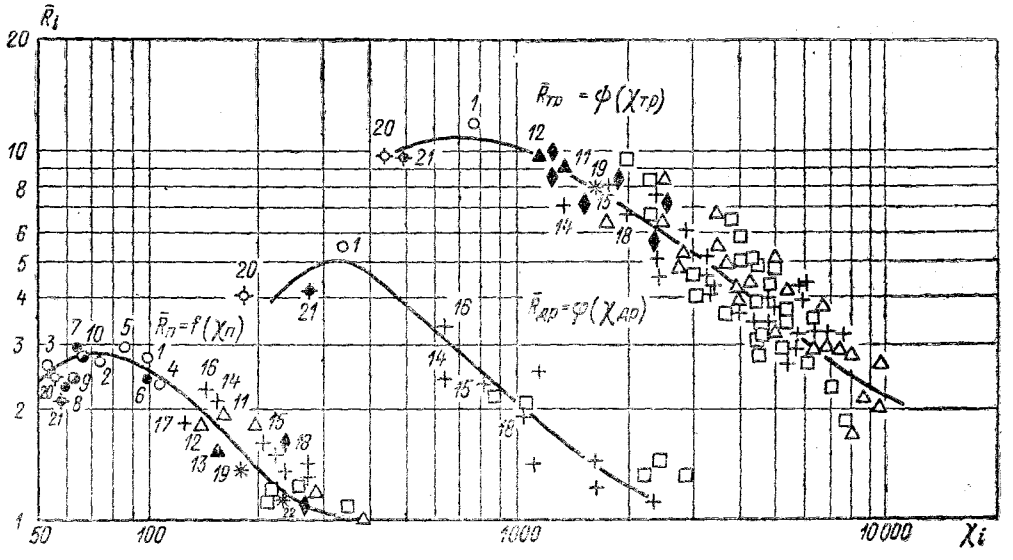

Рис. 2. Зависимость радиусов полости $\overline{R}_п$, зон дробления $\overline{R}_{др}$ и трещинообразования $\overline{R}_{тр}$ от безразмерных комплексов $\chi_п$, $\chi_{др}$ и $\chi_{тр}$ по данным опытов на моделях и подземных ядерных взрывов

для различных условий проведения взрыва (физико-механические свойства горных пород, глубина, тротиловый эквивалент) прогнозировать размеры зон его разрушительного действия: полости, радиусов зон дробления и трещинообразования. Здесь также экспериментальные точки, обозначенные цифрами, соответствуют подземным ядерным взрывам (табл. 1), остальные точки относятся к опытам на моделях.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при фиксированных значениях величин, характеризующих физико-механические свойства горных пород, относительные размеры зон действия взрыва значительно снижаются при увеличении глубины, что может быть компенсировано лишь увеличением мощности взрыва. С другой стороны, при уменьшении глубины относительные размеры зон увеличиваются, однако кривые имеют максимум, левее которого начинается их снижение. Этот эффект связан с тем, что при достижении некоторых критических значений $H_{кр}$ или $W_{кр}$ взрыв происходит уже не в режиме камуфлета, а с разрушением пород у свободной поверхности вплоть до образования воронки выброса. Так, точки, соответствующие взрывам

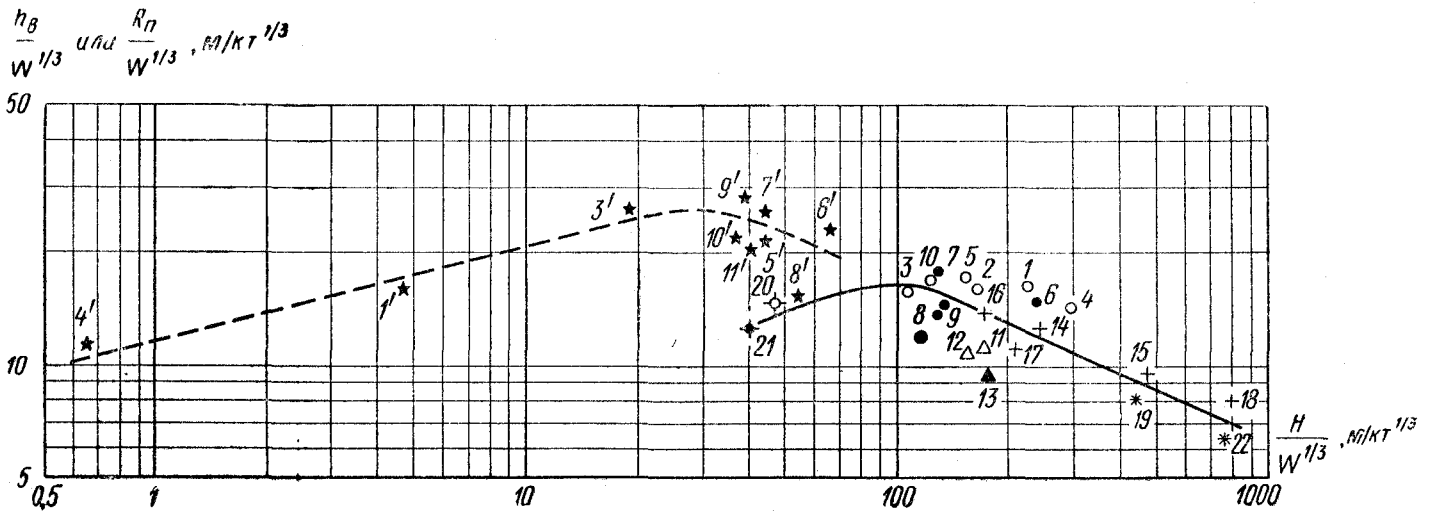

Рис. 3. Зависимость приведенных радиуса полости взрыва $R_п/W^{1/3}$ и глубины воронки выброса $h_в/W^{1/3}$ от приведенной глубины заложения заряда $H/W^{1/3}$ по результатам ядерных взрывов

(Обозначения типов пород те же, что и на рис. 1)

№ 20 и 21, вызвавшим образование воронки выброса, располагаются именно на спадающих ветвях кривых левее их максимума.

В этой связи интересно сопоставить результаты камуфлетных ядерных взрывов и ядерных взрывов на выброс (с образованием воронки), сведения о которых приведены в табл. 2 [7]. С точки зрения прогнозирования действия ядерных взрывов важно сопоставление изменения приведенного радиуса полости $R_п/W^{1/3}$ камуфлетных взрывов (сплошная кривая) и приведенной глубины видимой воронки выброса

Таблица 2

Глубина видимых воронок для ядерных взрывов на выброс

Взрыв		Тротиловый эквивалент взрыва, W, *кт*	Глубина заложения заряда, H, *м*	Глубина видимой воронки, $h_в$, *м*	$H/W^{1/3}$, *м/кт*$^{1/3}$	$h_в/W^{1/3}$, *м/кт*$^{1/3}$
Номер	Название					
1′	Джангл «Ю»	1,2	5,2	16,2	4,9	15,3
2′	Джангл «С»	1,2	—1,07 *	6,4	—1,0	6,0
3′	Типот-Исс	1,2	20,4	27,4	19,2	25,9
4′	Джонни бой	0,5	0,53	9,1	0,67	11,5
5′	Седан	100,0	194,0	97,5	41,9	21,0
6′	Нептун	0,1	30,2	10,7	65,7	23,3
7′	Дэнни бой	0,42	33,5	18,9	44,6	25,2
8′	Паланкин	4,0	85,0	24,0	53,2	15,2
9′	Кабриолет	2,5	52,0	37,8	39,7	27,8
10′	Шуигер	—	—	—	36,9	21,8
11′	Багги	—	—	—	41,0	21,0

$h_в/W^{1/3}$ (пунктирная кривая) в зависимости от приведенной глубины заложения заряда $H/W^{1/3}$ (рис. 3). При этом цифры у экспериментальных точек соответствуют номерам табл. 1 (для сплошной кривой) и табл. 2 (для пунктирной кривой). Из сопоставления видно, что при уменьшении приведенной глубины от 1000 до 100 *м/кт*$^{1/3}$ имеет место камуфлетный взрыв. При дальнейшем уменьшении глубины взрыв приводит к образованию как полости, так и воронки выброса, достигающей своей максимальной глубины при величине $H/W^{1/3}$, равной примерно 30 *м/кт*$^{1/3}$. При дальнейшем уменьшении глубины заложения заряда происходит снижение приведенной глубины воронки до величины, являющейся результатом взрыва заряда на поверхности.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования на моделях и анализ результатов натурных ядерных взрывов позволили получить весьма простые зависимости для прогнозирования характера взрыва (камуфлетный или с образованием воронки выброса), приближенной оценки размеров зон его разрушительного действия $R_п$, $R_{др}$, $R_{тр}$ и $h_э$ в различных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атомные взрывы в мирных целях. Атомиздат, 1970.
2. Баум Ф. А., Бержец М. А. Определение начальных параметров ударных волн. В сб. «Взрывное дело», вып. 49/6, Госгортехиздат, 1962.
3. Нифонтов Б. И. Подземные ядерные взрывы. Атомиздат, 1965.
4. Подземные ядерные взрывы. ИЛ, 1962.
5. Применение подземных ядерных взрывов в нефтяной и газовой промышленности. Изд. ВНИИОЭНГ, 1968.
6. Трофимов В. Д., Юревич Г. Г. Оценка размеров зон разрушительного действия камуфлетного взрыва. В сб. «Новые исследования в горном деле», вып. 5. Изд. ЛГИ, 1972.
7. Saxe H. C., Del Manzo D. D. Simp. on Engineering with Nuclear Explosives, Las Vegas, Nevada, 1970.

* Заряд взорван над поверхностью Земли.