

**ИССЛЕДОВАНИЕ
БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ВЗРЫВА
С ПОМОЩЬЮ МАНГАНИНОВЫХ ДАТЧИКОВ**

А. Н. Ханукаев, В. А. Вирченко, А. П. Егоров,
С. В. Красавин, С. В. Цирель

(Ленинград)

Распространение ударных волн в горных породах, особенно на расстояниях до 2—3 радиусов заряда, исследовано недостаточно [1—3]. В настоящей работе этот процесс изучается при помощи манганиновых датчиков давления [4, 5]. Для моделирования выбран мрамор, свойства которого хорошо изучены.

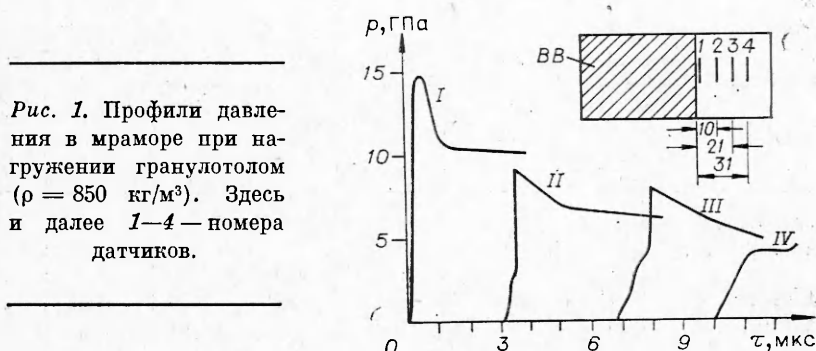
Из мрамора плотностью $\rho = 2670 \text{ кг/м}^3$ вырезаны и отшлифованы пластинки толщиной 5, 10, 15 и 20 мм. Между пластинками помещали манганиновые датчики. Размеры чувствительного элемента датчика составляли $5 \times 5 \text{ мм}$ с начальным сопротивлением $R_0 = 2,3 \div 2,6 \text{ Ом}$. Собранный из пластин модель нагружали плоской ударной волной, вызванной взрывом промышленного ВВ (гранулолола, смеси АС + ДТ, грамомита 79/21, ГЛТ-20) и эмульсией жидкого горючего в растворе аммиачной селитры. Диаметр заряда 60, высота 60—181 мм. В каждом опыте давление измеряли в 3—4 точках, при этом один из датчиков устанавливали на контакте заряд—порода. Параллельно с измерением давления определяли скорость детонации ВВ и скорость распространения фронта ударной волны в породе.

На рис. 1 представлены экспериментальные кривые $p(\tau)$, полученные в фиксированных точках мраморного блока при нагружении его взрывом заряда гранулолола. Линии I—III имеют форму ударной волны с упругим предвестником. На расстоянии 31 мм (линия IV) показаны только упругий предвестник и начало пластического течения; дальнейшая запись датчика некорректна из-за влияния тензоэффекта. Для вычисления параметров $u(\tau)$, $v(\tau)$, $E(\tau)$ по данным, аналогичным рис. 1, использован метод анализа, предложенный в [6]. Метод позволяет по 3—4 профилям давления или массовой скорости в различных лагранжевых позициях вычислить остальные параметры (рис. 2).

В работе [6] зависимость давления (или скорость смещения) от лагранжевой координаты h аппроксимировалась с помощью многочлена второй степени. Однако, как показали проведенные расчеты, для описания затухающих волн подходит экспоненциальная функция вида

$$S = a \exp(bh).$$

При обработке профилей $p(\tau)$ учитывали, что постоянство фазовых скоростей соблюдается только для начального участка волны (3—5 мкс) в



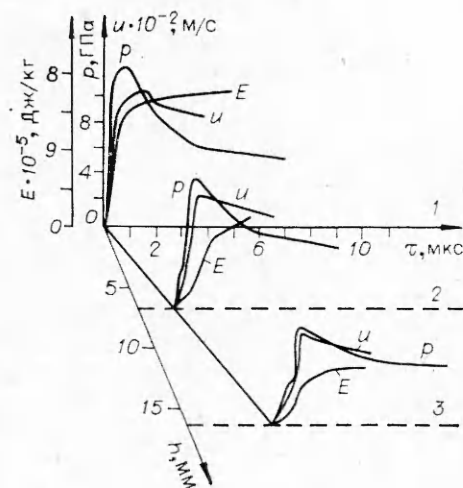


Рис. 2. Профили характеристик волны сжатия для ГЛТ-20 ($\rho = 1550 \text{ кг/м}^3$).

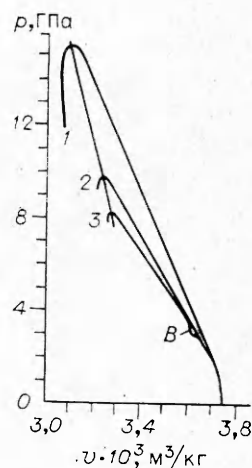


Рис. 3. Диаграммы ударного нагружения мрамора гранулолитом.

каждой лагранжевой точке, поэтому рассчитывали значения скоростей смещений и другие характеристики только для головной части ударной волны.

Рассматривая экспериментальные профили $p(\tau)$ и рассчитанные по ним профили $u(\tau)$ и $E(\tau)$, можно выделить ряд характерных особенностей поведения ударной волны. Волна с начальной амплитудой 5—14 ГПа в мраморе быстро затухает (в 2 раза при прохождении расстояния 20—30 мм). На расстояниях до 5—7 мм от контакта заряд — порода волна имеет ярко выраженный крутой фронт (поверхность разрыва), а дальше приобретает сложную двухфронтальную структуру (см. рис. 1,2). Характерно резкое снижение массовой скорости второй волны с расстоянием и размывание во времени участка нарастания давления до максимума, начиная с расстояния 30 мм (см. рис. 1,2). В то же время амплитуда и скорость распространения первой волны остаются практически постоянными: $N = 5 \pm 0,1 \text{ км/с}$, $p = 3,2 \pm 0,2 \text{ ГПа}$.

На рис. 3 приведены графики нагружения и разгрузки породы в координатах давление — удельный объем при взрыве гранулолита. Пиковые значения давления соединены кривой, являющейся ударной адиабатой мрамора. Кривые погружения и разгрузки нелинейны для различных расстояний и не совпадают друг с другом, практически полное совпадение имеет место лишь для первой волны (до участка B).

ВВ	h , мм	p_{max} , ГПа	N , км/с	u_{max} , км/с	ρ	P , МДж/м ²	$E \cdot 10^2$, кДж/кг
Гранулолит ($D = 4,5 \text{ км/с}$, $p_d = 4,8 \text{ ГПа}$)	0	14,9	5,1	1,0	1,38	30,7	9,53
	10	9,17	5,0	0,69	1,24	13,9	4,37
	21	8,1	4,8	0,61	1,12	7,65	1,64
ГЛТ-20 ($D = 4,8 \text{ км/с}$, $p_d = 4,7 \text{ ГПа}$)	0	12,5	5,1	1,07	1,37	27,8	5,62
	7	9,89	4,9	0,87	1,31	17,2	5,03
	16,5	7,33	4,7	0,72	1,25	9,5	3,06
Эмульсия жидкого горючего в растворе АС	0	5,46	4,8	0,7	1,36	8,45	3,96
	5,5	4,45	4,7	0,56	1,26	4,45	2,36
	11	—	4,7	—	1,14	2,2	0,9

Полученные результаты показывают, что модель упругопластической среды может быть применена к плотным горным породам при их нагружении ВВ. Следуя этой модели, первую волну можно рассматривать как упругий предвестник, распространяющийся с $N = 4,9 \div 5,1$ км/с. За упругим предвестником следует пластическая волна, амплитуда которой с расстоянием резко затухает. На характер распространения волны в природе оказывают влияние также вязкие силы, что проявляется в размывании фронта второй волны и в несовпадении на первых базах максимумов массовой скорости и давления во времени (см. рис. 2). Последние особенности согласуются с некоторыми положениями модели вязкопластической среды [7].

Результаты экспериментального определения параметров ударных волн в мраморе, генерируемых взрывом различных ВВ, приведены в таблице (расчетные параметры относятся к 3 мкс от момента прихода волны). Здесь D — скорость детонации; p_d — детонационное давление; h — расстояние от контакта ВВ — порода; p_{max} — давление в мраморе; N — скорость фронта ударной волны; u_{max} — массовая скорость; ρ — сжимаемость; P — энергия, прошедшая через единицу сечения породы; E — энергия единицы массы породы.

Из таблицы следует, что наибольшее давление в ближней зоне наблюдается у гранулотола, что обусловлено давлением во фронте детонационной волны. Указанному ВВ соответствует наибольшая ударная сжимаемость, следовательно — наибольшие потери энергии в ближней зоне взрыва. Полученные результаты указывают на целесообразность использования для отбойки горных пород ВВ с более низкими детонационными параметрами (P , D) при близких теплотах взрыва, так как в этом случае диссипативные потери энергии в ближней зоне взрыва будут наименьшими. Такими свойствами обладают водонаполненные составы типа ГЛВВВ (например, ГЛТ-20) [3]. ВВ с низкими детонационными параметрами (типа приведенной в таблице эмульсии) будут полезны для отбойки пород средней крепости и мягких, где вязкостные свойства будут проявляться сильнее и соответственно увеличатся диссипативные потери на нагрев породы.

Таким образом, экспериментально установлено, что при нагружении ударными волнами с амплитудой 5—14 ГПа поведение мрамора в общем подчиняется модели упругопластической среды. Полученные результаты показали перспективность использования манганиновых датчиков давления, внедренных в породу на различных расстояниях от заряда, для изучения поведения горных пород в ближней зоне взрыва.

Поступила в редакцию 29/IV 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Ханукаев. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. М.: Недра, 1974.
2. М. А. Кук. Наука о промышленных взрывчатых веществах. М.: Недра, 1980.
3. А. И. Ханукаев. Состояние и перспективы применения водонаполненных взрывчатых веществ, изготавливаемых на местах потребления. М., 1930.
4. И. Чэн, А. Эрикссон и др. Приборы для научных исследований, 1980, 51, 1.
5. K. Burrows, D. Chilvres, R. Gyton a. o. VI-th Symp. (Intern.) on Detonation. California, 1976.
6. M. Cowperthwaite. R. Williams. J. Appl. Phys., 1971, 42, 6.
7. Г. М. Ляхов. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974.