

## ЛИТЕРАТУРА

1. G. Brauer. Z. anorg. Allg. Chem., 1941, 248, 1.
2. H. Schäfer, R. Gruehn und F. Schulte. Angew. Chem., 1966, 78, 28.
3. Г. А. Ададуров, О. Н. Бреусов и др. ФГВ, 1966, 2, 4, 130.
4. Г. А. Ададуров, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1967, 3, 2, 281.
5. J. F. Heyda. Symp. High. Dyn. press., Paris, sept. 1967.
6. R. G. McQueen and S. P. Marsh. J. Appl. Phys., 1960, 31, 7, 1253.
7. Л. М. Ковба, В. К. Трунов, З. Я. Польщикова. Изв. АН СССР, Неорганические материалы, 1967, 3, 403.
8. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников, Н. И. Бражник. ЖТЭФ, 1958, 34, 4, 886.
9. В. С. Трофимов, Г. А. Ададуров и др. ФГВ, 1968, 4, 2, 244.

УДК 532.593

### ПАРАМЕТРЫ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВЕ СФЕРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В ПОРИСТОМ NaCl

*Б. Д. Христофоров*

(Москва)

Большинство горных пород в естественном состоянии являются пористыми телами из-за наличия внутренних пустот и трещин. Физико-механические свойства пористого вещества существенно отличаются от свойств сплошного. Наличие пор приводит к заметному изменению упругих и прочностных характеристик твердого тела и влияет на его поведение при динамическом и статическом нагружении и разгрузке. Поэтому можно ожидать, что в ближней зоне взрыва, где происходит пластическое течение и разрушение вещества, даже небольшая пористость может существенно влиять на параметры, характеризующие действия взрыва в среде. Однако в настоящее время опубликовано сравнительно мало результатов экспериментальных исследований о параметрах волн в различных средах в ближней зоне, где происходит дробление вещества. В то же время эти данные необходимы для определения характера разрушения и потому, что состояние среды в ближней зоне определяет параметры эффективного упругого источника, характеризующего действие взрыва на больших расстояниях [1].

В связи с этим были проведены лабораторные опыты по определению параметров ударных волн в твердом теле при различных значениях его пористости в диапазоне  $1 \lesssim \bar{R} \lesssim 9$ , где  $\bar{R} = R/R_0$  — отношение расстояния  $R$  от точки измерения до заряда к его радиусу  $R_0$ .

В качестве материала, моделирующего свойства естественной горной породы, использовался порошок NaCl с размером зерен около 0,3 мм, спрессованный до плотностей  $\rho_{00} = 2,12, 1,87$  и  $1,72$  г/см<sup>3</sup>, при плотности монокристалла  $\rho_0 = 2,16$  г/см<sup>3</sup>. Пористость спрессованных образцов, определяемая соотношением  $\eta = 1 - \rho_{00}/\rho_0$  соответственно составляла 2; 13,5 и 20%. В опытах использовались цилиндрические образцы из соли диаметром 100 и 84 мм. В таблице приведены значения упругих характеристик образцов NaCl различной плотности, определенных по результатам ультразвуковых измерений продольной  $c_1$  и поперечной  $c_2$  скоростей звука. Погрешность этих измерений составляла +3%. Там же приведены значения прочности  $\sigma_*$  при осевом сжатии образцов диа-

$\eta$ , %	$\rho_{00}$ , г/см <sup>3</sup>	$c_1$ , км/сек	$c_2$ , км/сек	$c_3$ , км/сек	$v$	$E$ , кбар	$K$ , кбар	$G$ , кбар	$\sigma_*$ , кбар
20	1,72	3,04	1,73	2,26	0,23	137	86	55	0,21
13,5	1,87	3,56	2,08	2,65	0,24	200	130	81	0,37
2	2,12	4,42	2,55	3,29	0,25	345	230	138	0,89

метром 10, 20 и 40 мм и высотой, равной диаметру. Контрольные измерения  $\sigma_*$  при высоте образцов, равной двум диаметрам, введение смазки на торцах образцов, изменение размеров зерен до 0,1 мм не привели к заметному изменению прочности.

Поскольку NaCl имеет изотропную кристаллическую решетку, можно ожидать, что в прессованных образцах не будет существенной анизотропии в значениях упругих и прочностных характеристик. В рассматриваемом диапазоне давлений в NaCl не обнаружены полиморфные превращения. Поэтому можно надеяться, что основные особенности его поведения при взрывном нагружении будут характерны для пористых горных пород с подобными механическими свойствами.

Взрывы производились сферическими литыми зарядами из ТГ 50×50 весом 23 и 84 г и спрессованными до плотности 1,4 г/см<sup>3</sup> зарядами из тэна весом 0,16, 0,8 и 2,5 г. Параметры детонации этих типов зарядов близки. Иницирование осуществлялось в центре зарядов. Заряды максимального веса применялись для получения надежных измерений в диапазоне  $1 \lesssim \bar{R} \lesssim 2$ . При проведении опытов заряды устанавливались в центре образцов.

Измерение параметров ударной волны проводилось электромагнитным методом, предложенным акад. Е. К. Завойским. Для электромагнитных измерений был разработан малогабаритный электромагнит постоянного тока весом 100 кг с напряженностью магнитного поля около 400 э в зазоре между полюсными наконечниками размером 200×200×200 мм. Магнитное поле вблизи центра зазора постоянно с точностью до 1% в области с линейным размером около 50 мм. Электромагнит позволяет проводить взрывы зарядов весом около 0,5 кг без остаточных деформаций магнитопровода.

Датчики из медной проволоки толщиной 0,06 мм устанавливались на границе с зарядом и на различных расстояниях до него в диапазоне до 45 мм по дуге окружности, описанной вокруг заряда, а выводы датчика выводились по радиусам, исходящим из центра заряда. Регистрация сигналов от датчика проводилась в каждом опыте на двух осциллографах ОК-17 и одном ОК-33. Точность отдельного измерения массовой скорости составляла  $\pm 8\%$ . Для снижения погрешности опыты повторялись.

Характер изменения формы профиля ударной волны при ее распространении по образцу показан на рис. 1. На оси абсцисс отложено время, отсчитанное с момента вхождения волны в образец и отнесенное к радиусу заряда. При значениях максимальной массовой скорости  $v \geq 850$  м/сек ( $\bar{R} \lesssim 1,5$ ) фронт волны ударный. В диапазоне  $v \lesssim 850$  м/сек перед ударной волной возникает предвестник с размытым фронтом, скорость распространения вступления которого около 3,5 км/сек соответствует измеренной скорости продольных звуковых волн. Это позволяет считать предвестник упругой волной.

В диапазоне  $220 \lesssim v \lesssim 850$  м/сек за предвестником следует пластическая волна с ударным фронтом. При  $v \lesssim 220$  м/сек ( $\bar{R} \geq 2,3$ ) фронт

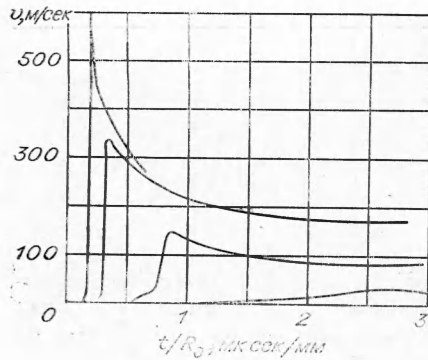


Рис. 1. Профили массовых скоростей в ударных волнах при взрыве в NaCl с  $\rho_{00}=1,87 \text{ г/см}^3$ .

этой волны размывается тем сильнее, чем меньше ее интенсивность и больше путь, пройденный по веществу. Упругая волна плавно сопряжена с пластической и их трудно разграничить. Оценки показывают, что в этой области плотность вещества на максимуме волны меньше плотности кристалла, поэтому при нарастании давления до максимума полного схлопывания пор не происходит. Такие же особенности профиля волны сжатия отмечены в образцах NaCl с плотностью 2, 12 и  $1,72 \text{ г/см}^3$ . Скорость вступления упругой волны в них составляет соответственно 4,4 и  $3,05 \text{ км/сек}$ , а размывание ударного фронта возникает при  $v \lesssim 180$  и  $280 \text{ м/сек}$ .

На рис. 2 даны зависимости приведенных времени нарастания  $\bar{\tau}_n = \tau_n / R_0$  и положительной фазы волны  $\bar{\tau}_+ = \tau_+ / R_0$  от расстояния при взрыве в образцах NaCl различной плотности. При  $\bar{R} \geq 2$   $\bar{\tau}_n$  резко увеличивается. Этот процесс происходит тем быстрее, чем меньше плотность вещества, главным образом в области давлений, где интенсивность волны недостаточна для схлопывания пор и фронт размывается. Если  $\bar{R} \geq 6$ ,  $\bar{\tau}_n$  слабо возрастает с расстоянием. Увеличение времени нарастания прекращается раньше в образцах максимальной плотности, что связано с их большей прочностью и в связи с этим с меньшими размерами зоны пластических деформаций. В диапазоне  $\bar{R} > 5$  времена положительной фазы остаются постоянными. При  $\bar{R} \lesssim 2,5$  данных о времени положительной фазы не было получено из-за преждевременного обрыва датчиков. С увеличением пористости образцов от 2 до 20%  $\bar{\tau}_n$  и  $\bar{\tau}_+$  возрастают примерно в 4 и 1,5 раза соответственно.

Зависимости максимальной массовой скорости от расстояния в образцах различной плотности приведены на рис. 3. На расстояниях  $\bar{R} > 2$  при взрыве зарядов, вес которых отличался примерно на 2 порядка, закон геометрического подобия выполняется. При взрыве зарядов весом до 2,5 г в диапазоне  $\bar{R} < 2$  результаты измерения амплитуды волны были ниже, чем при взрыве зарядов большого веса вследствие недостаточного разрешения регистрирующей аппаратуры. Поэтому результаты измерения с зарядами  $t_{\text{зна}}$  при  $\bar{R} < 2$  не приведены. При увеличении пористости вещества

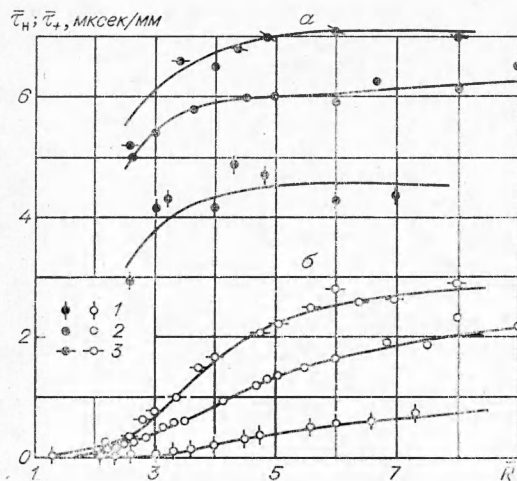


Рис. 2. Зависимости приведенных времени нарастания (а) и времени положительной фазы (б) волны от относительного расстояния до центра взрыва.

1 —  $\rho_{00}=2,12 \text{ г/см}^3$ ; 2 —  $\rho_{00}=1,87 \text{ г/см}^3$ ; 3 —  $\rho_{00}=1,72 \text{ г/см}^3$ .

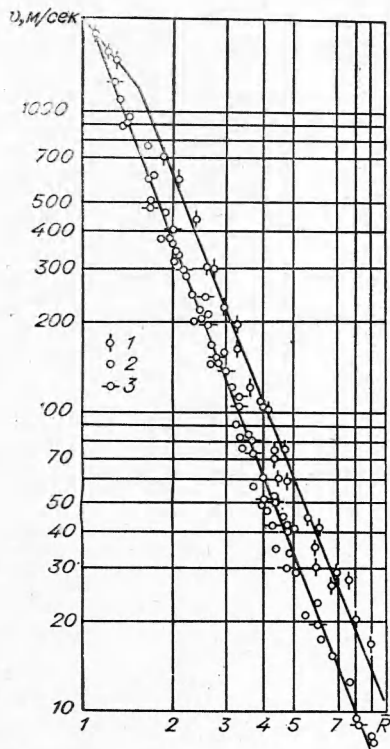


Рис. 3. Зависимость максимальной массовой скорости от относительного расстояния.  
 1 —  $\rho_{00}=2,12 \text{ г/см}^3$ ; 2 —  $\rho_{00}=1,87 \text{ г/см}^3$ ; 3 —  $\rho_{00}=1,72 \text{ г/см}^3$ .

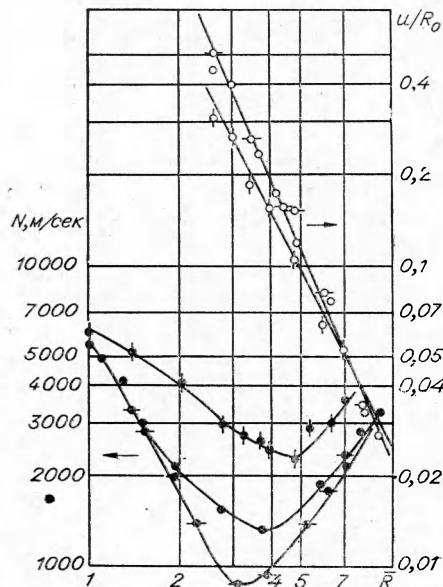


Рис. 4. Зависимость скорости максимума волны  $N$  и относительного смещения  $u/R_0$  от относительного расстояния  $\bar{R}$ . Обозначения см. на рис. 2.

от 2 до 13% максимальная массовая скорость в волне заметно уменьшается. Влияния пористости на амплитуду волны не обнаружено при  $\eta > 13\%$ .

Расхождение  $v(\bar{R})$  зависимостей в образцах с  $\rho_{00}=2,12$  и  $1,87 \text{ г/см}^3$  возрастает с расстоянием. Значения  $v$  в образцах с  $\rho_{00}=2,12 \text{ г/см}^3$  при  $\bar{R}=2$  и  $8$  примерно на 60 и 100% выше, чем при  $\rho_{00}=1,87 \text{ г/см}^3$ . Зависимости  $v(\bar{R})$  для образцов с плотностью 1,87 и  $1,72 \text{ г/см}^3$  с точностью до ошибки измерений совпадают. Результаты измерений можно описать следующими эмпирическими формулами, в которых  $v$  выражено в  $\text{м/сек}$ .

$$\left. \begin{aligned} v &= 2100/\bar{R}^{2,6}; & 1 \lesssim \bar{R} \lesssim 9; & \rho_{00} = 1,87 \text{ и } 1,72 \text{ г/см}^3, \\ v &= 2000/\bar{R}^{1,25}; & 1 \lesssim \bar{R} \lesssim 1,5 & \\ v &= 3500/\bar{R}^{2,5}; & 1,5 \lesssim \bar{R} \lesssim 9 & \end{aligned} \right\} \rho_{00} = 2,12 \text{ г/см}^3.$$

Рассчитанные из задачи о распаде разрыва значения массовой скорости на границе с зарядом согласуются с результатами их измерений.

На рис. 4 приведены экспериментальные данные для скорости распространения  $N$  максимума волны и смещения  $u$  за время положительной фазы, обозначенные темными и светлыми кружками соот-

ветственно, в функции от расстояния в образцах различной плотности. С уменьшением плотности образцов смещения увеличиваются тем сильнее, чем ближе точка измерения к заряду. Результаты измерения  $u$  можно описать следующими эмпирическими формулами:

$$u/R_0 = 2,4/\bar{R}^2; \quad 2,5 \leq \bar{R} \leq 10; \quad \rho_{00} = 2,12;$$

$$u/R_0 = 4,4/\bar{R}^{2,3}; \quad 2,5 \leq \bar{R} \leq 10; \quad \rho_{00} = 1,87 \text{ и } 1,72 \text{ г/см}^3.$$

На расстояниях  $\bar{R} \leq 2,5$  смещения не определены из-за преждевременного обрыва датчиков. Можно ожидать, что в этом диапазоне при приближении к полости смещения будут возрастать медленнее, чем это следует из приведенных формул вследствие уменьшения времени действия волны в этой области. Зависимость  $N(\bar{R})$  имеет минимум в диапазоне  $\bar{R} \approx 3-5$ . Положение минимума смещается в сторону больших расстояний от заряда при увеличении плотности образцов. Дальнейшее увеличение расстояния ведет к возрастанию скорости максимума волны из-за перехода вещества в волне из состояния пластического течения в упругое.

Для определения давления и энергии по результатам измерений массовой скорости необходимо знать зависимость  $N$  от  $v$ . Результаты определения этой зависимости электромагнитным методом приведены на рис. 5, при этом были использованы также данные опытов с плоскими волнами для более точного определения  $N$  в области высоких давлений [2]. В области высоких значений массовых скоростей, где фронт волны ударный, экспериментальные данные описываются линейными  $N(v)$  соотношениями (см. рис. 5, 2), проведенными через значения гидродинамических скоростей звука  $c_3 = \sqrt{K/\rho_{00}}$  при  $v=0$ . Их можно описать следующими формулами:

$$N = 3300 + 1,41 v; \quad \rho_{00} = 2,12 \text{ г/см}^3; \quad v \geq 600 \text{ м/сек};$$

$$N = 2660 + 1,43 v; \quad \rho_{00} = 1,87 \text{ г/см}^3; \quad v \geq 800 \text{ м/сек};$$

$$N = 2240 + 1,41 v; \quad \rho_{00} = 1,72 \text{ г/см}^3; \quad v \geq 1000 \text{ м/сек}.$$

В диапазоне  $N < c_1$ , где распространяется упруго-пластическая волна, с уменьшением максимальной массовой скорости значения скорости  $N$  быстро уменьшаются и лежат значительно ниже прямой 2. При  $v \approx 100 \text{ м/сек}$  кривые  $N(v)$  имеют минимум. В этом диапазоне резко увеличивается время нарастания волны из-за большого различия в  $N$  и  $c_1$ . При дальнейшем уменьшении  $v$  скорость максимума волны возрастает, приближаясь к  $c_1$ , что связано с переходом вещества в упругое состояние. Отмеченный ранее минимум на кривых  $N(\bar{R})$  связан с наличием минимума на кривых  $N(v)$ . Определение нормального напряжения по известным значениям волновой и массовой скоростей можно производить по уравнению сохранения на фронте  $p = \rho_{00} N v$  лишь в случае стационарной волны. В области, где фронт волны размывается и время нарастания резко увеличивается, это условие не выполняется. Поэтому были проведены специальные опыты с плоскими волнами [2], в которых в области, где фронт волны размыт, напряжение определялось с помощью интегрирования уравнений гидродинамики по заданному из эксперимента полю массовых скоростей. Определенные таким образом напряжения, с точностью до экспериментальных ошибок, согласовывались с результатами их определения по формуле  $p = \rho_{00} N v$ , которая в связи с этим использовалась для обработки результатов измерений.

Для оценки энергии  $E$  ударной волны в веществе было использовано выражение для плотности потока энергии через фиксированную поверхность

$$E = 4\pi R^2 \int_0^{\tau_+} \left( \epsilon \rho v + \frac{1}{2} \rho v^3 + p v \right) dt.$$

Предполагалось, что  $\epsilon = \frac{1}{2} v^2$  не только на фронте, но и во всей области течения. Это предположение слабо влияет на результаты, так

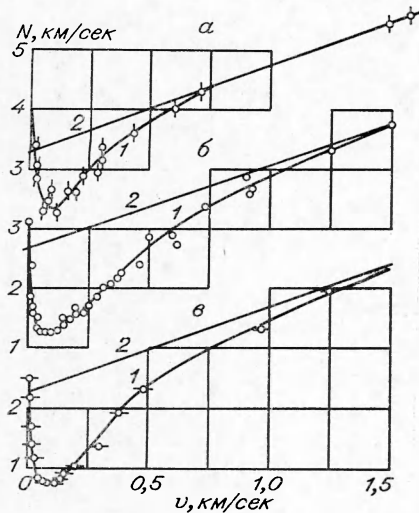


Рис. 5. Зависимость скорости  $N$  распространения максимума волны от максимальной массовой скорости  $v$ . а, б, в —  $\rho_{00} = 2,12; 1,87; 1,72$  г/см<sup>3</sup> соответственно. 1 — экспериментальные зависимости; 2 — линейное  $N(v)$  соотношение. \* — значения гидродинамической скорости  $c_3$ .

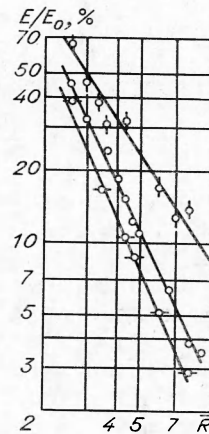


Рис. 6. Зависимость энергии ударной волны от расстояния.

как первые два члена под интегралом много меньше  $p v$ . Кроме того, связь  $p, \rho, v$  во всей области течения бралась такой же, как на фронте. На рис. 6 приведена зависимость  $E/E_0$  (где  $E$  — энергия ВВ) от расстояния. В ближней зоне взрыва, где идет пластическое течение и разрушение вещества, происходит интенсивная диссипация энергии ударной волны, в результате которой у границы зоны дробления  $\bar{R} \approx 10$  в ударной волне остается лишь несколько процентов от энергии взрыва. Таким образом, результаты измерений показывают, что пористость среды существенно влияет на диссипацию энергии в параметры ударной волны в ближней зоне взрыва.

Автор выражает благодарность А. Н. Аверину и А. А. Игнатову, участвовавшим в проведении измерений.

Поступила в редакцию  
17/V 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Родионов, А. П. Сухотин. ФГВ, 1971, 7, 1.
2. И. В. Белинский, Б. Д. Христофоров. ПМТФ, 2, 1970.