

ПОДОБИЕ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОЙ СРЕДЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯЖАНИЯ ВЗРЫВНОГО ИСТОЧНИКА

А. А. Спивак
(Москва)

Варьирование параметров взрывного источника (размер, плотность заряжания и т. п.) приводит к значительному изменению характеристик взрывного воздействия в твердой среде [1]. Разнообразие условий взрывания, как и необходимость применения неэквивалентных зарядов, создает определенные трудности в описании и прогнозировании последствий взрыва.

Одним из распространенных методов, существенно облегчающих классификацию и прогнозирование параметров взрывного воздействия, является постулирование на основе экспериментального материала некоторых эмпирических соотношений, позволяющих с достаточной для практики точностью объединять взрывы различных зарядов в группы на основе принципа подобия по одному из параметров взрывного источника. Так, наиболее употребительный принцип геометрического подобия при взрыве формулируется следующим образом: на одинаковых, приведенных к размеру заряда (одного и того же ВВ), расстояниях параметры взрывного воздействия в данной среде подобны. Иногда этот принцип называют принципом энергетического подобия при взрыве, подразумевая при этом, что для взрывов одного ВВ (при неизменной плотности заряжания) вес заряда q , а следовательно, и энергия взрыва E_0 пропорциональны размеру взрывного источника. В частности, для взрыва сферического заряда $q \sim R_0^3$, где R_0 — радиус заряда. В этом случае проведение взрывов разного масштаба осуществляется с использованием «безразмерной» координаты $r_0 = r/q^{1/3}$, где r — расстояние от места взрыва.

В качестве примера можно привести результаты изучения взрывных волн в мягком грунте [2], а также результаты лабораторного исследования взрыва сферического заряда из тэна в тиосульфате [3], когда экспериментально полученные максимальные массовые скорости v_0 , максимальные перемещения u_0 и временные параметры движения в волне сжатия, определенные при взрыве разных по весу зарядов, в приведенных координатах группируются вокруг единых зависимостей

$$\begin{aligned}v_0 &= 4,5r_0^{-2,1} \text{ м/с, } r_0 < 0,6, \\v_0 &= 5,2r_0^{-1,7} \text{ м/с, } r_0 > 0,6, \\u_0 &= 0,1q^{1/3}r_0^{-1,9} \text{ см/кг}^{1/3} \text{ при всех } r_0.\end{aligned}\tag{1}$$

Изменение основного параметра взрывного источника — плотности заряжания $\rho_1 = q/V_1$, где V_1 — объем зарядной камеры, приводит к нарушению геометрического подобия. Так, в случае взрыва заряда в воздушной полости, расположенной в твердой среде, амплитуда волны сжатия и максимальные перемещения в среде на одинаковых расстояниях r_0 уменьшаются с увеличением относительного размера воздушной полости $\xi = R_1/R_0$ [4], где R_1 — радиус полости. В частности, зависимость $v_0(r_0)$ в диапазоне $1 \leq \xi \leq 2$ (плотность заряжания $1,5 \geq \rho_1 \geq 0,19 \text{ г/см}^3$) представима в виде [4]

$$v_0 = \frac{a}{\xi^{1,8}} r_0^{-k} \text{ м/с,}\tag{2}$$

где $a = 4,5$; $k = 2,1$ при $r_0 < 0,6/\xi$ и $a = 5,2$; $k = 1,7$ при $r_0 > 0,6/\xi$.

Рис. 1. Максимальные массовые скорости (а) и приведенные максимальные перемещения (б) в тиосульфате при взрыве заряда различной плотности ($\xi=1$).
 ρ_1 , г/см³: 1 — 1,5; 2 — 1,0; 3 — 0,5, 4 — 0,4.

Волны сжатия от разномасштабных взрывов в полостях с фиксированным значением параметра ξ , как это и следует из формулы (2), остаются геометрически подобными [4].

Представляет определенный интерес рассмотрение влияния плотности самого ВВ на параметры взрывного воздействия. Здесь, однако, следует иметь в виду, что изменение плотности может привести к заметному изменению энергосодержания ВВ, что, в свою очередь, не может не сказаться на общей энергии взрыва E_0 [5].

Результаты измерения параметров волны сжатия в тиосульфате при взрыве связанных ($\xi=1$) сферических зарядов различной начальной плотности ρ_1 , полученные с помощью электромагнитной методики измерения массовых скоростей [3], представлены на рис. 1. Отметим сразу же, что использование в данном случае в качестве ВВ тэна избавляет от необходимости проведения дополнительного анализа, связанного с учетом зависимости энергосодержания ВВ от плотности, поскольку для тэна в широком диапазоне ρ_1 энергосодержание есть величина постоянная [5].

Из рис. 1 видно, что экспериментальные данные, соответствующие взрывам зарядов различной плотности, на одинаковых приведенных расстояниях не совпадают. В частности, зависимость $v_0(r_0)$, представленная на рис. 1, а, аналитически описывается формулой

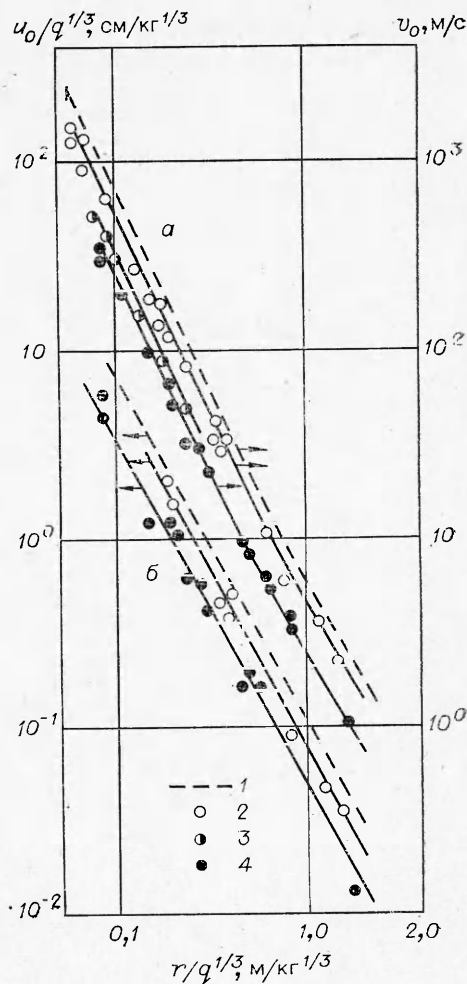
$$v_0 = b\rho_1^{0,8}r_0^{-k} \text{ м/с}, \quad (3)$$

причем $b=3,3$; $k=2,1$ при $r_0 < 0,55\rho_1^{0,3}$ и $b=4,5$; $k=1,7$ при $r_0 > 0,55\rho_1^{0,3}$. Из рис. 1 видно, что изменение плотности заряжения как с помощью применения воздушной полости, так и при использовании зарядов различной начальной плотности приводит к значительному усложнению анализа и прогнозирования взрывного воздействия в твердой среде.

Детальное рассмотрение взрывного процесса показывает, что изменение параметров источника сказывается в первую очередь на энергетических соотношениях взрыва. Действительно, предполагая, например, закон расширения продуктов детонации (ПД) в виде изэнтропы с постоянным показателем n , получаем для величины работы ПД выражение

$$A = \frac{E_0}{\xi^{n-1}} \left[1 - \left(\frac{\rho_*}{\rho_1} \right)^{n-1} \right],$$

где ρ_* — конечная плотность ПД в камуфлетной полости.



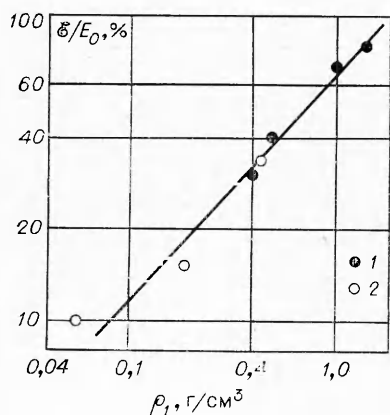


Рис. 2. Энергия, переданная твердой среде при взрыве сферических зарядов с различной плотностью заряжения ρ_1 . 1 — связанный взрыв ($\xi=1$); 2 — взрыв в воздушной полости (данные [1]).

Из приведенного соотношения следует, что «полезная» работа продуктов детонации (другими словами: энергия, переданная твердой среде при взрыве) уменьшается при снижении плотности заряжения взрывного источника — увеличении относительного размера воздушной полости ξ , что одновременно ведет к снижению ρ_1 , либо снижению плотности заряжения ρ_1 при связанном взрыве $\xi = 1$. Это подтверждается анализом экспериментальных данных. Привлекая для оценок энтропию гексогена, близкого по своим свойствам к тэну [6], и задавая смещением стенки зарядной камеры из эксперимента, легко получить величину энергии \mathcal{E} , переданной твердой среде при взрыве. Результаты оценок приведены на рис. 2, где в качестве определяющего параметра использована плотность заряжения ρ_1 (вне зависимости от того, определяется ли величина ρ_1 применением воздушной полости или изменение ρ_1 связано с использованием менее плотного ВВ при плотной упаковке зарядной камеры). Аналитически зависимость $\mathcal{E}(\rho_1)$ можно представить в виде

$$\mathcal{E}/E_0 = 0,65\rho_1^{3/4}, \quad (4)$$

где ρ_1 — плотность заряжения в г/см³.

Изменение энергоотдачи взрыва при варьировании плотности заряжения, видимо, и является причиной нарушения подобия движения в общепринятом смысле (не общая энергия взрыва E_0 , а только переданная среде часть \mathcal{E} определяет характер взрывного воздействия). Для проверки высказанного предположения введем множитель эффективности $\alpha = \mathcal{E}/E_0$ ($\alpha < 1$) и будем рассматривать параметры взрывного движения с использованием относительной координаты $r_1 = r/q_0^{1/3}$, где $q_0 = \alpha q$. Обработанные таким образом экспериментальные данные для зарядов

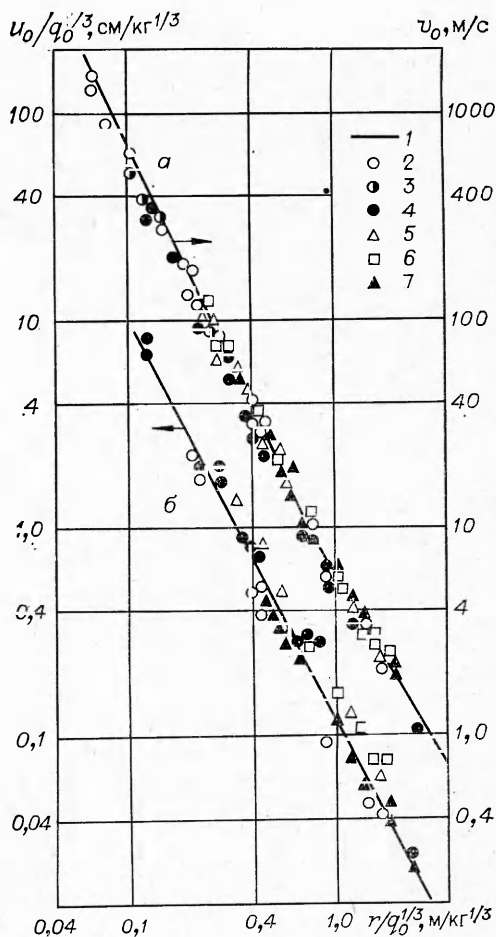


Рис. 3. Максимальные массовые скорости (а) и приведенные максимальные перемещения (б) в тиосульфате при взрыве зарядов с различной плотностью заряжения в зависимости от приведенного расстояния $r/q_0^{1/3}$ ($q_0 = \alpha q$).

1—4 — взрыв плотноупакованного заряда, $\rho_1 = 1,5; 1,0; 0,5$ и $0,4$ г/см³ соответственно; 5—7 — взрыв заряда плотностью $1,5$ г/см³ в полостях, $\xi = 1,5; 2; 3$ и $\rho_1 = 0,44; 0,19$ и $0,55$ соответственно.

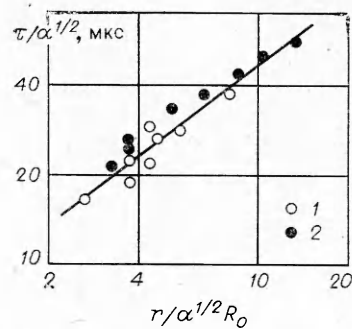
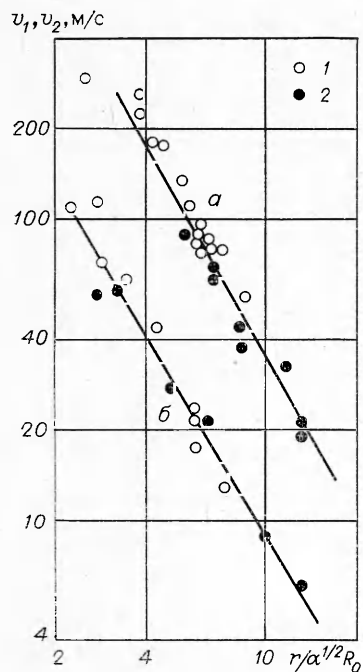


Рис. 5. Приведенная длительность положительной фазы радиальной составляющей движения среды при цилиндрическом взрыве в соли (обозначения аналогичны рис. 4).

Рис. 4. Максимальные радиальные (а) и продольная (б) составляющие массовой скорости при взрыве плотноупакованного заряда в соли (цилиндрический взрыв).
 $\rho_1, \text{г/см}^3$: 1 — 1,15; 2 — 0,5.

различной плотности заряжения (с привлечением значений α из рис. 2) представлены на рис. 3 (максимальная массовая скорость v_0 и максимальные перемещения). Видно, что вне зависимости от характера изменения плотности заряжения (использование ВВ различной плотности при $\xi = 1$ или применение воздушной полости) все экспериментальные данные группируются вокруг единых зависимостей. Это говорит о выполнении принципа энергетического¹ подобия применительно к параметрам движения твердой среды при взрыве зарядов с различной плотностью заряжения, причем параметром подобия является энергия \mathcal{E} , переданная твердой среде при взрыве. Особо следует отметить факт, что единственной величиной, определяющей энергию \mathcal{E} для данной среды как при связанном взрыве, так и при взрыве в воздушной полости является плотность заряжения взрывного источника ρ_1 (см. рис. 2), что, в свою очередь, позволяет рассматривать указанные случаи изменения плотности заряжения совместно.

Помимо взрыва сферического заряда представляет значительный интерес рассмотрение движения среды при цилиндрическом взрыве. К сожалению, в настоящий момент не имеется достаточно убедительных экспериментальных данных, на основе которых можно было бы сделать заключение о величине энергии, передаваемой твердой среде при взрыве цилиндрических зарядов различной плотности. Несмотря на это, применим предложенную в настоящей работе схему к случаю цилиндрического взрыва, предположив, что величина \mathcal{E} при цилиндрическом взрыве примерно совпадает со своим значением при взрыве сферического заряда той же плотности (имеется в виду, что в обоих случаях применяется одно и то же ВВ). Воспользуемся результатами исследований цилиндрического взрыва плотноупакованного заряда тэна в соли [7]. Поправочный множитель α будем выбирать в соответствии с усредненной зависимостью (4), полученной для взрыва сферического заряда из тэна в тиосульфате (свойства соли и тиосульфата близки между собой).

В качестве примера на рис. 4 и 5 представлены максимальная радиальная составляющая массовой скорости v_1 , максимальная продольная

¹ Термин «геометрическое подобие» здесь не подходит.

составляющая массовой скорости v_2 и приведенная длительность положительной фазы радиальной составляющей движения среды $\tau_1/\alpha^{1/2}$ в зависимости от приведенного расстояния $r/\alpha^{1/2}R_0$, где R_0 — радиус цилиндрического заряда. Первоначальные экспериментальные данные заимствованы из работы [7].

Видно, что для предложенной схемы приведения экспериментальные данные, полученные при взрыве цилиндрических зарядов разной плотности, с вполне удовлетворительной точностью группируются вокруг единых зависимостей.

Таким образом, можно считать, что принцип подобия движения по энергии, переданной твердой среде при взрыве, справедлив и в случае взрыва цилиндрических зарядов различной плотности.

*Поступила в редакцию
10/XI 1973*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Спивак. ФГВ, 1978, 14, 2.
2. С. С. Григорян, Г. М. Ляхов и др. ПМТФ, 1963, 4.
3. А. А. Спивак, В. М. Цветков. ФТПРПИ, 1973, 5.
4. А. А. Спивак. ФГВ, 1973, 9, 2.
5. Справочник по буровзрывным работам на карьерах. Киев, Наукова думка, 1973.
6. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, 3, 2.
7. М. М. Павлов, Д. А. Судаков. — В сб.: Взрывное дело, № 76/33, М., Недра, 1976.

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ ДВУХСЛОЙНОГО ЗАРЯДА ВВ ПРИ ВЗРЫВНОМ УПРОЧНЕНИИ МЕТАЛЛА

*Р. П. Дидык, Е. А. Семенюк, Л. В. Грязнова, О. Я. Усов
(Днепропетровск)*

В последнее время прочно устанавливается тенденция использования в технологии взрывного упрочнения двухслойных зарядов ВВ, слои которых резко отличаются по своим физико-химическим свойствам. Как показали исследования, существенным преимуществом применения двухслойных зарядов ВВ для упрочнения металлов является отсутствие микро- и макронарушений в обрабатываемом материале, повышение циклической прочности в сочетании с высокими механическими характеристиками.

Имея в виду, что преимущества использования заряда особенно четко проявляются при обработке объемных деталей, можно попытаться объяснить действие такого заряда на основе простой модели для случая упрочнения детали цилиндрической формы.

Качественно схема механического действия цилиндрического однослойного заряда ВВ (для простоты рассматривается плоское сечение) может быть представлена следующим образом. Импульс напряжений с поверхности цилиндра идет внутрь радиусов и далее, отразившись от оси симметрии, возвращается обратно. Процесс сопровождается потерями, но при отражении импульс в определенной мере должен сохранить подобие с первоначальным импульсом, возбужденным детонационной волной. Поэтому если сравниваются между собой два одинаково энергоемких импульса, излучаемых внутри с поверхности цилиндра с амплиту-