

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Гордеев, Ю. С. Матвеев, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1973, 212, 1.
2. Л. Г. Гвоздева, О. А. Предводителева. Докл. АН СССР, 1965, 163, 5.
3. Т. В. Баженова, Л. Г. Гвоздева и др. Ударные волны в реальных газах. М., «Наука», 1968.
4. L. G. Gvozdeva, T. V. Vazhenova a. o. Astronautica Acta, 1970, 15, 5—6.
5. Л. Г. Гвоздева, О. А. Предводителева, В. П. Фокеев. Изв. АН СССР, МЖГ, 1968, 1.
6. Л. Г. Гвоздева, О. А. Предводителева, В. П. Фокеев.— В сб.: Теплообмен и физическая газодинамика. М., «Наука», 1974.
7. А. Н. Семенов, М. П. Сыщикова, М. К. Березкина. ЖЭТФ, 1970, 15, 5.
8. R. R. Weynants. VTIAS TN № 126, 1968.
9. C. K. Law, I. I. Glass. CASI Trans., 1971, 4, 1.
10. А. Н. Семенов, Н. П. Сыщикова. ФГВ, 1975, 11, 5.
11. Л. Г. Гвоздева, В. П. Фокеев. ФГВ, 1976, 12, 2.
12. Ю. М. Липницкий, В. Н. Ляхов. Изв. АН СССР, МЖГ, 1974, 6.
13. В. П. Фокеев, Л. Г. Гвоздева. Докл. I Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. Т. 1. М., 1974.
14. Д. Л. Меритт. РТК, 1968, 6.
15. Г. А. Макарович, О. А. Предводителева, Г. С. Лисенкова. ТВТ, 1974, 12, 6.
16. W. Bleakney, A. H. Taub. Rev. Mod. Phys., 1949, 21, 4.
17. R. Kawamura, H. Saito. J. Phys. Soc. Japan, 1956, 11, 5.
18. L. F. Henderson, A. Lozzi. J. Fluid Mech., 1975, 68, 1.

## О МЕХАНИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ ВЗРЫВА ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА

*Б. А. Иванов*

Задачи, касающиеся образования воронок, а также движения грунта при взрыве метеорита вблизи поверхности или при ударе, постоянно привлекают к себе внимание. Основными механическими величинами, характеризующими данный процесс, являются параметры ударной волны в грунте и картина остаточных смещений (в частности, размеры образующейся воронки). Неоднократно обсуждался вопрос о возможности оценки параметров ударной волны при взрыве вблизи поверхности по известным зависимостям для камуфлетного взрыва. При таком подходе обычно вводится параметр, определяющий эффективность механического действия взрыва вблизи поверхности относительно камуфлетного взрыва. Этот параметр часто называют эффективной энергией, переданной в грунт [1]. Однако вопрос о подобии механических эффектов поверхностного и камуфлетного взрывов остается пока неясным.

Весьма сложным остается вопрос о выборе определяющих параметров в задаче об импульсном приложении давления к некоторой точке поверхности полупространства [2—4]. В связи с этим становится важным изучение взаимосвязи параметров механического действия взрыва при небольшом заглублении заряда под поверхность грунта. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию некоторых аспектов данного вопроса.

В качестве механических параметров, характеризующих действие взрыва, были выбраны вертикальная составляющая импульса, переданного полупространству при взрыве, скорость разлета частиц грунта с поверхности, величины остаточных смещений в эпицентральной зоне под точкой взрыва и размеры образующейся воронки.

Остановимся кратко на методах измерения этих величин. Вертикальная составляющая импульса обычно измеряется при помощи маятника-мишени, вблизи поверхности которого проводится взрыв. Произведение массы мишени на ее скорость по окончании взрывного процесса и дает величину переданного импульса [5, 6]. Известно, что переданный импульс прямо пропорционален весу заряда взрывчатого вещества (ВВ) и существенно возрастает при заглублении заряда [6]. В качестве маятника-мишени в данной работе использовался ящик, наполненный песком плотностью  $1,6 \text{ г/см}^3$  с влажностью около 7%. Ящик подвешивался на амортизаторах и мог совершать колебания в вертикальном направлении с периодом около 1 с. Скорость ящика измерялась прибором ВИБ и регистрировалась на осциллографах ОК-24 и Н-115. Размеры ящика составляли  $80 \times 80 \times 40 \text{ см}$ , масса с песком — около 500 кг. Использовались заряды ВВ весом от 10 до 50 г, отлитые из сплава тротила и гексогена (ТГ 50/50) в форме шариков.

Для наблюдения за движением частиц грунта в процессе взрыва применялась схема проведения опытов, разработанная в ИФЗ АН СССР А. П. Сухотиным. В одной из стенок ящика, наполненного песком, делалось окно из толстого органического стекла. В центре окна находилась стальная пробка, с внешней стороны подпертая опорной балкой. Непосредственно за пробкой подрывался заряд ВВ (тэн, плотность  $1,7 \text{ г/см}^3$ , вес 0,2—0,4 г). Таким образом энергия взрыва выделялась в полупространстве, а движение грунта, непосредственно прилегающего к окну, соответствовало плоскости симметрии реального взрыва. При засыпке песка создавались окрашенные участки в виде прямоугольников, по координатам углов которых и определялась картина движения. Разлет грунта наблюдался с помощью небольших пластмассовых дисков диаметром около 0,5 см. Киносъемка проводилась кинокамерами «Пентацет» (3000 кадр/с) и ФК-1 (1200 кадр/с). Масштаб изображения на пленке составлял 1:40. Пленка обрабатывалась на измерительном микроскопе БИМ с точностью около 0,025 мм изображения на пленке (1 мм натуре).

Во всех опытах измерялись параметры образующейся воронки: радиус  $B$  и глубина  $H$ , а также зарисовывался профиль воронки. Оказалось, что объем воронки  $V$  с точностью около 10% можно вычислить по формуле

$$V = 1,2 \cdot B^2 H, \quad (1)$$

поэтому в большинстве опытов не проводилось прямого измерения объема воронки, а использовалась формула (1).

Для наглядности заглубление заряда (т. е. расстояние от центра тяжести заряда до поверхности грунта) будет выражаться в радиусах заряда  $r_0$  ( $r_0 = 5,4 \text{ см}$  для заряда весом 1 кг), а все линейные размеры, кроме заглубления, — в приведенном виде  $L/C^{1/3} [\text{м/кг}^{1/3}]$ , где  $C$  — вес заряда.

В данной работе приведены результаты опытов, в которых заглубление заряда изменялось в пределах  $0 \leq h/r_0 \leq 2,5$ . В этом диапазоне заглублений образующиеся воронки были одинаковы по форме. При заглублениях  $h/r_0 > 2,5 \div 3$  наблюдалось обратное падение грунта в воронку, отсутствующее при меньших заглублениях.

На рис. 1 показана зависимость величины импульса  $I$ , переданного в грунт, от величины объема образующейся воронки  $V$  для нескольких заглублений заряда. Видно, что в первом приближении эти величины прямо пропорциональны друг другу. Величина импульса, переданного в грунт при контактном взрыве ( $h=0$ ) на песке  $I/C = 3700 \text{ кг} \cdot \text{м}/(\text{с} \cdot \text{кг})$ , более чем в два раза превосходит импульс, переданный жесткой плите [5]:  $I/C = 1500 \text{ кг} \cdot \text{м}/(\text{с} \cdot \text{кг})$ . Этот факт объясняется выбросом грунта из образующейся воронки.

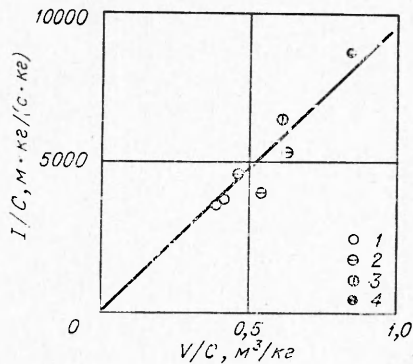


Рис. 1. Соотношение импульса, переданного грунту, и объема образующейся воронки при взрыве.  
 $h/r_0$  равно: 1—0, 2—1,0, 3—2,0, 4—2,5.

динаты  $r$  пересечения продолжения траектории с уровнем свободной поверхности можно представить в виде

$$v = A(h/r_0) \cdot C/r^3, \quad (2)$$

где  $v$  — скорость движения частицы, м/с;  $r$  — координата пересечения, м;  $C$  — вес заряда ВВ, кг;  $A$  — коэффициент,  $м^4/(с \cdot кг)$ , зависящий от заглубления заряда (рис. 2).

По данным кино съемки измерялись также остаточные смещения грунтовых реперов. Оказалось, что зависимость величины остаточного смещения от исходного расстояния до точки взрыва для частиц, находящихся в конусе с раствором около  $60^\circ$  от вертикальной оси, хорошо представляется в виде

$$d = B^{4/3}(h/r_0) \cdot C^{4/3}/R^3, \quad (3)$$

где  $d$  — смещение, м;  $R$  — исходное расстояние до точки взрыва, м;  $B^{4/3}$  — коэффициент,  $м^4/кг^{4/3}$ , зависящий от заглубления заряда. На рис. 3 показаны зависимости  $d(R)$  для нескольких заглублений заряда. Отметим, что в работе [3] также упоминается о подобии полей смещений в воде при небольшом заглублении источника электровзрыва.

Сведем все данные об измерениях импульсов, скоростей разлета и остаточных смещений при взрыве вблизи поверхности на один график. Для этого поделим все величины для заглубленных взрывов на соответствующие величины для контактного взрыва. На рис. 4 показаны зависимости  $I(h)/I(0)$ ,  $A(h)/A(0)$  и  $B(h)/B(0)$  от отношения объемов воронок заглубленного и контактного взрывов  $V(h)/V(0)$ . Видно, что с определенной точностью можно говорить о подобии контактного и мало заглубленного взрывов по рассмотренным параметрам механического действия. Такой вывод не представляется очевидным.

Рассмотрим процесс передачи импульса полупространству грунта при контактном взрыве. Вертикальная составляющая импульса движения грунта в ударной волне, распространяющейся вниз, равна вертикальной составляющей импульса вещества, летящего вверх. При взрыве на поверхности песка вверх движутся продукты детонации ВВ и часть грунта, вылетающего из образующейся воронки. При этом в продуктах детонации остается довольно большое количество энергии (около 70% в случае взрыва на песке [7]). Кроме того, продукты детонации толкают перед собой воздушную ударную волну, вовлекая в движение

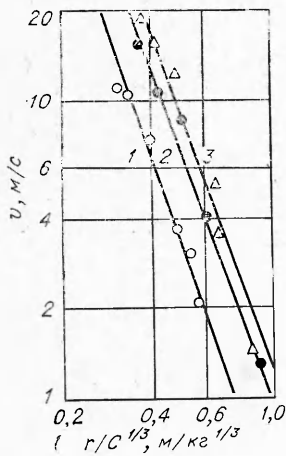


Рис. 2. Зависимость скорости движения жесткого репера  $v$  от координаты пересечения продолжения прямолинейного участка траектории и уровня свободной поверхности грунта  $r$  при взрыве.

$h/r_0$  равно: 1—0, 2—1,0, 3—2,5.

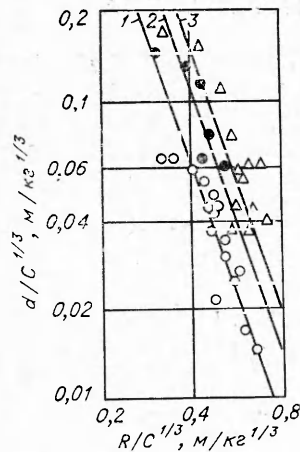


Рис. 3. Зависимость величины остаточного смещения частиц грунта  $d$  от исходного расстояния до точки взрыва  $R$ .

$h/r_0$  равно: 1—0, 2—1,0, 3—2,5.

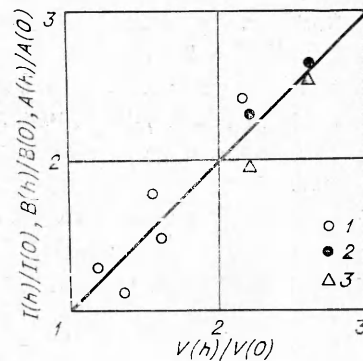


Рис. 4. Зависимость относительных величин, характеризующих механическое действие взрыва от относительного объема воронки  $V(h)/V(0)$ .

1 — импульс, переданный в грунт,  $I(h)/I(0)$ ; 2 — коэффициент в формуле (2)  $A(h)/A(0)$ ; 3 — коэффициент в формуле (3)  $B(h)/B(0)$ .

большую массу воздуха. Таким образом, продукты могут сообщить грунту значительный импульс [5]. При заглублении заряда роль продуктов падает, так как большая часть энергии передается непосредственно в грунт. Поскольку здесь распределение энергии по массе вещества иное, чем при контактном взрыве, встает вопрос о том, в каком отношении будет находиться величина переданного грунту импульса к величинам других параметров механического действия. Прослеживается аналогия с «эквивалентностью на поздней стадии» при быстром ударе [4]. Встает вопрос о том, как должны соотноситься импульс и энергия ударников, соударяющихся с полупространством при различных скоростях, чтобы эти ударники производили одинаковое механическое действие на мишень. Однако при взрыве, в отличие от быстрого удара, не существует заранее заданного импульса «ударника». Импульс, переданный грунту при взрыве, полностью возникает в процессе взрыва. Это обстоятельство, очевидно, и приводит к подобию взрывов вблизи поверхности к механическому действию на мишень.

Как отмечалось ранее [3], рост полости при электровзрыве на поверхности воды происходит по закону, очень близкому к закону автомодельного движения при постоянной энергии. Этот факт вместе с изложенными выше экспериментальными данными дает основание вводить величину переданной в грунт энергии и оценивать (быть может несколько условно) ее величину, сравнивая параметры механического действия контактного и малоуглубленного взрывов.

В заключение автор выражает глубокую благодарность В. Н. Костюченко за полезные обсуждения и А. П. Сухотину за любезное разрешение воспользоваться установкой для оптических наблюдений и большую помощь в проведении экспериментов.

Институт физики Земли АН СССР,  
Москва

Поступила в редакцию  
10/X 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. H. F. Cooper (Ir.), H. L. Brode, G. G. Leigh. Some Fundamental aspects of Nuclear Weapon. Technical report No. AFWL — TR — 72—19 Kirtland Air Force Base, New Mexico, 1972.
  2. А. А. Дерибас, С. И. Похожаев. Докл. АН СССР, 1962, 144, 3.
  3. В. Ф. Минин. ПМТФ, 1964, 3.
  4. Дж. Динс, Дж. Уолш.— В сб.: Высокоскоростные ударные явления. М., «Мир», 1973.
  5. Е. П. Шубин. ФГВ, 1965, 1, 3.
  6. Л. И. Кошелев и др. ФГВ, 1965, 1, 1.
  7. В. Д. Алексеенко. ФГВ, 1967, 3, 1.
-