

**ДВИЖЕНИЕ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА
ПРИ КАМУФЛЕТНОМ ВЗРЫВЕ**

*И. Л. Зельманов,
О. С. Колков, А. М. Тихомиров, А. Ф. Шацкевич
(Москва)*

При экспериментальном исследовании взрыва в песчаном грунте [1—3] основное внимание уделялось изучению параметров на фронте взрывной волны, движение же за фронтом подробно не исследовалось. Следует отметить, что данные, полученные разными авторами, существенно расходятся даже для параметров на фронте [1, 3]. Кроме того, ввиду отсутствия экспериментальных результатов по расширению котловой полости для построения полной картины движения приходилось прибегать к не всегда убедительным экстраполяциям.

В настоящей работе приводятся кинематические параметры движения насыпного песчаного грунта при сферически симметричном камуфлетном взрыве зарядов взрывчатого вещества. В работе проводилось непосредственное измерение скорости перемещения различных слоев грунта (массовой скорости) и использовались данные по расширению котловой полости, приведенные в [4].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыты проводились в сухом песке объемной плотностью $1,55 \text{ г/см}^3$. Утрамбовка песка при засыпке не производилась. Результаты опытов в песке с различным преобладающим размером частиц (от 0,1 до 1,0 мм) оказались тождественными. Были использованы прессованные заряды тэна сферической формы плотностью $1,4 \text{ г/см}^3$, удельной теплотой взрыва 1400 ккал/кг и весом 2,5 и 0,8 г. Иницирование осуществлялось путем пропускания электрического импульса через вмонтированную в заряд проволоку. Энергия, выделявшаяся при перегорании проволоки, много меньше энергии взрыва. Взрывы проводились как в центре рабочего объема, так и на дне бассейна на массивной латунной плите. В последнем случае заряду приписывался удвоенный вес. Полученные результаты подтверждают справедливость такого допущения. Обработка осциллограмм проводилась до момента прихода в рассматриваемую точку волн, отраженных от свободной поверхности и стен бассейна.

Регистрация во времени массовой скорости проводилась на различных расстояниях от центра взрыва по вертикальному направлению вверх от заряда. Методика регистрации в принципе сводится к следующему. Датчик, состоящий из плоской проволочной катушки в каркасе из эпоксидной смолы, диаметром 10—45 мм и толщиной 0,2—0,5 мм помещается в грунт и при взрыве движется вместе с ним. Внутри

грунта с помощью внешнего источника создается постоянное неоднородное магнитное поле. В случае отсутствия радиальной деформации датчика в нем наводится э. д. с. индукции:

$$\text{э. д. с.} = IU \frac{dM}{dR} \quad (1)$$

Здесь I — ток в катушке — источнике магнитного поля (ИМП); U — скорость движения датчика; M — коэффициент взаимной индукции датчик — катушка ИМП; R — координата датчика.

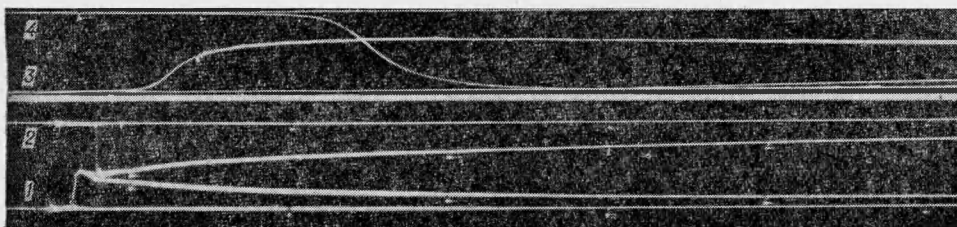


Рис. 1. Образцы осциллограмм массовой скорости. Интервал между метками времени — 1 мек; $C = 2,24 \cdot 10^{-3}$ кг; R_0^0 (м/кг^{1/3}) равно: 0,46 (1), 0,612 (2), 2,76 (3), 3,06 (4).

В целях исключения сигнала от деформации датчика (в диапазоне ближе 20 радиусов заряда) конфигурация поля выбиралась таким образом, чтобы датчик находился в точке, где напряженность поля равна нулю, а производная dM/dR имеет достаточно большое значение. Кроме того, величина сигнала от деформации определялась независимо экспериментальным путем. Сигнал с датчиков регистрировался на осциллографах ОК-24М (ИХФ АН СССР), работавших в режиме механической развертки. Образцы осциллограмм приведены на рис. 1. Разрешение регистрирующей системы во времени позволяло регистрировать без искажения импульсы с временем нарастания 5 мсек и более. В опытах одновременно устанавливалось от одного до четырех датчиков. Схема экспериментов приведена на рис. 2.

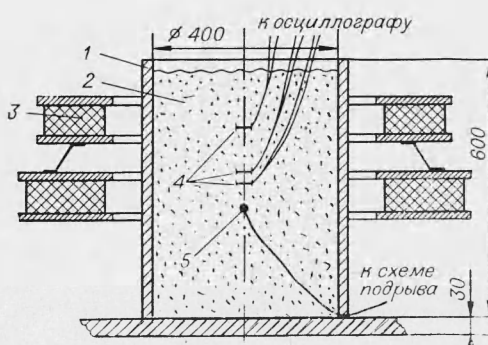


Рис. 2. Схема проведения эксперимента. 1 — бассейн; 2 — песок; 3 — система катушек ИМП; 4 — датчики; 5 — заряд ВВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В изложении результатов эксперимента используются приведенные расстояние $R^0 = R/C^{1/3}$ и время $t^0 = t/C^{1/3}$. Здесь C — вес заряда (кг) в пересчете на ТНТ с удельной теплотой взрыва 1000 ккал/кг (при взрыве на дне бассейна вес заряда удваивается).

На рис. 3 приведены некоторые из полученных зависимостей массовой скорости различных слоев грунта от времени с момента взрыва.

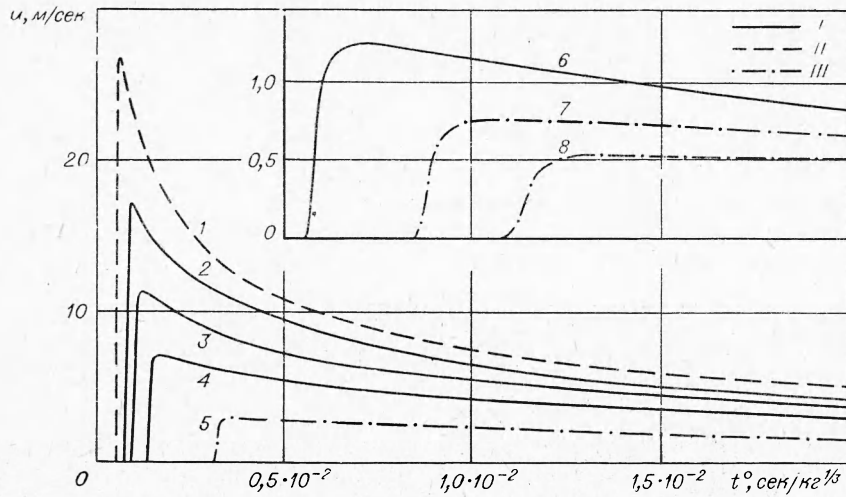


Рис. 3. Эпюры массовой скорости различных слоев грунта во времени; R_0^0 ($\text{м/кг}^{1/3}$) равно: 0,33 (1), 0,42 (2), 0,536 (3), 0,69 (4), 1,10 (5), 1,53 (6), 1,89 (7), 2,20 (8).

I — $C=2,24 \cdot 10^{-3}$ кг; II — $C=3,5 \cdot 10^{-2}$ кг; III — $C=7,0 \cdot 10^{-3}$ кг.

Как видно из графика, время нарастания скорости до максимума непрерывно увеличивается по мере удаления от заряда. Ниже приведены значения этого времени для $C=2,24 \cdot 10^{-3}$ кг:

R_0 , мм	τ , мкс/сек
50	5
100	40
160	125
260	440
380	940

Следует, однако, отметить, что из-за плавного нарастания массовой скорости времена нарастания могут определяться с некоторой ошибкой в сторону их занижения.

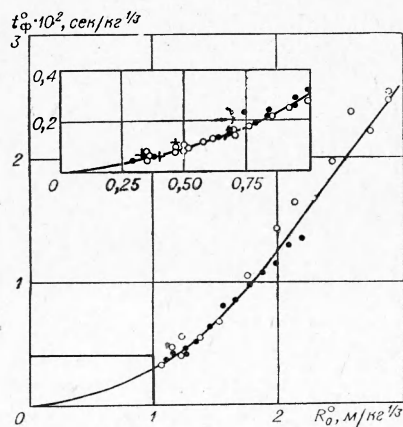


Рис. 4. Зависимость времени прихода максимума массовой скорости от начального расстояния от центра взрыва.

Время прихода максимума массовой скорости в зависимости от начального расстояния от центра взрыва представлено на рис. 4. Точки опытов с зарядами различного веса ложатся на одну кривую. Графическое дифференцирование этой кривой позволяет получить величины скорости распространения максимума:

R_0^0 , $\text{м/кг}^{1/3}$	D , м/сек
0,3	500
0,5	350
1,0	172
2,2	75

Зависимость максимальной массовой скорости U_{ϕ} от начального расстояния от центра взрыва представлена на рис. 5. Как видно из графика, все экспериментальные точки ложатся

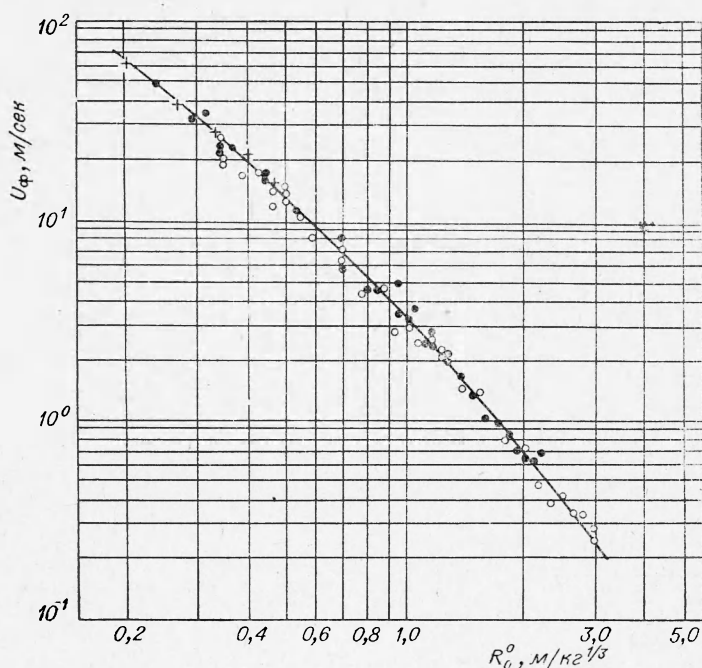


Рис. 5. Зависимость максимальной массовой скорости от приведенного начального расстояния от центра взрыва.

на общую кривую. Степень затухания максимальной массовой скорости в исследованном диапазоне плавно меняется от $-1,5$ до $-2,7$. Однако если интервал измерений разбить на два участка, то на них зависимость может быть аппроксимирована степенными законами:

$$\begin{aligned}
 U_{\phi} &= 3,6 (R_0^0)^{-1,8}, & 0,2 \leq R_0^0 \leq 1,0; \\
 U_{\phi} &= 3,6 (R_0^0)^{-2,5}, & 1,0 \leq R_0^0 \leq 3,0.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

При этом среднее квадратичное отклонение точек составляет 15%. Сравнение с экспериментальными результатами [1] дает хорошее согласие в диапазоне $0,2 \leq R_0^0 \leq 1,0$.

Из зависимостей массовой скорости различных слоев грунта от времени были получены распределения массовой скорости по начальной (лагранжевой) координате R_0^0 . Путем учета смещений грунта ΔR^0 строились профили массовой скорости в зависимости от эйлеровой координаты $R_0 = R_0^0 + \Delta R^0$ для различных моментов времени ($2,1 \cdot 10^{-3} \leq t^0 \leq 1,57 \cdot 10^{-2}$) (рис. 6). Точки опытов с зарядами различного веса хорошо согласуются между собой, что говорит о выполнении за фронтом волны закона геометрического подобия. Как следует из сопоставления кривых (см. рис. 3,3) с экспериментальными, начиная с расстояния $R^0 = 1,0 \text{ м/кг}^{1/3}$ (что соответствует приблизительно двадцати радиусам заряда), значение плотности грунта после прохождения фронта волны практически не изменяется во времени и остается равным значению, достигнутому на фронте. На более близких расстояниях плотность грунта за фронтом с течением времени падает.

Для оценочных расчетов распределение скорости за фронтом по эйлеровой координате может быть описано степенными законами с показателем, зависящим от приведенной координаты фронта R_Φ^0 (т. е. от приведенного времени):

$$U = U_\Phi \left(\frac{R_\Phi^0}{R^0} \right)^n, \quad n = 1,5 + 0,14 R_\Phi^0$$

$$\left(\begin{array}{l} 0,254 \leq R^0 \leq R_\Phi^0 \leq 2,2 \\ 0,84 \leq R_\Phi^0 \leq 2,2 \end{array} \right), \quad (3)$$

при этом показатель n меняется от 1,62 до 1,81.



Рис. 6. Профили массовой скорости грунта в эйлеровых координатах.
 $I - t_1^0 = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ сек/кг}^{1/3}$; $II - t_2^0 = 1,57 \cdot 10^{-2} \text{ сек/кг}^{1/3}$
 1 — значения максимальной массовой скорости, полученные с усредненной кривой рис. 4; 2 — положение и скорость границы котловой полости; 3 — кривые $(R^0)^{-2}$, соответствующие случаю постоянства плотности за фронтом волны.

Для вычисления значений плотности грунта за фронтом удобно воспользоваться уравнением неразрывности в лагранжевой форме

$$\frac{1}{3} \cdot \frac{\partial}{\partial R_0} (R_0 + \Delta R)^3 = \frac{\rho_0}{\rho} R_0^2, \quad (4)$$

где ρ_0 и ρ — начальная и текущая плотности грунта соответственно. Зависимости $\Delta R(R_0, t)$ были получены интегрированием скорости различных слоев грунта во времени. Дифференцирование по R_0 проводилось графически. Результат расчета по формуле (4) представлен в табл. 1. Значения плотности на фронте ($R_0^0 = R_\Phi^0$) подсчитаны из условий сохранения

$$\rho (D - U_\Phi) = \rho_0 D. \quad (5)$$

Таблица 1

$R_0^0 = 0,31 \text{ м/кг}^{1/3}$		$R_0^0 = 0,6 \text{ м/кг}^{1/3}$		$R_0^0 = 1,0 \text{ м/кг}^{1/3}$	
$R_\Phi^0, \text{ м/кг}^{1/3}$	ρ/ρ_0	$R_\Phi^0, \text{ м/кг}^{1/3}$	ρ/ρ_0	$R_\Phi^0, \text{ м/кг}^{1/3}$	ρ/ρ_0
0,31	1,12	0,6	1,03	1,0	1,018
0,53	1,08	1,0	1,02	1,4	1,018
1,00	0,98	1,4	1,00	1,8	1,010
1,40	0,92	1,8	0,97	2,15	1,000
1,80	0,83	2,15	0,96		
2,15	0,78				

Однако следует отметить, что формула (5) является точной лишь для ударного фронта, что в данном случае придает результатам расчета по ней оценочный характер. Как следует из данных табл. 1, в рассмотренном диапазоне времени при $R_0^0 < 1,0 \text{ м/кг}^{1/3}$ плотность грунта за фронтом уменьшается и падает ниже начального значения, причем падение тем сильнее, чем ближе к заряду расположен рассматриваемый слой.

Для вычисления кинетической энергии грунта были использованы распределения массовой скорости по начальной координате R_0 , что избавило от необходимости учитывать изменения плотности. Расчет для различных методов времени проводился по формуле

$$E = 2\pi \rho_0 \int_{r_0}^{R_{\text{ф}}} U^2 R_0^2 d R_0. \quad (6)$$

Отношение кинетической энергии грунта к полной энергии взрыва как функция координаты фронта приведено в табл. 2. Из нее видно, что к моменту, когда фронт распространился на расстояние $R_{0\text{ф}} = 0,5 \text{ м/кг}^{1/3}$, основная часть энергии диссипировала. При этом энергия продуктов взрыва практически полностью передалась грунту, как это следует из оценки энергии в котловой полости. Дальнейшее падение кинетической энергии происходит сравнительно медленно.

Таблица 2

$R_{\text{ф}}^0, \text{ м/кг}^{1/3}$	$E_{\text{к}}/E_0, \%$
0,5	4,9
0,9	3,4
1,1	2,9
1,3	2,5
1,5	2,2
1,8	1,9
2,2	1,6

ВЫВОДЫ

1. Предложена индукционная методика измерения массовой скорости слабосвязанного грунта во времени.
2. Получена полная картина движения при взрыве ВВ в насыпном песчаном грунте. Приведены кинетические параметры движения: массовая скорость грунта, ее распределение по расстоянию и изменение во времени, кинетическая энергия грунта во времени, изменение плотности грунта за фронтом волны.
3. Получены эмпирические формулы для зависимости максимальной массовой скорости от расстояния до центра взрыва и формулы, описывающие распределения массовой скорости за фронтом в различные моменты времени.
4. Показана выполнимость закона геометрического подобия как для параметров на фронте волны (максимальной массовой скорости и времени прихода максимума), так и для движения за фронтом.

Поступила в редакцию
29/V 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Докучаев, В. Н. Родионов, А. Н. Ромашов. Взрыв на выброс. М., Изд-во АН СССР, 1963.
2. Г. М. Ляхов. ПМТФ, 1961, 1.
3. В. М. Цветков. ПМТФ, 1962, 5.
4. О. С. Колков, А. М. Тихомиров, А. Ф. Шацукевич. ФГВ, 1967, 3, 4.