

Л. В. АЛЬТШУЛЕР, А. В. БАЛАБАНОВ, В. А. БАТАЛОВ, Н. А. ГЕРАЩЕНКО,
В. А. РОДИОНОВ, В. А. СВИДИНСКИЙ, Д. М. ТАРАСОВ

КАМУФЛЕТНЫЙ ВЗРЫВ В ЖИДКИХ И УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕДАХ

(Представлено академиком Ю. Б. Харитоном 8 XII 1969)

Взрыв сферических зарядов в грунтах вызывает расширение камуфлетной полости и движение окружающей среды, затухающее в результате ее пластического и упругого сопротивления. Качественное математическое описание явления в линейном приближении и в приближении несжимаемых и пористо-несжимаемых сред дано в ряде советских (1-8) и зарубежных (9, 10) публикаций. Экспериментально развитие камуфлетных полостей в песке изучено в (7, 8, 11).

В настоящем сообщении кратко изложены результаты экспериментального и математического исследования камуфлетных взрывов в воде, водном растворе $ZnCl_2$ ($\rho_0 = 2 \text{ г/см}^3$), влажной глине, алюминии, затвердевшем цементно-песчаном растворе и каменной соли. Для интерпретации экспериментальных результатов были использованы результаты численных расчетов упруго-пластических течений, выполненных по программе, имеющей много общего с методикой Уилкинса (12).

Свойства среды описывались уравнениями состояния в форме

$$P = P_x(\sigma) + \rho_0 \sigma \Gamma [E - E_x(\sigma)], \quad (1)$$

дополненными условиями пластичности

$$P_r - P_\theta = k + m(\sigma - 1) / \sigma. \quad (2)$$

В (1) и (2) $P = 1/3(P_r + 2P_\theta)$ — давление; P_r, P_θ — радиальные и тангенциальные напряжения сжатия; $P_x = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} (\sigma^n - 1)$ — «холодное» сопротивление среды; ρ_0 — начальная плотность; c_0 — начальная скорость звука; $\sigma = \rho / \rho_0$ — степень сжатия; $E_x = \int_1^\sigma \frac{c_0^2}{n} (\sigma^n - 1) \frac{d\sigma}{\sigma^2}$ — энергия «холодного» сжатия; E — удельная внутренняя энергия; Γ — коэффициент Грюнайзена; k — постоянная пластического сопротивления при $P = 0$; m — коэффициент упрочнения давлением.

Таблица 1

Среда	c_0 , г/см ³	c_0 , км/сек	n	Γ	$k_{ст}$, кГ/см ²	$r_{ос}$, мм	a_0 , мм	$\rho_{э.в.}$, г/м ³	P_0 , кбар
Вода	1	1,5	6	1	—	9	9	1,58	75
Раствор $ZnCl_2$	2	1,64	6,5	0,8	—	9	9	1,58	75
Влажная глина	2	2,1	5,33	0,57	—	9	8	1,58	75
Алюминий	2,77	5,5	3,5	0,9	7	17,5	18	1,515	65
Цементно-песчаный раствор	2,03	1,64	5	0,4	1,45	9	10	1,215	35
NaCl	2,16	3,4	3,75	1	2÷3	—	—	—	—

Параметры уравнений состояния изучавшихся материалов приведены в левой части табл. 1; там же дано значение статической прочности $k_{ст}$.

При подборе уравнений состояния были использованы данные по динамическому сжатию исследовавшихся веществ и их сжимаемости в нормальных условиях. Поведение продуктов взрыва зарядов из 50% сплава тротила и гексагена описывалось уравнением изэнтропы

$$P = 11,61\rho^{1/3} + 8,480\rho^{4/3}. \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой интерпретацию данных, опубликованных в (13). Здесь ρ дано в г/см³ и P в кбар.

Экспериментальное наблюдение за развитием камуфлетных полостей осуществлялось методами импульсной рентгенографии. Короткие импульсы излучения генерировались рентгеновской трубкой с игольчатым анодом (14) и в ряде опытов безжелезным бетатроном (15). В первом случае номинальное напряжение импуль-

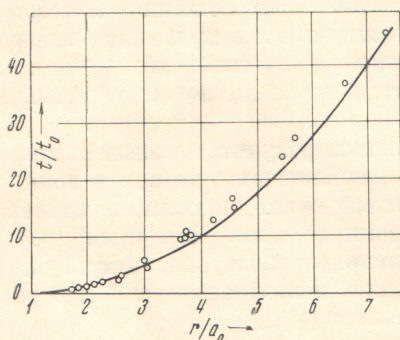


Рис. 1

Рис. 1. $r-t$ -Диаграмма расширения полости при взрыве в воде

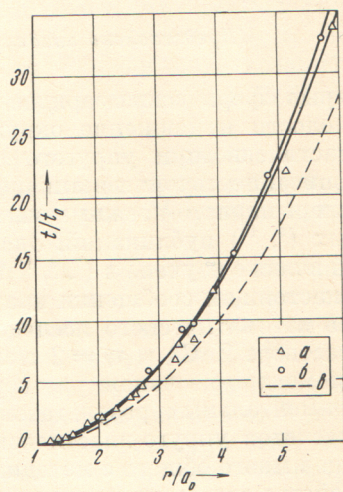


Рис. 2

Рис. 2. $r-t$ -Диаграмма расширения полости при взрыве в глине (а), растворе $ZnCl_2$ (б) и воде (в)

сного генератора составляло $\sim 3,5$ Мв, во втором максимальная энергия электронов достигала 70 Мэв.

Заряды радиусом в 9 и 17,5 мм помещались в центре кубических блоков с длиной ребра 200 мм или шаровых контейнеров того же диаметра. Большинство опытов, в том числе все регистрации поздних фаз явления, производилось на зарядах с $r_{03} = 9$ мм с тем, чтобы избежать влияния волн разрежения от наружной поверхности. Для жидких и пластичных сред радиус r_{03} и начальный радиус полости a_0 совпадали. Для алюминия и цементно-песчаного раствора они несколько различались.

Размеры зарядов, начальные размеры полостей, средние плотности в.в. и отвечающие им начальные давления приведены в правой части табл. 1.

Результаты эксперимента и расчета представлены на диаграммах относительный радиус \tilde{r} — относительное время \tilde{t} (рис. 1—3). За единицу длины принят начальный радиус полости a_0 , за единицу времени $t_0 = a_0 / u_0$ при $u_0 = 1$ км/сек (численно t_0 в мсек. равно длине a в мм). Быстрее всего полость развивается в воде и несколько медленнее в глине и в водном растворе $ZnCl_2$. Для последних двух веществ, имеющих близкие начальные плотности и близкие уравнения состояния, кривые расширения почти совпадают (рис. 2). У алюминия экспериментально зафиксирована начальная фаза движения и конечный размер полости r_K , в 1,9 раз превышающий начальный. Для цементно-песчаных блоков $\tilde{r}_K = 2,6 a_0$.

Расчеты без учета сдвиговой прочности среды хорошо аппроксимируют экспериментальные кривые для воды, водного раствора $ZnCl_2$, влажной глины, а также начальные фазы движения твердых сред. Для последних совпадение с экспериментом на конечном участке траектории достигается путем введения в программу счета констант пластического сопротивления сдвигу. Для алюминия наилучшее согласие расчета с опытом имеет место при $k = 11,9 \text{ кг/мм}^2$ и очень мало зависит от m ; для цементно-песчаного раствора — при $k = 3,4 \text{ кг/мм}^2$. Эти величины, определяющие эф-

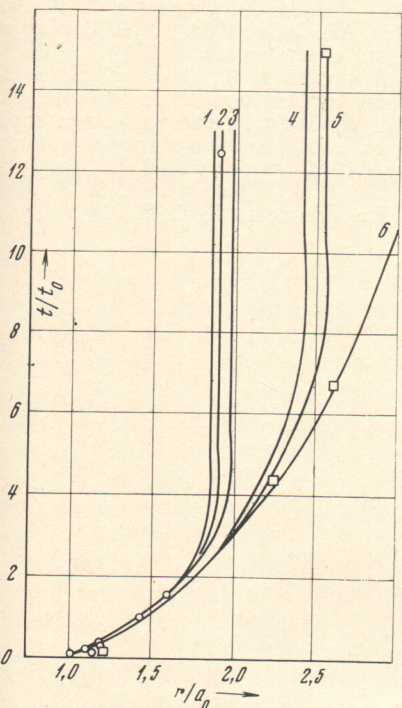


Рис. 3

Рис. 3. $r-t$ -Диаграмма расширения полости при взрыве: 1-3 — в алюминии при $\sigma_s = 13,0 \text{ кг/мм}^2$ (1), $11,9 \text{ кг/мм}^2$ (2) и $10,0 \text{ кг/мм}^2$ (3); 4-5 — в цементно-песчаном растворе при $\sigma = 4,0 \text{ кг/мм}^2$ (4), $3,4 \text{ кг/мм}^2$ (5) и $1,45 \text{ кг/мм}^2$ (6)

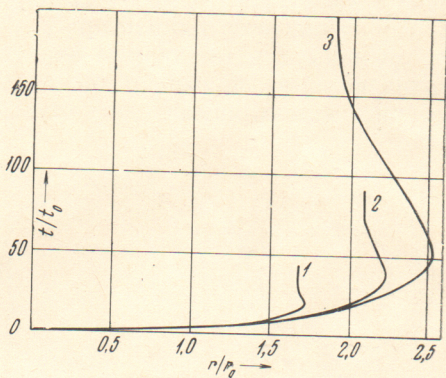


Рис. 4

Рис. 4. $r-t$ -Диаграмма расширения полости при взрыве в NaCl при $\sigma_s = 340 \text{ кг/см}^2$ (1), 100 кг/см^2 (2) и 50 кг/см^2 (3). Литостатическое давление 200 атм.

фективное динамическое сопротивление твердых тел, существенно превышают статические пределы прочности (см. табл. 1).

Для выяснения роли противодействия авторами были проведены расчеты камуфлетных взрывов в средах, различающихся прочностью при противодействии в 200 атм. Результаты вычислений, выполненных с уравнением состояния NaCl, графически представлены на рис. 4. Единицей длины

на этих графиках служит динамический радиус $r_d = \sqrt[3]{Q/\rho_0 c_0^2}$ (Q — энергия заряда), а единицей времени $t_0 = r_d/c_0$. Рассчитанные кривые относятся к значениям $k = 50; 100; 340 \text{ кг/см}^2$ и $m = 0$.

Как видно из $\tilde{r}-\tilde{t}$ -диаграмм, одно и то же конечное значение радиуса полости может быть получено в средах различной прочности при одинаковой энергии взрыва.

Разработанная математическая методика, как показывает сравнение вычислений и эксперимента, с хорошей точностью описывает явление камуфлетного взрыва в жидких и упруго-пластических средах. Ее применение позволяет анализировать влияние на процесс образования полости уравнения состояния продуктов взрыва и основных параметров среды — плотности, сжимаемости, прочности и противодействия.

Поступило
8 XII 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. В. Альтшулер, ДАН, 52, № 3, 199 (1946). ² Ф. А. Бахшиян, ПММ, 12, в. 3, 281 (1948). ³ Я. Л. Лунц, ПММ, 13, в. 1, 55 (1949). ⁴ Н. В. Зволинский, ПММ, 24, в. 1, 126 (1960). ⁵ П. Ф. Сабодаш, Физика Земли, № 4, 25 (1966). ⁶ А. С. Компанеец, ДАН, 109, № 1, 49 (1956). ⁷ Н. М. Докучаев, В. Н. Родионов, А. Н. Ромашев, Взрыв на выброс, Изд. АН СССР, 1963. ⁸ Л. В. Альтшулер, А. В. Балабанов и др., Физика горения и взрыва, № 3 (1970). ⁹ Х. Г. Гопкинс, Динамические неупругие деформации металлов, М., 1964. ¹⁰ П. Чедвик, А. Д. Кокс, Х. Г. Гопкинс, Механика глубинных подземных взрывов, М., 1965. ¹¹ О. С. Колков, А. М. Тихомиров, А. Ф. Шацкевич, Физика горения и взрыва, № 4, 569 (1967). ¹² М. Л. Уилкинс, Сборн. Вычислительные методы в гидродинамике, М., 1967. ¹³ В. Н. Зубарев, Г. С. Телегин, Н. В. Жирноклетов, Прикл. мех. и техн. физ., № 4 (1969). ¹⁴ В. А. Цукерман, М. А. Монова, ЖТФ, 27, в. 2, 391 (1957). ¹⁵ А. Н. Павловский, Г. Д. Кулешов и др., ДАН, 160, № 1, 68 (1965).