

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
РАДИУСА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ЗАРЯДА**

*В. А. Кривцов*

(Киев)

При взрыве цилиндрического заряда, вертикально расположенного в грунте, образуется полость, по форме близкая к цилиндрической.

Вполне понятно, что максимальный радиус полости будет получен при камуфлетном взрыве, а минимальный — при взрыве заряда наружного действия, верхняя часть которого выходит на поверхность.

Целью проведения опытов являлось определение зависимости радиуса полости от величины заглубления заряда (при наличии забойки).

Эксперименты проводились в полевых условиях в суглинках с ненарушенной структурой. Объемный вес суглинка  $\gamma_0 = 1,56 \text{ г/см}^3$ , пористость  $n_0 = 0,47$  и влажность  $\omega_0 = 0,22$ . В качестве цилиндрических зарядов использовались 1, 2, 3, 9, 16 и 25 ниток детонирующего шнура (ДШ) типа ДШ-В. Вес взрывчатого вещества в одной нитке ДШ-В — 13 г/м.

Для проведения опытов подготавливались площадки размером в плане  $2 \times 2 \text{ м}$ . Растительный слой на площадках снимался и поверхность выравнивалась. С помощью ручных буров в грунте делались вертикальные скважины. Радиусы этих скважин были примерно равны радиусам зарядов. Расстояния между скважинами принимались достаточно большими (15 м) для того, чтобы взаимное влияние взрывов на параметры полостей было исключено.

1. Первая серия опытов заключалась в проведении взрывов при различной величине забойки. Длина каждого заряда составляла 1,5 м. Для уменьшения влияния энергии взрыва инициатора на размеры полости электродетонатор устанавливался в нижней части заряда. Забойка скважин производилась грунтом путем механического утрамбовывания до плотности несколько большей плотности естественного грунта. Измеряемыми параметрами являлись величина забойки и радиус полости.

Общая схема опытов до и после взрыва для четырех одинаковых зарядов приведена на рис. 1.

После каждого взрыва с помощью ромбического измерителя замерялся диаметр полости на глубинах, соответствующих 0,3; 0,6 и 1,0 м, отсчитанных от верхнего конца заряда. Если взрыв был камуфлетный, то полость вскрывалась. Диаметр полости для каждой из указанных глубин замерялся в трех направлениях, смещенных друг относительно друга на  $120^\circ$ . Таким образом, диаметр каждой полости определялся как среднее арифметическое значение девяти замеров.

Из серии проведенных экспериментов выбирались опыты, в которых были зафиксированы камуфлетные взрывы. По результатам замеров в

этих опытах построена графическая зависимость величины заряда  $q$  от минимальной величины заглубления  $H$ , при которой происходил полный камуфлет (рис. 2).

Кривая, описываемая формулой

$$H = k q^n, \quad (1)$$

построена по методу наименьших квадратов.

Коэффициенты  $k$  и  $n$  определялись по формулам:

$$n = \frac{m \sum_{i=1}^m \lg q_i \lg H_i - \left( \sum_{i=1}^m \lg q_i \right) \left( \sum_{i=1}^m \lg H_i \right)}{m \sum_{i=1}^m \lg^2 q_i - \left( \sum_{i=1}^m \lg q_i \right)^2};$$

$$\lg k = \frac{\left( \sum_{i=1}^m \lg^2 q_i \right) \left( \sum_{i=1}^m \lg H_i \right) - \left( \sum_{i=1}^m \lg q_i \right) \left( \sum_{i=1}^m \lg H_i \lg q_i \right)}{m \sum_{i=1}^m \lg^2 q_i - \left( \sum_{i=1}^m \lg q_i \right)^2}$$

где  $m$  — количество опытов.

При  $m=11$  (рис. 2)  $n=0,676$ ,  $k=4,1$ .

Средняя квадратическая ошибка коэффициентов  $k$  и  $n$  определялась по формулам:

$$\sigma_n = \left( \frac{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2}{m-2} \right)^{1/2} \cdot \left[ \frac{m}{m \sum_{i=1}^m \lg^2 q_i - \left( \sum_{i=1}^m \lg q_i \right)^2} \right]^{1/2},$$

$$\lg \sigma_k = \left( \frac{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2}{m-2} \right)^{1/2} \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^m \lg^2 q_i}{m \sum_{i=1}^m \lg^2 q_i - \left( \sum_{i=1}^m \lg q_i \right)^2} \right]^{1/2};$$

$$\sigma_i = \lg k + n \lg q_i - \lg H_i.$$

Для простоты вычислений формула (1) может быть записана в виде

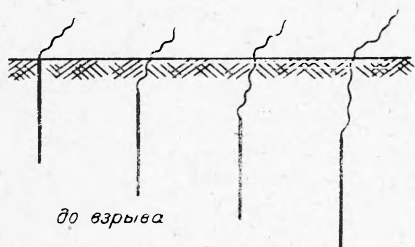
$$H = 4,0 \cdot q^{2/3} [M], \quad (2)$$

где  $q$  — величина цилиндрического заряда, кг/м.

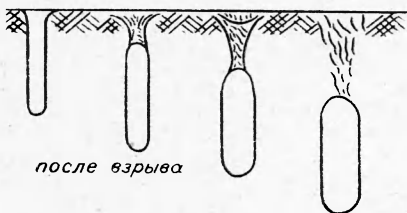
При этом средняя квадратическая ошибка новых значений коэффициентов несколько увеличивается, но остается в допустимых пределах и составляет

$$\sigma_k = 1,073, \quad \sigma_n = 0,074.$$

Формула (2) приближенно отражает геометрическое подобие. Если распространить ее на случай взрыва с выбросом грунта, тогда зависимость радиуса полости от глубины забойки можно выразить в относительных величинах.



до взрыва



после взрыва

Рис. 1.

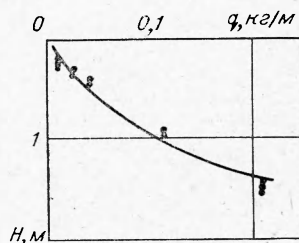


Рис. 2.

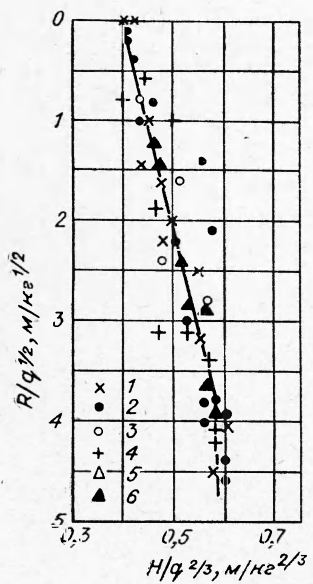


Рис. 3.

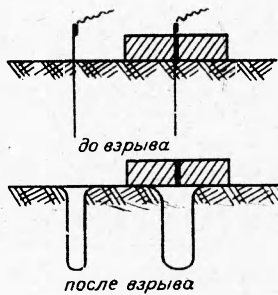


Рис. 4.

На рис. 3 (точки 1—6 соответствуют 1, 2, 3, 9, 16 и 25 ниткам ДШ) нанесены экспериментальные точки  $\frac{R}{q^{1/2}} = f\left(\frac{H}{q^{2/3}}\right)$ , по которым по методу наименьших квадратов проведена прямая

$$\bar{R} = a + b\bar{H}, \quad (3)$$

где

$$\bar{R} = \frac{R}{q^{1/2}}; \quad \bar{H} = \frac{H}{q^{2/3}}.$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$  определялись по формулам:

$$a = \frac{\left(\sum_{i=1}^m \bar{H}_i^2\right) \left(\sum_{i=1}^m \bar{R}_i\right) - \left(\sum_{i=1}^m \bar{H}_i\right) \left(\sum_{i=1}^m \bar{H}_i \bar{R}_i\right)}{m \sum_{i=1}^m \bar{H}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m \bar{H}_i\right)^2};$$

$$b = \frac{m \sum_{i=1}^m \bar{H}_i \bar{R}_i - \left(\sum_{i=1}^m \bar{H}_i\right) \left(\sum_{i=1}^m \bar{R}_i\right)}{m \sum_{i=1}^m \bar{H}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m \bar{H}_i\right)^2}.$$

В нашем случае  $m=54$  (рис. 3),  $a=0,40$ ,  $b=0,047$ .

Средняя квадратическая ошибка коэффициентов  $a$  и  $b$  определялась по формулам:

$$\sigma_a = \left(\frac{\sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2}{m-2}\right)^{1/2} \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^m \bar{H}_i^2}{m \sum_{i=1}^m \bar{H}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m \bar{H}_i\right)^2} \right]^{1/2};$$

$$\sigma_b = \left(\frac{\sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2}{m-2}\right)^{1/2} \cdot \left[ \frac{m}{m \sum_{i=1}^m \bar{H}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^m \bar{H}_i\right)^2} \right]^{1/2};$$

$$\varepsilon_i = a + b\bar{H}_i - \bar{R}_i.$$

Вычисленные значения этих ошибок составляют  $\sigma_a = 0,0074$ ,  $\sigma_b = 0,0026$ .

Формула для определения радиуса полости, когда взрыв не является камуфлетным, имеет вид

$$R = \left(0,40 + 0,047 \frac{H}{q^{2/3}}\right) q^{1/2} [M], \quad (4)$$

где  $H$  — величина забойки,  $m$ ;

$q$  — величина цилиндрического заряда,  $кг/м$ .

Из графика рис. 3 и формулы (4) следует, что при взрыве заряда наружного действия ( $H=0$ ) радиус полости определяется

$$R = 0,40 q^{1/2}. \quad (5)$$

При наличии полного камуфлета радиус полости в данном случае не зависит от глубины и определяется с учетом (2) и (4) по формуле

$$R = 0,59 q^{1/2}. \quad (6)$$

2. С целью исключения влияния энергии электродетонатора на размеры полости были проведены дополнительные эксперименты на тех же площадках.

Два одинаковых заряда из ДШ устанавливались в грунте. Один из зарядов был открытый, а второй проходил через стальную плиту. Схема опытов до и после взрывов приведена на рис. 4.

Стальная плита весом 80 кг использовалась в качестве пригрузки для проведения камуфлетного взрыва. Диаметр отверстия, через которое проходил заряд, составлял 6 мм. Электродетонаторы устанавливались в верхней части зарядов над грунтом и плитой.

После подрыва зарядов производился замер объемов и радиуса образованных полостей путем заполнения их водой. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Средний относительный радиус полости при взрыве цилиндрического заряда под плитой составляет  $\left(\frac{R}{q^{1/2}}\right)_{пл} = 0,54$ , а при открытом взрыве  $\left(\frac{R}{q^{1/2}}\right)_{откр} = 0,40$ .

Сопоставляя эти данные с ранее полученными результатами (5) и (6), обнаруживаем несовпадение в определении максимального радиуса полости, а также отношения радиуса камуфлетной полости к радиусу полости, полученной взрывом заряда наружного действия ( $H=0$ ), не превышающее 9%.

Поскольку полученные результаты вполне удовлетворительны, то не ставилась задача количественного определения степени влияния энергии взрыва электродетонатора на размеры полости в верхней ее части первой серии опытов и влияния выхода продуктов взрыва через отверстие плиты второй серии опытов.

Количество ДШ в заряде	Параметры полости при взрыве с пригрузкой (плита)				Параметры полости при взрыве без пригрузки			
	глубина $H, см$	объем $V, л$	средний радиус $R, см$	относительный средний радиус $R/q^{1/2}, м/кг^{1/2}$	глубина	объем	средний радиус	относительный средний радиус
1	90	12,0	6,52	0,572	90	6,0	4,60	0,403
1	90	11,0	6,24	0,548	90	6,0	4,60	0,403
1	90	10,5	6,09	0,534	92	5,5	4,36	0,382
1	92	10,5	6,03	0,529	90	6,0	4,60	0,403
2	90	23,0	9,02	0,560	90	12,5	6,65	0,414
2	92	20,5	8,43	0,524	90	12,0	6,52	0,405
2	92	20,0	8,32	0,517	92	12,0	6,44	0,400
2	90	22,0	8,82	0,548	90	12,0	6,52	0,405

Анализ результатов опытов показывает, что радиус полости, полученный при камуфлетном взрыве, больше радиуса полости, образованной действием заряда наружного действия ( $H=0$ ), в 1,48 раза, а объем полости больше в 2,2 раза. Эти данные позволяют определять условную величину к. п. д. взрыва.

Следует заметить, что опыты проводились с зарядами длиной 1,5; 0,92 и 0,9 м.

