

## РАСЧЕТ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА ЗАРЯДА НА ВЫБРОС В ГРУНТЕ

АРУТЮНОВ О. А., КАМАЛЯН Р. Э., МААКОВ В. С.

1. *Введение.* Теоретический анализ явлений подземного взрыва наталкивается на ряд существенных трудностей, обусловленных недостаточной изученностью поведения грунтов при интенсивных динамических нагрузках. Это обстоятельство заставляет обращаться к численным методам решения задач подземного взрыва, которые позволяют учитывать довольно широкий круг физических процессов, сопровождающих явление в реальных условиях [1, 2, 3]. Однако, в инженерной практике чаще полезны упрощенные схемы и методы расчетов, основными достоинствами которых являются простота, достаточная для практики надежность результатов, а также отсутствие громоздких расчетов на ЭВМ.

В настоящей работе, которая является продолжением [2], предлагается схема приближенного расчета взрывов на выброс зарядами с осевой и центральной симметрией в сыпучих и слабо связанных грунтах.

2. *Основные закономерности действия заряда выброса.* Детонация заряда переводит химическую энергию ВВ в потенциальную энергию сжатых газов. Под действием давления газов происходит формирование газовой полости, уплотнение и движение грунта. Если энергии газообразных продуктов взрыва, заключенных в полости, достаточно, чтобы преодолеть сопротивление разрушенного грунта и поднять ее в поле силы тяжести на высоту, соизмеримую с глубиной заложения заряда, то происходит выброс и образуется выемка.

С точки зрения механизма передачи энергии взрыва выбрасываемому грунту процесс выброса может быть схематически расчленен на три основные стадии [4, 5, 6]. Первая, камуфлетная, стадия охватывает период от момента детонации заряда до момента встречи волны разгрузки с камуфлетной полостью. Пока волна разгрузки не достигнет поверхности полости, картина движения среды при взрыве на выброс происходит так же, как и при камуфлетном взрыве [4, 5, 6]. За это время значительная часть энергии продуктов взрыва расходуется на пластическое деформирование и нагрев грунта. На второй стадии энергия продуктов взрыва расходуется преимущественно на ускорение движения грунта в направлении к свободной поверхности. При этом определенная доля кинетической энергии расходуется на подъем грунта в поле силы тяжести, преодоление силы трения и сцепления выбрасываемого грунта с окружающим массивом. Третья стадия — это инерциальный разлет грунта в поле тяжести. Дальность раз-

лета грунта определяется запасенной в кусках кинетической энергией. углом вылета и силой сопротивления воздуха.

3. *Постадийное распределение энергии заряда при выбросе грунта.* Так как образование камуфлетной полости на первой стадии происходит за счет уплотнения среды, то энергия, переданная взрывом среде, может быть оценена по работе расширения полости [7]

$$A = k \int_0^{\tau} R^2(t) \cdot v(t) dt$$

Здесь  $R(t) = R_0 + \int_0^t v(t) dt$ ,  $R(t)$  — текущий радиус,  $v$  и  $\tau$  — со-

ответственно скорость движения и радиальное напряжение на границе полости,  $\tau$  — время расширения полости,  $k = 2$  — для заряда с осевой симметрией и  $k = 4$  — для заряда с центральной симметрией.

Для определения энергии, которая тратится на преодоление силы тяжести при взрыве заряда с осевой симметрией на глубине  $h_0$ , воспользуемся следующими предположениями:

1) выемка, образованная взрывом на выброс зарядом с осевой симметрией, имеет сечение треугольной формы;

2) грунт выбрасывается из выемки в радиальном от оси заряда направлении.

Первое предположение основано на практических результатах, получаемых при взрывах на выброс в сыпучих и слабосвязанных мягких грунтах. Второе предположение основано на том, что на фотографиях, полученных при скоростной съемке, движение купола слабо связанного грунта близко к радиальному [8]. В дополнение к этому опыты с разлетом радиоактивных датчиков [9] показывают, что частицы грунта, лежащие до взрыва на одном и том же радиусе, проведенном из центра заряда к дневной поверхности, падают в одно и то же место. Эта важная особенность движения грунта позволяет при расчетах в радиальном направлении воспользоваться понятием центра тяжести элементарных масс.

Рассмотрим призматический элемент массы грунта (фиг. 1), ограниченный радиусами  $r + dr$  и  $r$ . Масса элемента равна

$$dM = \frac{h_0^2}{2} \rho \frac{d\theta}{\cos^2 \theta}$$

Полная масса

$$M = 2 \frac{h_0^2}{2} \rho \int_0^{\theta_0} \frac{d\theta}{\cos^2 \theta} = h_0^2 \rho \operatorname{tg} \theta_0$$

где  $l$  — единичная длина заряда,  $\rho$  — плотность грунта,  $\theta_0$  — угол раскрытия выемки выброса. Элемент массы, ограниченный сечениями  $(h + dh, h)$  равен

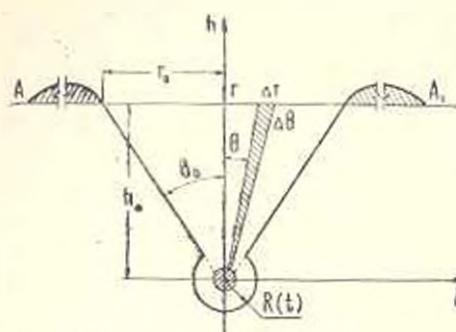
$$dM_h = \rho h l dh \frac{d\theta}{\cos^2 \theta}$$

Тогда необходимая для выноса элемента массы  $dM_h$  на поверхность  $AA_1$ , энергия определится выражением

$$dE_g = g (h_0 - h) dM_h = \rho g l (h_0 - h) h dh \frac{d\theta}{\cos^2 \theta}$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести.

Полная энергия



$$E_g = 2\rho g l \int_0^{\theta_0} \int_0^{\theta_0} (h_0 - h) dh \frac{d\theta}{\cos^2 \theta} = \frac{Mgh_0}{3}$$

В области, ограниченной призмами с основаниями  $(r + dr, r)$

Фиг. 1. Схема к расчету взрыва на выброс.

$$dE_g = \frac{h_0^2}{6} g \rho l \frac{d\theta}{\cos^2 \theta} = \frac{gh_0}{3} dM$$

Энергия, необходимая для преодоления сил трения при выносе элемента массы  $dM$  на дневную поверхность, согласно [10], равна

$$dE_r = \frac{gh_0^2}{3} dM$$

где  $\nu$  — коэффициент трения между частицами грунта. Если считать, что энергия сжатых продуктов взрыва распространяется изотропно, то в область элементарной массы  $dM$ , ограниченной сторонами  $(r + dr, r)$ , поступит энергия

$$dE = \frac{E_*}{2\pi} d\theta$$

где  $E_*$  — полная энергия взрыва.

Полная энергия взрыва определяется через теплоту взрывчатого разложения выражением [11]

$$E_* = A_0 T Q$$

где  $A$  — механический эквивалент теплоты,  $T$  — теплота продуктов взрыва,  $Q$  — масса заряда. Выразим отношение элементарных энергий  $(dE_g + dE_r)$  и  $dE$

$$\frac{dE_g + dE_r}{dE} = \frac{\pi h_0^2 \rho g (1 + \nu)}{3 E_* \cos^2 \theta}$$

Выброс грунта будет осуществлен при условии  $dE \geq (dE_r + dE_s)$ , откуда следует, что

$$\frac{\pi h_0^3 l \rho g (1 + \nu)}{3 \cos^2 \theta} < E_s \quad (3.1)$$

Таким образом, при заданной глубине  $h_0$

$$\cos \theta = \cos \theta_0 \geq \left[ \frac{\pi h_0^3 l \rho g (1 + \nu)}{3 E_s} \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

Наибольшая возможная глубина определится из соотношения (3.2) при  $\theta_s = 0$

$$h_{0m} = \left[ \frac{3 E_s}{\pi l \rho g (1 + \nu)} \right]^{1/3}$$

Аналогично, для заряда с центральной симметрией в предположении, что воронка выброса представляет собой конус с вершиной в центре заряда (фиг. 1), получим

$$\frac{\pi \rho g h_0^4 (1 + \nu)}{3 \cos^3 \theta} \leq E_s \quad (3.1a)$$

$$\cos \theta = \cos \theta_0 \geq \left[ \frac{\pi \rho g h_0^4 (1 + \nu)}{3 E_s} \right]^{1/3}$$

$$h_{0m} = \left[ \frac{3 E_s}{\pi \rho g (1 + \nu)} \right]^{1/4}$$

Предположим аналогично [12, 13], что центры тяжести элементарных масс грунта достаточно быстро набирают скорость, но в процессе ее набора часть скорости теряется на преодоление сил тяжести и трения. Исходя из закона сохранения энергии, можно написать

$$\frac{v_0^2}{2} dM + dE_r + dE_s = dE \quad (3.3)$$

Из (3.3) для заряда с осевой симметрией получим

$$v_0 = \sqrt{2 \left| \frac{dE}{dM} - \frac{dE_r}{dM} - \frac{dE_s}{dM} \right|} = \sqrt{2 \left[ \frac{E_s \cos^2 \theta}{\pi h_0^2 l \rho} - \frac{g h_0}{3} (1 + \nu) \right]}$$

или

$$v_0 = \sqrt{\frac{2}{3} g h_0 \left[ \frac{3 E_s \cos^2 \theta}{\pi h_0^3 l \rho} - (1 + \nu) \right]} \quad (3.4)$$

Выражение (3.4) для случая заряда с центральной симметрией примет вид

$$v_0 = \sqrt{\frac{g h_0}{2} \left[ \frac{3 E_s \cos^3 \theta}{\pi h_0^4 \rho g} - (1 + \nu) \right]}$$

4. *Баллистический разлет и навал грунта.* Инерциальный разлет грунта на третьей стадии с точки зрения механики является наиболее простым. Однако, и здесь при проведении количественных оценок возникают большие трудности [5, 11]. Дело в том, что начальные условия разлета грунта весьма неопределенны. Высота подъема купола и момент времени, соответствующий завершению процесса его разрушения, а также крупность образующихся кусков могут заметно меняться от опыта к опыту. Это приводит к тому, что разлет грунта в значительной степени подвержен случайным влияниям [5, 12].

Горизонтальную дальность полета  $L$  грунта при выполнении условий (3.1) и (3.1а) для крупных взрывов без учета сопротивления воздуха представим в виде

$$L = h_0 \operatorname{tg} \theta + v_0 \sin \theta \{v_0 \cos \theta + \sqrt{(v_0 \cos \theta)^2 - 2g(h_0 - h_a)}\} / g \quad (4.1)$$

где  $h_a$  — центры тяжести элементарных масс грунта, равные соответственно для зарядов с центральной симметрией  $h_0/3$  с осевой симметрией  $2/3 h_0$ . Однако, согласно исследованиям [5, 10, 14] и практическим результатам при относительно мелких взрывах для более или менее точного решения задачи о распределении грунта в навале учет силы сопротивления воздуха становится необходимым. Очевидно, что коэффициент, учитывающий величину уменьшения дальности разлета грунта в воздухе по сравнению с разлетом в пустоте, может быть определен следующим образом:

$$K_a = \frac{L - L_0}{L_0 - L_0} \quad (4.2)$$

где  $L_0 = h_0 \operatorname{tg} \theta$ ,  $L_0$  — максимальная дальность разлета грунта в воздухе. С учетом (4.2) соотношение (4.1) переписывается в виде

$$L_a = L_0 + v_0 \sin \theta \{v_0 \cos \theta + \sqrt{(v_0 \cos \theta)^2 - 2g(h_0 - h_a)}\} / K_a g \quad (4.3)$$

Опыты с радиоактивными индикаторами [5] показывают, что при взрывах на выброс с показателем действия взрыва  $n \geq 1,5$  обратное падение грунта в выемку не наблюдается, а частичное заполнение выемки разрушенным грунтом, очевидно, является результатом обрушения ее бортов.

Выброшенный взрывом грунт распределяется вокруг выемки довольно симметрично, образуя вокруг нее навал. Согласно вышесказанному, высота навала может быть определена из условия сохранения массы

$$\int_0^{h_0} m d\theta = \int_0^L \rho_a h_a dx \quad \left( \frac{\partial L}{\partial \theta} < 0 \right) \quad (4.4)$$

где  $m$  — масса грунта в единице угла,  $\rho_n$  — плотность грунта в навале,  $h_n$  — высота навала,  $x$  — расстояние от эпицентра вдоль дневной поверхности,  $L_+$  — расстояние, на которое падает элемент массы, лежащий в выемке под углом  $\theta_+$ . Если неравенство в (4.4) имеет другой знак, то в одном из интегралов следует поменять пределы интегрирования. Дифференцируя (4.4), получим

$$h_n = -m \left( \rho_n l \frac{\partial L}{\partial \theta} \right) \left( \frac{\partial L}{\partial \theta} < 0 \right)$$

Для заряда с центральной симметрией высота навала определится следующим образом:

$$h_n = -m \left( \rho_n L \frac{\partial L}{\partial \theta} \right) \left( \frac{\partial L}{\partial \theta} < 0 \right)$$

Если величина  $\partial L / \partial \theta$  меняет знак, то на одно и то же расстояние падают два слоя грунта, и полная высота навала будет определяться суммой обоих слоев.

5. *Некоторые результаты расчетов.* Расчеты проведены, в основном, для зарядов с центральной симметрией, так как в этом случае есть возможность сопоставить результаты расчета с имеющимися в литературе обширными экспериментальными данными [4, 5, 8, 9]. Однако, для сравнения, в таблице приведены результаты расчетов максимальных скоростей движения частиц грунта в эпицентре для зарядов обеих симметрий для грунтов с  $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$  и  $\nu = 0.65$ .

Таблица 1

Глубина заложения заряда $h_0$ , м	Масса заряда ВВ		Значение $v_0$ для зарядов с			
			центральной симметрией, м/с		осевой симметрией, м/с	
	$Q_0$ , кг	$Q_0$ , кг/м	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет
7	1000	1000	47,5	53,5	—	164,7

На фиг. 2 показана зависимость максимальной скорости подъема грунта (расчетная и экспериментальная из [8]) в эпицентре от глубины заложения зарядов. Расчет проведен для грунта с  $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$  и  $\nu = 0.65$ . На фиг. 3 показана зависимость (расчетная и экспериментальная из [8]) радиальной скорости подъема свободной поверхности от расстояния до эпицентра при взрыве заряда массой 1000 т на глубине 40 м в грунте с  $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu = 0.65$ . Данные для определения величины энергии  $E_0$  заряда массой 1000 т взяты из [15]. Как видно из зависимостей, приведенных на фиг. 2 и 3, соответствие удовлетворительное.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Черри Дж., Машинный расчет поронок, образующихся при взрыве.— Механика, 1967, № 6 (106), с. 134—156.
2. Гужов Н. А., Коротков П. Ф. Расчет ваврына на выброс в лучевом приближении.— ПМТФ, 1975, № 6, с. 77—86.
3. Броуд Г. Расчет ваврынов на ЭВМ. Подземные ваврыны. М.: Мир, 1975. 162 с.
4. Докучаев М. М., Родионов В. Н., Ромашов А. Н. Ваврын на выброс. М.: Наука, 1963. 105 с.
5. Родионов В. Н., Адушкин В. В., Костюченко В. Н., Николаевский В. И., Ромашов А. Н., Цветков В. М. Механический эффект подземного ваврына. М.: Недра, 1971. 200 с.
6. Ромашов А. Н., Евменов В. Ф. Работа продуктов детонации при ваврыне на выброс.— ФГВ, 1970, № 4, с. 539—545.
7. Белинский Н. В., Христофоров Б. Д. О диссипации энергии при подземном ваврыне. «Взрывное дело» — 76/33. М.: Недра, 1976, с. 179.
8. Белоухов Л. К., Виноградов Б. А. Результаты кинематографических исследований подземных ваврынов.— Сб. докл. СО АН СССР, 1959, вып. 4, с. 3—17.
9. Сахаров В. Н., Колесников-Свинарев В. Н., Каваренко В. А., Забыдаров С. И. Распределение на местности грунта, выбрасываемого при подземных ваврынах — ДАН СССР, 1959, т. 124, № 2, с. 314—317.
10. Пакровский Г. Н., Черниговский А. А. Расчет зарядов при массовых ваврынах на выброс. М.: Гостехиздат, 1963. 87 с.
11. Волченко Н. Г. Оценка полезной затраты энергии ВВ при различных условиях ваврыпания. «Взрывное дело» — 73/30. М.: Недра, 1974. с. 89.
12. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П., Челышев В. П., Шехтер Б. Н. Физика ваврына. М.: Недра, 1975. с. 623—624.
13. Станюкович К. П. Неустановившееся движение сплошной среды. М.: Наука, 1971. с. 824—827.
14. Черниговский А. А. Расчет плоских зарядов для вскрытия подземных ископаемых. М.: Недра, 1965. 96 с.
15. Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. Н. Промышленные ваврычатые цецецтва. М.: Недра, 1973. 319 с.

Трест «Средазмещетрой»

Получивал в редакцию  
16. XII. 1980