

поскольку реальная площадь контакта двух даже полированных поверхностей может на порядки отличаться от их геометрической площади. При этом скорость вещества за фронтом ударной волны 1 км/с вполне может обеспечивать наблюдаемый прирост температуры за счет трения [11]. Этим объясняется, по-видимому, тот факт, что во второй серии экспериментов э. д. с. не изменяется в течение  $\sim 1$  мкс. Действительно, нагретый слой толщиной  $\sim 10$  мк остывает за счет теплоотвода в глубь материала за время  $t \sim \frac{x^2}{a}$ , где  $a$  — температуропроводность материала, при  $a \sim 0,1-1$  см<sup>2</sup>/с  $t \sim 1-10$  мкс.

Отметим, что предположение о превышении температуры на границе раздела, при прохождении ее ударной волной, над температурой ударного сжатия за счет деформации микронеоднородностей высказано также в [12, 13].

Проведенные эксперименты показали, что коэффициент термо-э. д. с. исследованной пары металлов слабо зависит от давления, а величина измеряемых сигналов, по-видимому, соответствует температурам, возникающим на контакте при ударном сжатии. Для измерения температур за фронтом ударных волн необходимо принимать меры по устранению поперечных деформаций образца и созданию качественного контакта. Данная методика может быть применима для измерения температуры при соударении металлов и при ударном нагружении порошков.

*Поступила в редакцию  
12/V 1974*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. Jacquesson. Bull. GAMAC, 1959, 4, 33.
2. В. С. Илюхин, В. Н. Кологривов. ПМТФ, 1962, 5, 176.
3. J. Crosnier, J. Jacquesson, A. Migault. 4-th Symp. on Detonation Proc., US Govt. Print. Off., 1965, p. 627.
4. О. И. Бужинский, С. В. Самылов. ФТГ, 1969, 11, 2881.
5. В. Н. Минеев, А. Г. Иванов и др. ЖЭТФ, 1971, 61, 254.
6. В. Н. Минеев, А. Г. Иванов и др. ЖЭТФ, 1970, 59, 1091.
7. В. Н. Минеев, А. Г. Иванов, Ю. Н. Тюняев. Материалы 3-го Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву, 5-10 июля 1971, «Наука», с. 597.
8. С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, В. В. Полюдов. ФГВ, 1972, 8, 4, 586.
9. R. G. Mc Queen, S. P. Marsh. J. Appl. Phys., 1960, 31, 1253.
10. Методы измерения температуры. Ч. II. (Сб. статей под редакцией В. А. Соколова). М., ИЛ, 1964.
11. Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. Трение и смазка твердых тел. М., «Машиностроение», 1968.
12. P. A. Urtiew, R. Grover. J. Appl. Phys., 1974, 45, 1.
13. R. Grover, P. A. Urtiew. J. Appl. Phys., 1974, 45, 1.

УДК 621.411

### ВЗРЫВНОЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ В ГРУНТЕ

*В. А. Кривцов  
(Киев)*

В работе [1] поэтапно рассмотрена задача образования взрывом сферической полости в грунте без решения вопроса об устойчивости полости после ее формирования. В данной статье рассматриваются критерии устойчивости вертикальной цилиндрической полости, излагается

дальнейшее развитие метода получения безвороночной полости большого диаметра и приводятся результаты экспериментов.

При камуфлетном взрыве цилиндрического заряда, вертикально расположенного в грунте, образуется полость, которая может быть слабо устойчивой (т. е. сохраненной после взрыва) либо не устойчивой, обрушенной. Полость будет устойчивой, если пределы прочности грунта в ее стенках будут больше действующих там напряжений. Следовательно, решение задачи получения полости взрывом сводится к определению полей действующих напряжений вокруг полости и пределов прочностей до и после взрывного деформирования грунта.

Рассмотрим данную задачу при следующих допущениях:

а) после конца формирования полости структурные связи между частицами мгновенно восстанавливаются, и грунт приобретает определенную прочность, которая затем остается постоянной;

б) грунт вокруг образованной полости находится в упругом состоянии.

Первое допущение в реальных условиях не выполняется. Однако эксперименты, результаты которых приведены ниже, показывают, что упрочнение грунта происходит в основном в первые секунды после взрывного уплотнения. В последующее время, в течение нескольких суток (иногда 1÷2 месяца [2]) грунт также упрочняется, однако приращение в этом случае величины упрочнения обычно не превосходит полученную в первые секунды после взрывного формирования полости. Следовательно, в первом приближении данное допущение для некоторых грунтов выполняется.

Второе допущение выполняется, если грунт покоится, т. е. если сформировавшаяся полость временно устойчива.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо экспериментально определить пределы прочности уплотненного взрывом грунта в возможно короткий срок после формирования полости и поля действующих в грунте напряжений при решении задачи в упругой постановке.

Напряженное состояние однородного грунта вокруг камуфлетной вертикальной цилиндрической полости в цилиндрических координатах на глубине  $H$  при наличии остаточного давления в полости определяется по формулам Ляме [3]:

$$\sigma_r = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma(R) H \left( 1 - \frac{R_{\Pi}^2}{R^2} \right) - \Delta p_0 \frac{R_{\Pi}^2}{R^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta} = - \frac{\mu}{1-\mu} \gamma(R) H \left( 1 + \frac{R_{\Pi}^2}{R^2} \right) + \Delta p_0 \frac{R_{\Pi}^2}{R^2}, \quad (2)$$

$$\sigma_z = -\gamma(R) H, \quad (3)$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона грунта;  $\gamma$  — объемный вес грунта, зависящий от расстояния в радиальном направлении;  $R_{\Pi}$  — радиус цилиндрической полости;  $R$  — расстояние от оси полости по нормали до точки, в которой производится определение напряжений;  $\Delta p_0$  — остаточное давление в камуфлетной полости, которое может быть как больше (положительное) так и меньше (отрицательное) атмосферного давления.

Если грунт слоистый, что бывает чаще, то формулы (1)–(3) примут такой вид:

$$\sigma_r = - \frac{\mu}{1-\mu} \left( 1 - \frac{R_{\Pi}^2}{R^2} \right) \sum_{i=0}^n \gamma_i(R) H_i - \Delta p_0 \frac{R_{\Pi}^2}{R^2}, \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta} = - \frac{\mu}{1-\mu} \left( 1 + \frac{R_{\Pi}^2}{R^2} \right) \sum_{i=0}^n \gamma_i(R) H_i + \Delta p_0 \frac{R_{\Pi}^2}{R^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_z = - \sum_{i=0}^n \gamma_i (R) H_i. \quad (6)$$

При  $R \rightarrow \infty$  формулы характеризуют напряженное состояние грунта при отсутствии полости. При  $R = R_n$

$$\sigma_r = -\Delta p_0, \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = - \frac{2\mu}{1-\mu} \sum_{i=0}^n \gamma_i (R) H_i + \Delta p_0, \quad (8)$$

$$\sigma_z = - \sum_{i=0}^n \gamma_i (R) H_i. \quad (9)$$

При открытой вертикальной полости  $\Delta p_0 = 0$  и формулы еще более упрощаются:

$$\sigma_r = 0; \quad \sigma_\theta = - \frac{2\mu}{1-\mu} \sum_{i=0}^n \gamma_i (R) H_i, \quad \sigma_z = - \sum_{i=0}^n \gamma_i (R) H_i. \quad (10)$$

Из формул (10) видно, что наибольшее напряжение развивается на контуре полости в тангенциальном направлении. Следовательно, для получения устойчивой полости необходимо, чтобы предел прочности грунта на двухосное сжатие был бы больше максимального значения напряжения  $(\sigma_\theta)_{\max}$  в тангенциальном направлении.

**Технологическая схема взрывов и расчет параметров.** Одним из основных недостатков получения в грунте цилиндрических полостей взрывом является образование воронки в устьевой части полости, затрудняющей проведение технологической доработки. Для исключения воронкообразования в 1964 г. академиком М. А. Лаврентьевым и В. М. Кузнецовым был предложен специальный метод, который заключается в создании камуфлетной цилиндрической полости с последующим сбрасыванием в нее надполостного целика, предварительно отсеченного взрывами малых цилиндрических зарядов.

В данной статье приводится дальнейшее развитие этого метода с использованием более достоверных формул (1) для определения радиуса полости и зоны пластических деформаций.

Для получения цилиндрической полости заданного диаметра и глубины необходимо установить основной цилиндрический заряд определенной веса и длины на заданной глубине и отсекающие заряды также определенных весов и длин по контуру эпицентра окружности, и после-

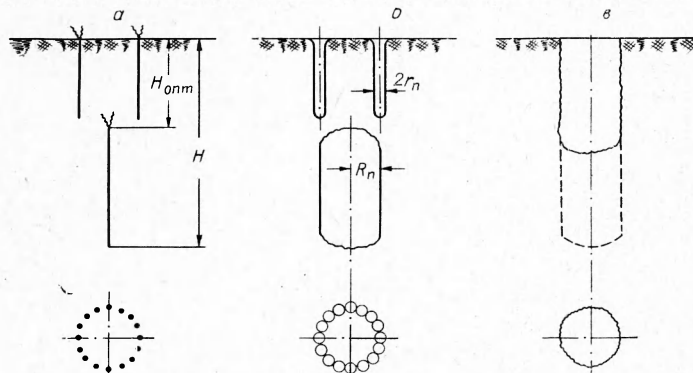


Схема получения вертикальной цилиндрической полости взрывами.

а) расположение зарядов в грунте; б) схема образования полости до опускания целика; в) образованная полость.

довательно произвести взрывы сначала основного, а затем отсекающих зарядов. Полученную полость при необходимости следует закрепить заранее подготовленной крепью. Общая схема получения полости приведена на рисунке.

Величину цилиндрического заряда (в килограммах на единицу длины) для получения камуфлетной полости заданного диаметра целесообразно определять по формулам, которые получены из приближенных, но подтвержденных экспериментами, формул работы [1]. Эти формулы с учетом теории подобия имеют вид: для  $\mu=0,45$

$$q' = \frac{q}{H} = 0,053 R_{\text{п}}^2 \frac{\rho v_p^2}{Q_v} \left( \frac{p_{\text{н}}}{\rho v_p^2} \right)^{0,03} \left( \frac{250 \tau_T}{\rho v_p^2} \right)^{0,77}, \quad (11)$$

для  $\mu=1/3$ ,

$$q' = \frac{q}{H} = 0,068 R_{\text{п}}^2 \frac{\rho v_p^2}{Q_v} \left( \frac{p_{\text{н}}}{\rho v_p^2} \right)^{0,01} \left( \frac{250 \tau_T}{\rho v_p^2} \right)^{0,86}, \quad (12)$$

где  $q$  — общий вес цилиндрического заряда;  $H$  — длина цилиндрического заряда;  $\rho$ ,  $v_p$  — соответственно плотность и скорость звука в грунте;  $Q_v$  — теплота взрыва ВВ;  $p_{\text{н}}$  — начальное давление продуктов взрыва;  $\tau_T$  — предел текучести грунта;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Из условия получения полного камуфлета сделаем допущение, оправданное экспериментом: длина забойки должна быть равна или больше радиуса цилиндрической зоны пластической деформации грунта. Допустим также, что отношение объема области пластических деформаций к объему камуфлетной полости есть величина постоянная для случаев взрыва сферического и цилиндрического зарядов. Тогда, преобразовав формулу работы [1], получим выражение для определения радиуса цилиндрической зоны пластической деформации, а следовательно, и длину забойки

$$H_3 \geq R_{\text{пл}} = R_{\text{п}} \sqrt{\frac{(1-2\mu)(1+\mu)}{3(1-\mu)^2} \frac{\rho v_p^2}{\tau_T}}. \quad (13)$$

Отсекающие цилиндрические заряды должны выбираться из условия их минимальных величин, так как диаметр каждой полости пропорционален корню квадратному из величины заряда. Практически удобным цилиндрическим отсекающим зарядом является детонирующий шнур. В зависимости от условий и трудностей приготовления скважин для отсекающих зарядов, последние могут быть объединены в жгуты из нескольких ниток ДШ. Величину цилиндрического заряда или радиус полости целесообразно определять по формулам (11) и (12). Отсекающие заряды располагаются в скважинах открытым способом, т. е. с выходящими концами на дневную поверхность. Сверху по окружности устанавливается магистральный инициирующий цилиндрический заряд, к которому подсоединяются отсекающие заряды. Располагать заряды по окружности можно так, что образованные полости будут касаться друг друга, или между ними будут иметься перемычки. Во втором случае суммарная площадь перемычек не должна превышать предельную величину  $S_{\text{пр}}$ .

Количество отсекающих зарядов при условии касания полостей  $n = \pi \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{п}}}$ , где  $R_{\text{п}}$  и  $r_{\text{п}}$  — радиусы основной и отсекающей полостей. При наличии перемычек между полостями  $n = \pi \frac{R_{\text{п}}}{r_{\text{п}} + l}$ , где  $l$  — половина толщины перемычки. Величина  $l$  определяется из рисунка и условия

соблюдения неравенства  $G_r \geq \tau_r S_{пр}$ , где  $G_r$  — вес отсекаемого и сбрасываемого в полость грунта:

$$l \leq \frac{R_{пр} r_{пр} \gamma_r \tau_r}{2\tau_m - R_{пр} \gamma}$$

Длины основного и отсекающих цилиндрических зарядов выбираются из требования получения полости заданной глубины.

Полость, получаемая взрывом, будет устойчивой, если пределы прочностей продеформированного взрывом грунта будут больше действующих в нем напряжений

$$[\sigma_{пр}] > \sigma_{r, \theta, z},$$

где  $\sigma_{r, \theta, z}$  — наибольшие действующие напряжения для камуфлетной цилиндрической полости, вычисленные по формулам (4) — (9); для открытой цилиндрической полости — по формулам (10).

**Определение прочности грунта во время его взрывного деформирования и после взрыва.** Эксперименты проводили в полевых условиях в глинистых грунтах методом штампа. На выбранных площадках размером  $4,0 \times 4,0$  м снимали верхний слой грунта толщиной 30—40 см и дно выравняли. С помощью ручного бура делали вертикальные скважины диаметром 20 мм под заряд и штампы. Стальные штампы с различным удельным давлением устанавливали по дугам окружностей на различных расстояниях от заряда. При взрыве цилиндрического заряда (из ДШ, эквивалентного по энергии тротилу весом 1 кг на метр длины), установленного в центральной скважине, грунт частично терял несущую способность и штампы проседали. Закономерности движения штампов при их просадке записывали шлейфными осциллографами с помощью проволочных датчиков, установленных на стержнях штампов. В данных экспериментах считали, что в моменты начала и конца просадки штампа грунт имел величину прочности, пропорциональную соответствующему удельному давлению штампа. Для перевода величин удельного давления, при которых начиналась или заканчивалась просадка штампа, на предел прочности грунта при одноосном его сжатии проводились эксперименты и затем строился график перевода.

Для оценки степени разупрочнения и упрочнения грунта введен коэффициент  $K_r$ , который представляет собой отношение текущего значения критического удельного давления штампа деформирующегося грунта (текущей прочности грунта) к критическому давлению штампа до взрывной деформации грунта (начальной прочности грунта). В таблице приведены  $K_r$  для случая взрыва цилиндрического заряда в суглинке, глине и в песке.

Время, отсчитанное от конца детонации взрыва	$R/R_3$					
	40	60	100	200	300	400
Суглинок $\gamma_{ск} = 1,58 \div 1,63$ г/см <sup>3</sup> , $\omega = 0,12$						
42 мс	0,08	0,10	0,28	0,95	1,0	1,0
1,0 с	0,80	0,70	0,60	0,68	0,90	1,0
1,0 час	1,50	1,2	0,80	0,75	0,90	1,0
Суглинок $\gamma_{ск} = 1,62 \div 1,66$ г/см <sup>3</sup> , $\omega = 0,10$						
37 мс	0,25	0,30	0,45	0,95	1,0	1,0
1 с	0,95	0,85	0,75	0,75	0,80	0,95
1 час	1,67	1,35	0,85	0,80	0,90	0,95
46 мс	0,08	0,13	0,38	0,93	1,0	1,0
1 с	0,97	0,87	0,70	0,68	0,90	0,95
1 час	1,88	1,35	0,74	0,65	0,88	0,95
24 часа	2,08	1,30	0,85	0,80	0,98	1,0
Глина $\gamma_{ск} = 1,84 \div 1,91$ г/см <sup>3</sup> , $\omega = 0,21$						
32 мс	0,30	0,35	0,52	0,85	1,0	1,0
1 с	1,05	0,95	0,85	0,72	0,80	0,90
1 час	1,54	1,30	1,0	0,75	0,85	0,92
24 часа	1,84	1,46	1,13	0,85	0,90	0,98
Лесс $\gamma_{ск} = 1,36 \div 1,41$ г/см <sup>3</sup> , $\omega = 0,16$						
80 с	0,05	0,05	0,06	0,44	0,90	0,1
1 с	0,15	0,15	0,17	0,25	0,55	0,90
1 час	0,28	0,22	0,22	0,30	0,57	0,95
24 часа	0,41	0,33	0,30	0,34	0,62	0,97

Анализ таблицы показывает, что суглинок и глина вблизи полости весьма быстро восстанавливают свою прочность; через одну секунду прочность составляет 0,80—1,05 от начальной прочности грунта. Лесс же через 24 часа не восстанавливает и половину своей первоначальной прочности.

В работе [4] показано, что суглинок при взрывном уплотнении увеличивает предел прочности на одноосное сжатие в 2—2,5 раза, а в работе [5] — в 2,3—2,8 раза. К сожалению, в работах [4, 5] не указано, к какому времени после взрыва относятся приведенные данные.

Поступила в редакцию  
24/V 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Родионов, И. А. Сизов, В. М. Цветков. В сб. «Взрывное дело», 64/21. М., «Недра», 1968.
2. Б. М. Гуменский. Основы физико-химии глинистых грунтов и их использование в строительстве. Л.—М., «Стройиздат», 1965.
3. В. И. Самуль. Основы теории упругости и пластичности. М., «Высшая школа», 1970.
4. Н. А. Евстропов. Взрывные работы в строительстве. М., Изд-во лит. по строительству, 1965.
5. А. А. Вовк, Г. И. Черный, А. Г. Смирнов. Основы взрывной проходки подземных выработок. Киев, «Наукова думка», 1966.

УДК 662.235.5

### К МЕХАНИЗМУ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ С МАЛОЙ СКОРОСТЬЮ В ПОРОШКОВОМ ТЭНЕ ПРИ ИСКРОВОМ ИНИЦИИРОВАНИИ

*В. В. Андреев, Л. А. Лукьянчиков*  
(Новосибирск)

В работе [1] показано, что импульсным искровым разрядом в порошковом тэне малой плотности ( $\rho_0=0,9-1$  г/см<sup>3</sup>,  $\Delta=0,3$  мм, здесь  $\rho_0$  — плотность,  $\Delta$  — средний размер частиц), заключенном в цилиндрическую оболочку из металла или пластмассы, можно возбудить детонацию с малой скоростью (МСД), характеризующуюся незначительным уплотнением вещества и плавным ростом давления во фронте волны. Это отличает его от хорошо исследованного процесса [2, 3], регистрируемого в подобном заряде при инициировании воспламенителем умеренной интенсивности, когда возникновение очагов реакции обусловлено течением вещества в волне сжатия.

Механизм разогрева в первом случае не определен и требует детального изучения. Прежде всего необходимо установить возможность образования очагов реакции в порошковом взрывчатом веществе вследствие механического перемещения. Существенная неоднородность исходного вещества не позволяет проведение теоретической оценки, и единственно возможным методом исследования остается эксперимент. Ниже приводятся результаты исследований применительно к МСД со скоростью распространения не выше 1000 м/с, что охватывает самый важный, с прикладной точки зрения, этап развития явления.