

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА КАМУФЛЕТНЫХ ВЗРЫВОВ

Д. А. Харин, Н. В. Кузьмина, Т. И. Данилова
(Москва)

Для образования полостей и при проходке различных горных выработок в мягких пластичных грунтах широко используется энергия камуфлетных взрывов [1, 2]. Однако сейсмический эффект таких взрывов почти не изучался. Для получения необходимых данных и заполнения существующих пробелов по колебаниям грунта при камуфлетных взрывах в пластичных глинистых грунтах было выполнено несколько серий взрывов.

Разрез участка работ до глубины ~ 50 м представлен четвертичными отложениями — моренными суглинками в пластичном маловлажном состоянии. Ниже залегают меловые отложения — песчаники с прослойками песчаной глины.

Аппаратура. Для регистрации колебаний грунта использовались сейсмоприемники ВБП-3 и ВЭГИК, соединенные через шунтовые коробки ШК-2 с осциллографами ПОБ-12 и Н-700, укомплектованными гальванометрами ГБ-III и ГБ-IV [3—5]. Эта аппаратура дает возможность замерить колебания в широком диапазоне смещений (от $2 \cdot 10^2$ до $2 \cdot 10^{-4}$ мм) в интервале частот от 1 до 100 гц; скорости колебаний, определяемые по углу наклона касательной к записи перемещений, изменяются в пределах от $5 \cdot 10^2$ до 10^{-2} см/сек.

Запуск осциллографов, подвешенных на амортизаторах в специальных металлических клетках, за 1—2 сек до взрыва и сам подрыв выполнялись автоматически. На все осциллографы подавалась единая марка времени. На одном осциллографе отмечался момент взрыва.

Масштабная серия взрывов. Для выявления зависимости колебаний от веса заряда ВВ и расстояния в данных грунтовых условиях была выполнена масштабная серия камуфлетных взрывов зарядов весом 120, 360 и 1000 кг на приведенной глубине $\bar{h} = h/\sqrt[3]{q} = 2,7$ м/кг^{1/3}, которая обеспечивает прочность и устойчивость грунта в эпицентре взрыва.

Сейсмоприемники на площадке располагались вдоль профиля общим протяжением около 1 км с шагом между приборами по профилю в 20 м. В каждой точке устанавливалось по два прибора для одновременной регистрации колебаний грунта по вертикальной z - и горизонтальной радиальной x -составляющей. Ближайшие шесть пар приборов при каждом взрыве переставлялись.

Взрывы проводились в скважинах диаметром 203 мм, обсаженных стальными трубами с цементацией затрубного пространства. Предварительная прострелка скважин производилась зарядами весом от 0,8 до 5 кг. В качестве ВВ использовался аммонит; забойка — грунтовая,

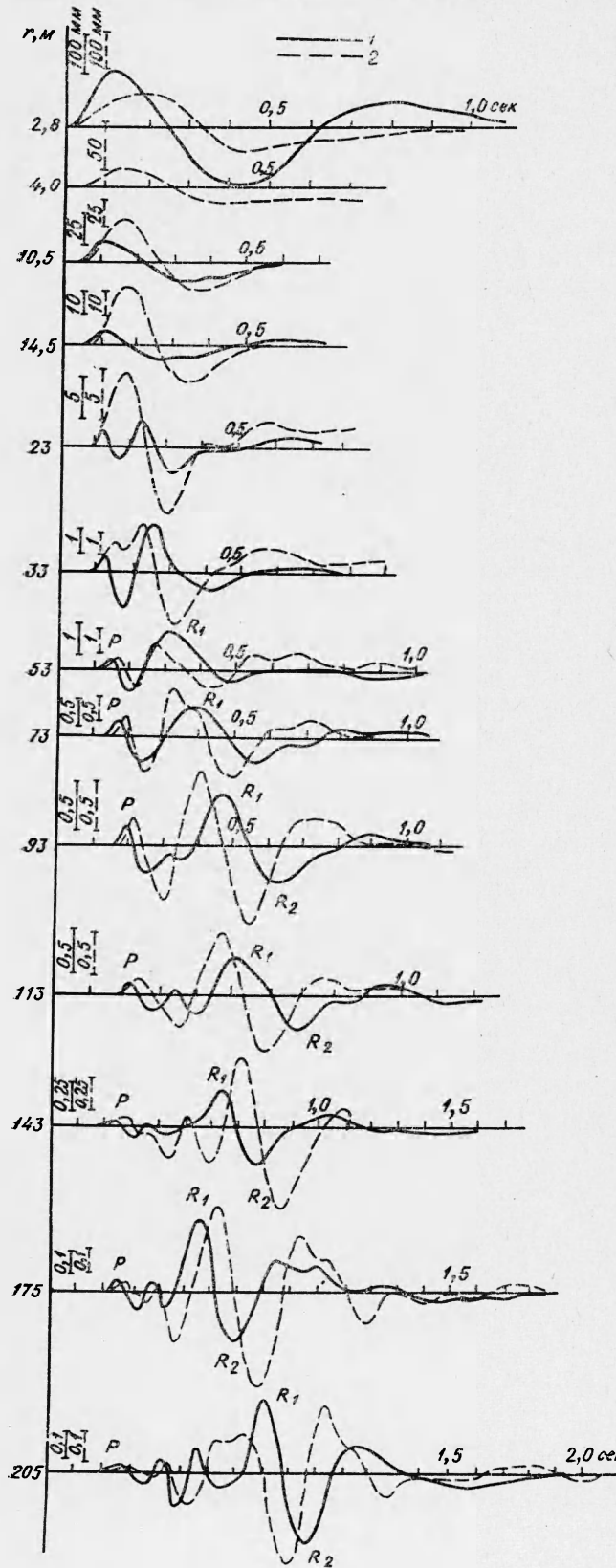


Рис. 1. Колебания грунта на различных расстояниях от взрыва, $q=80$ кг, $h=7,3$ м.

1 — z-составляющая; 2 — x-составляющая.

На рис. 1 приведены записи колебаний грунта на различных эпицентральных расстояниях. Вблизи эпицентра камуфлетного взрыва волновая картина проста по форме и состоит из двух колебаний с периодом 0,5—0,6 сек. С $r=30-40$ м от объемной волны (фаза Р) по вертикальной составляющей отделяется поверхностная волна (фазы R_1 и R_2). Амплитуда объемной волны Р убывает с расстоянием гораздо быстрее, чем в фазах R_1 и R_2 . Поэтому на более удаленных расстояниях колебания, связанные с поверхностной волной, становятся доминирующими на записи.

При всех взрывах вне зависимости от веса и глубины заложения заряда на записях прослеживаются одни и те же группы волн. Это дало возможность построить сводный годограф первых вступлений и характерных фаз.

По углу наклона первой ветви годографа определено, что до $r=100$ м объемная продольная волна (Р) распространяется с кажущейся скоростью ~ 1000 м/сек. На больших расстояниях в первые вступления выходит головная волна со скоростью 1700—1800 м/сек. На расстоянии ~ 650 м кажущаяся скорость распространения продольной волны составляет 4700 м/сек. Второй группе фаз R_1 и R_2 соответствуют скорости 340—350 м/сек.

На рис. 2 в двойном логарифмическом масштабе приведены зависимости амплитуд максимальных колебательных скоростей в объемной и поверхностной волнах от приведенного гипоцентрального расстояния.

Закон изменения скорости колебаний частиц грунта в объемной волне меняется с расстоянием. Однако для практических целей можно принять во всем диапазоне приведенных расстояний $2 < r_{гип} < 100$ зависимость вида:

$$\vec{u}_p = 1400 \left(\frac{q^{1/3}}{r_{гип}} \right)^{2,2}, \text{ см/сек.} \quad (1)$$

Амплитуда скорости в объемной волне определялась как для вектора по формуле:

$$\vec{u}_p = \sqrt{(u_p^z)^2 + (u_p^x)^2}.$$

Такое представление вполне законно, если составляющие скорости по вертикальной и горизонтальной радиальной компонентам измерены в один и тот же момент времени.

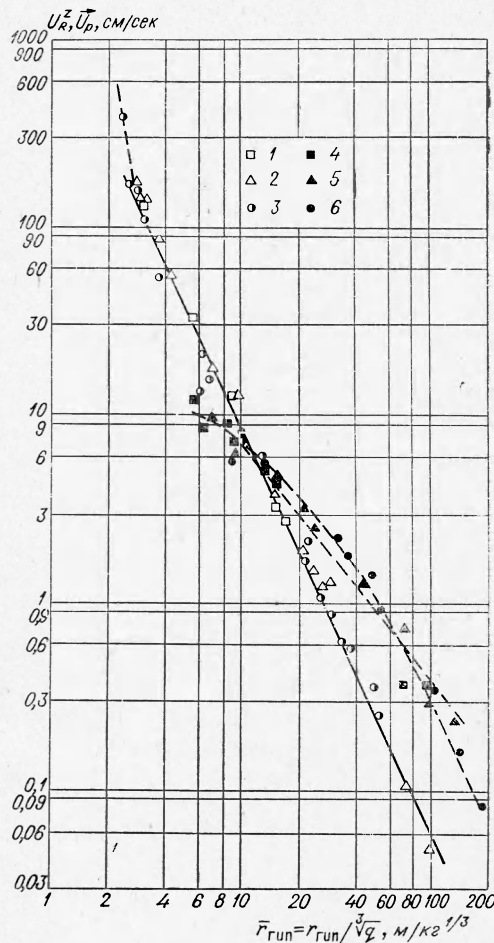


Рис. 2: Зависимость максимальных колебательных скоростей от приведенного гипоцентрального расстояния. Вес заряда: 963 кг (1, 4), 336 кг (2, 5), 122,5 кг (3, 6).

1, 2, 3 — величины скоростей в объемной волне; 4, 5, 6 — величины скоростей в поверхностной волне.

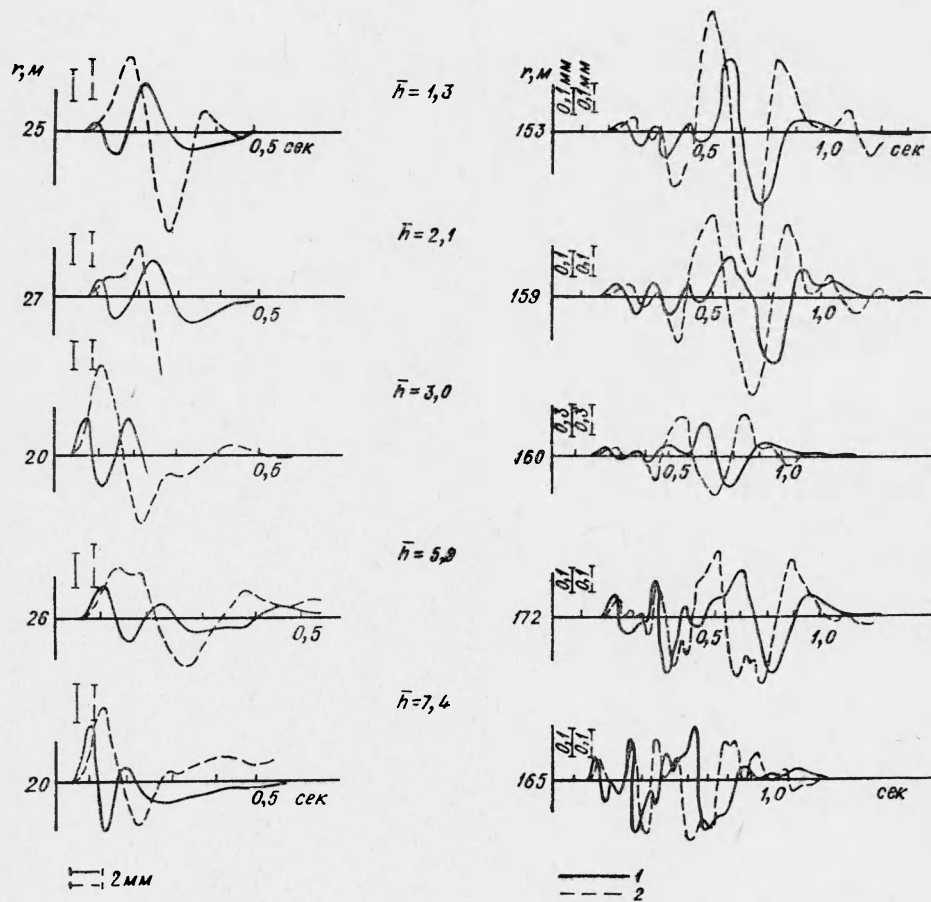


Рис. 3. Колебания грунта на эпицентральных расстояниях 25 и 160 м для взрывов заряда ВВ весом 40 кг на различных глубинах.
1 — z-составляющая; 2 — x-составляющая.

Скорости в поверхностной волне типа Релея вычислять по геометрической сумме нельзя, так как сдвиг фаз в ней между горизонтальной и вертикальной составляющими составляет 90° . Зависимость вертикальной составляющей скорости u_R^z в поверхностной волне от приведенного расстояния имеет криволинейный характер. Скорости u_R^z убывают с расстоянием сначала медленно, а затем быстрее. Однако в интервале приведенных расстояний $15 < \bar{r} < 100$, представляющем практический интерес (в этом интервале скорости в поверхностной волне превышают колебательные скорости в объемной волне), можно использовать для инженерных расчетов приближенную зависимость вида:

$$u_R^z = 100 \left(\frac{q^{1/3}}{r_{\text{эп}}} \right)^{1,30}, \text{ см/сек} \quad (2)$$

Изменения амплитуды смещения в объемной волне для $\bar{r} > 8$ выражаются формулой

$$a_p^z = 330 \left(\frac{q^{1/3}}{r_{\text{гип}}} \right)^{2,2}, \text{ мм.}$$

На более близких расстояниях ($\bar{r} \leq 6-8$) убывание амплитуды происходит значительно быстрее по закону:

$$a_p^z = 6800 \left(\frac{q^{1/3}}{r_{гип}} \right)^4$$

Наличие вблизи эпицентра взрыва особой по свойствам зоны подтверждается поведением времен нарастания перемещений до максимума в объемной волне. Вблизи от эпицентра эти времена систематически уменьшаются с увеличением расстояния до $\bar{r} \approx 7-8$, на больших же расстояниях они остаются постоянными ($\tau_p^z = 0,016 q^{1/6}$, $\tau_p^x = 0,026 q^{1/6}$). В поверхностной волне периоды увеличиваются с расстоянием как $r^{0,1}$ и от заряда как $q^{1/6}$.

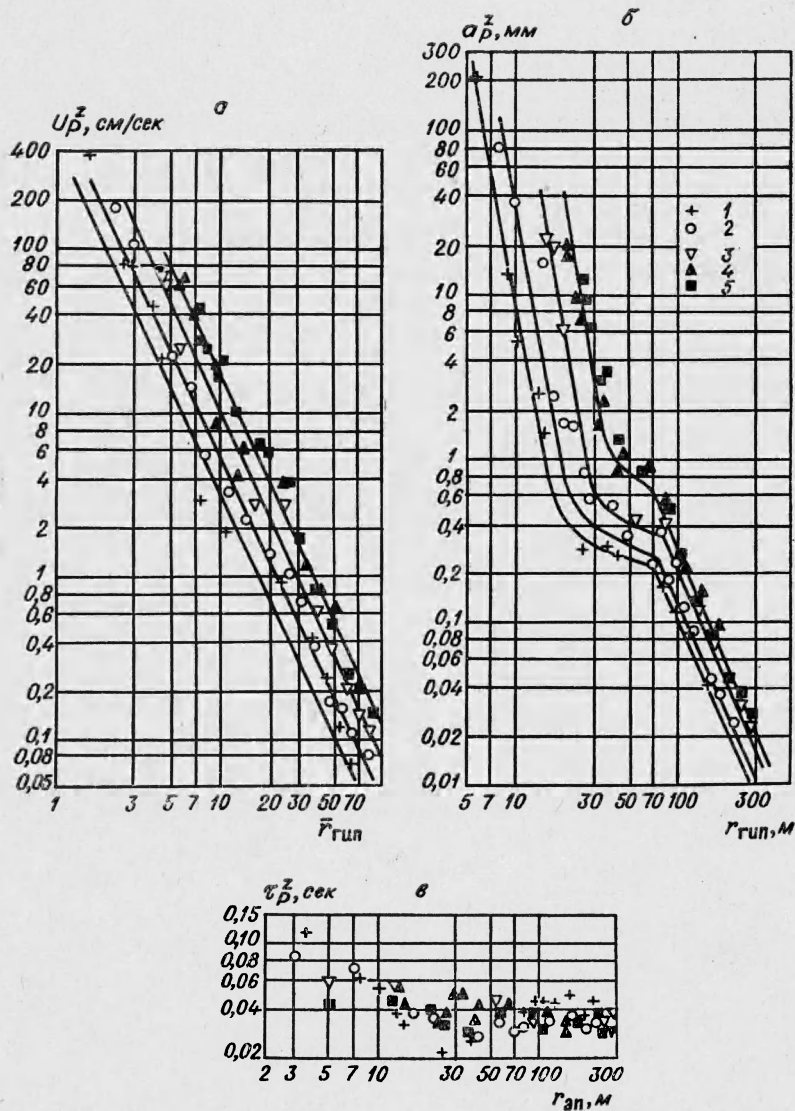


Рис. 4. Зависимости амплитуд максимальных скоростей (а), перемещений (б) и времени нарастания первой амплитуды до максимума (в) в объемной волне от глубины взрыва и расстояния.

Глубина взрыва ($\text{м/кг}^{1/3}$): 1 — 1,3; 2 — 2,1; 3 — 4,5; 4 — 5,9; 5 — 4,7.

Серия взрывов по глубине. С целью уточнения зависимости колебаний грунта от глубины заложения заряда были проведены три серии опытов с зарядами 40, 80 и 120 кг ($\bar{h} = 1,05 \div 7,4$).

На рис. 3 приведены записи колебаний грунта для взрывов на различных глубинах. В объемной волне имеет место монотонное увеличение амплитуды смещений с ростом глубины заложения заряда. В поверхностной волне это увеличение происходит лишь до $\bar{h} \approx 3$, с дальнейшим ростом глубины заложения заряда амплитуда смещений уменьшается. Для поверхностной волны не выдерживается постоянным соотношение между амплитудами первой (R_1) и второй (R_2) фаз.

На рис. 4 построены зависимости параметров u_p^z , a_p^z , τ_p^z от приведенного расстояния и глубины для взрывов зарядов весом 40 кг. Несмотря на значительный разброс экспериментальных точек, на графиках отчетливо видно, что как скорости, так и перемещения с увеличением глубины заложения заряда возрастают.

Для эпицентрального расстояния 160 м построены зависимости амплитуд колебательной скорости и смещения в объемной и поверхностных волнах от приведенной глубины заложения заряда (рис. 5). На графиках видно, что в поверхностной волне, в отличие от объемной, некоторый рост амплитуды смещений происходит до приведенной глубины $\bar{h} \approx 3$, а колебательной скорости — до $\bar{h} \approx 4,5 \div 5,0$. При дальнейшем увеличении глубины заложения заряда наблюдается снижение колебаний.

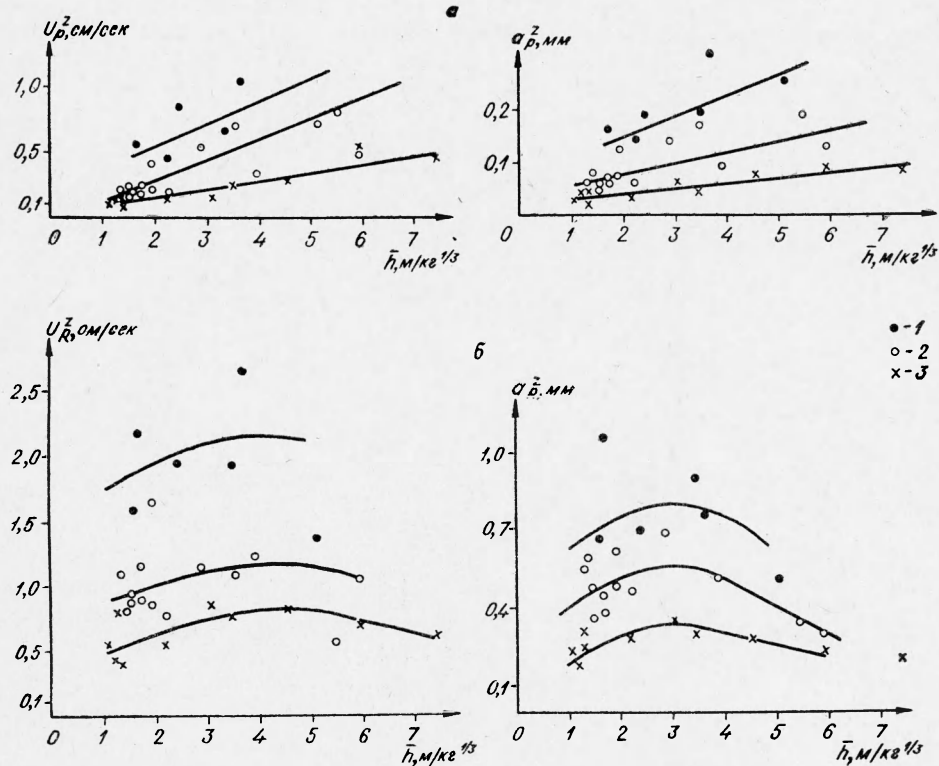


Рис. 5. Зависимости амплитуд максимальных скоростей и перемещений в объемной (а) и поверхностной (б) волне на эпицентральном расстоянии 60 м от приведенной глубины заложения заряда весом 120 кг (1), 80 (2) и 40 кг (3).

Формулы (1) и (2) для масштабной серии взрывов были получены при постоянном значении приведенной глубины $\bar{h}=2,7$, поэтому являлись лишь частным решением поставленной задачи.

Серии взрывов постоянного веса заряда на различных глубинах позволили получить обобщенные зависимости, отражающие влияние веса, глубины заложения заряда и расстояния на сейсмический эффект.

$$\bar{u}_p = 500 \bar{h} \left(\frac{q^{1/3}}{r_{\text{гип}}} \right)^{2,2} \text{ для } 2 < \bar{r}_{\text{гип}} < 40. \quad (3)$$

Для поверхностной волны в интервале $5 < \bar{r}_{\text{эп}} < 60$ и $1 < \bar{h} \leq 5$

$$u_R^z = 100 \left(\frac{q^{1/3}}{r_{\text{эп}}} \right)^{1,30}, \quad (4)$$

а для $\bar{h} > 5$ принято уменьшение скоростей в 2 раза, т. е.

$$u_R^z = 50 \left(\frac{q^{1/3}}{r_{\text{эп}}} \right)^{1,30}, \text{ см/сек.} \quad (4')$$

Коэффициенты в формулах (1) и (3) получены методом наименьших квадратов с ошибкой $\pm 10\%$.

Изменение параметров колебаний грунта с увеличением глубины. При расчете подземных инженерных сооружений на воздействие сейсмических нагрузок важно знать изменение параметров волн с глубиной. Для этой цели на площадке работ была пройдена шахта диаметром 1 м и глубиной 25 м. Ствол шахты был обсажен стальными кольцами, а на отметках 5, 10, 15, 20, 25 м от поверхности, одна под другой, были сделаны ниши глубиной 80 см для установки приборов.

При масштабной серии расстояния от шахты до взрывов варьировали в пределах 320—380 м. В каждой нише было установлено три сейсмоприемника ВЭГИК, ориентированных для записи x -, z -, y -составляющих. При сериях взрывов по глубине расстояния от шахты до взрывов изменялись от 10 до 50 м, изменялись и их азимуты. Приборы в шахте для записи горизонтальных колебаний перед каждым взрывом не переставлялись и были установлены в двух взаимоперпендикулярных направлениях x_1 и x_2 .

При взрыве на эпицентральных расстояниях ~ 350 м сейсмоприемники в основном регистрировали колебания в поверхностной волне. Амплитуды колебаний по вертикальной составляющей с глубиной изменяются слабо, по горизонтальной же составляющей на глубине 25 м они уменьшаются в 5—7 раз по сравнению с амплитудами на поверхности. На расстояниях порядка 40—50 м амплитуды объемных волн были всего в 1,5—2,5 раза меньше, чем у поверхностных.

На рис. 6 а, б, в показано изменение с глубиной отношений амплитуд скоростей и смещений в продольной волне по вертикальной составляющей. Увеличение амплитуды в 2 раза, вызванное отражением волны от свободной поверхности, происходит выше отметки 5 м. Ниже этой отметки перемещения убывают слабо. Отмечена зависимость убывания значений u_R^z и a_R^z от глубины взрыва — чем глубже взрыв, тем слабее затухает с глубиной амплитуда волны Р. Амплитуда поверхностной волны по составляющей z несколько возрастают на глубине 5 м, ниже они уменьшаются в 1,2 раза; по составляющей x убывают с глубиной так же быстро, как и на более удаленных расстояниях.

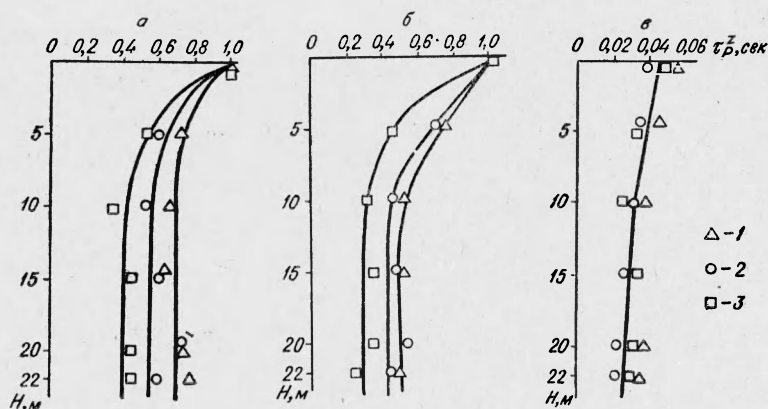


Рис. 6. Изменение соотношений $\frac{u_P^z(H)}{u_P^z(O)}$ (а), $\frac{a_P^z(H)}{a_P^z(O)}$ (б) и времени на-

растания амплитуды перемещения в волне Р до максимума τ_P^z (в) с глубиной установки прибора в шахте на расстоянии $r \sim 44$ м, $q = 80$ кг.

1 — $\bar{h} = 5,45$; 2 — $\bar{h} = 3,88$, 3 — $\bar{h} = 1,9$. H — глубина прибора в шахте.

Колебания в ближней зоне взрыва. На малых приведенных эпикентральных расстояниях до $r \approx 7$ (25 ÷ 30 м при взрывах 80 кг) движение грунта на дневной поверхности и в шахте изменяется по форме, спектру и по величинам амплитуд перемещений и скоростей. Проявляется асимметрия в действии камуфлетного взрыва вверх и в стороны от заряда, вызванная влиянием дневной поверхности.

На рис. 7, а показаны перемещения грунта по вертикальной и горизонтальным составляющим на разных отметках. Поскольку взрыв был произведен в 10,7 м от шахты в направлении x_1 , колебания по составляющей x_2 малы. На дневной поверхности по обоим составляющим движение грунта состоит из двух колебаний, близких по форме к синусоиде, продолжительностью 0,5—0,6 сек. Амплитуда перемещений ~ 25 мм по z и ~ 40 мм по x .

В грунте (отметки 10 м и ниже) движение по составляющим z и x различно. На записях z выделяются две группы колебаний. Первая группа высокочастотная, она регистрируется с малыми амплитудами в области первых вступлений и интерпретируется как волна сжатия. Скорость ее распространения ~ 500 м/сек. За этой волной следует низкочастотное движение колебательного характера, схожее по форме и продолжительности с описанным выше движением на дневной поверхности, но с значительно меньшими, чем на поверхности, амплитудами, не превышающими 1,5—3 мм. В происхождении этой группы колебаний, вероятно, главную роль играет отражение низкочастотной волны от свободной поверхности.

На горизонтальной радиальной составляющей x_1 группа высокочастотных колебаний выражена слабее, так как на нее накладывается низкочастотное движение с большой амплитудой перемещения. Низкочастотное колебание с убывающей с глубиной продолжительностью первого полупериода, асимметрично. Движение от взрыва по амплитуде (25 ÷ 30 мм) во много раз больше, чем возвратное — к взрыву (2 ÷ 6 мм). Это свидетельствует о неупругом характере движения и о вероятных остаточных деформациях грунта, которые не могут быть записаны сейсмическими приборами. Максимальные напряжения сжатия на глубинах

10 и 15 м в горизонтальном радиальном направлении, оцененные по колебательным скоростям, достигали 12—15 $\text{кг}/\text{см}^2$. Скорость распространения максимума в этой волне не превышает $\sim 250 \text{ м}/\text{сек}$. Все эти признаки, взятые вместе, позволяют интерпретировать низкочастотное движение грунта как пластическую волну.

Еще нагляднее особенности движения грунта в ближней зоне камуфлетного взрыва и асимметрия его действия вверх и в стороны от заряда видны на рис. 8. На этом рисунке в одинаковом горизонтальном и вертикальном масштабе показаны места взрыва в скважине и точки

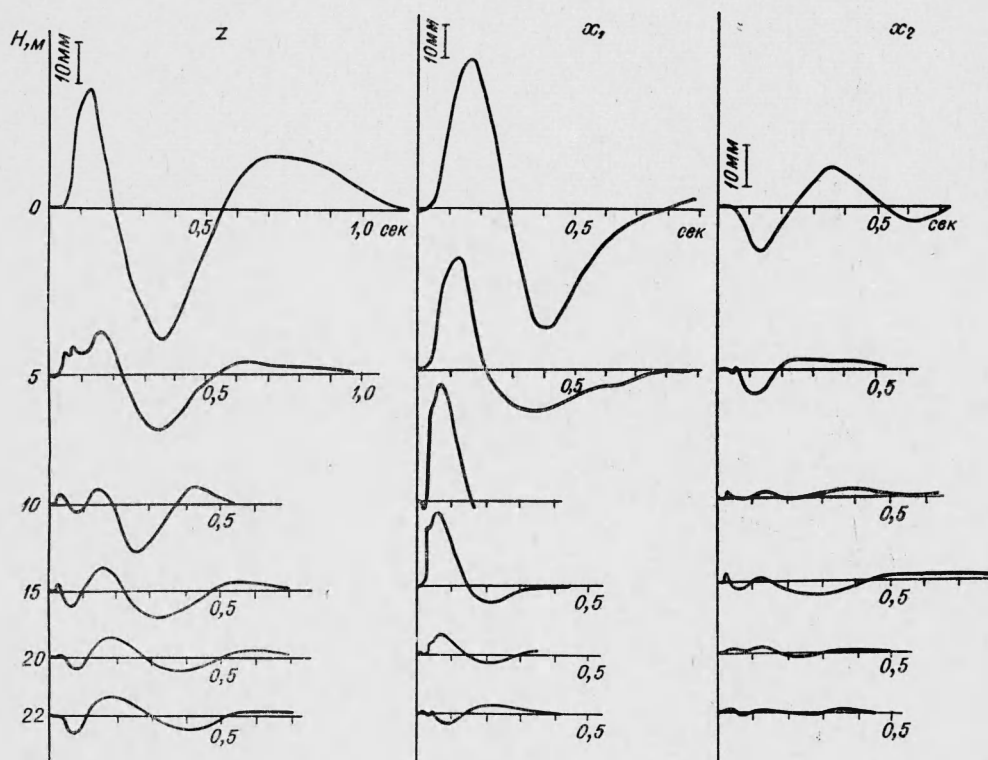


Рис. 7. Записи колебаний грунта в шахте на разных отметках. $q=80 \text{ кг}$, $r_{\text{эп}} = 10,7 \text{ м}$, $h=9,4 \text{ м}$. $\bar{h} = 2,2$.

наблюдения на поверхности вдоль профиля и в шахте на разных отметках. В другом, но также одинаковом для вертикальной и горизонтальной составляющих, масштабе нанесены траектории движения части грунта в плоскости zx , построенные по записям приборов, установленных в различных точках. По этим траекториям можно также проследить за движением грунта во времени и за его деформациями. Для этой цели точки на различных траекториях, соответствующие одним и тем же отрезкам времени от момента взрыва (0,050; 0,1; 0,20 сек), соединены между собой пунктирными линиями. На рисунке отчетливо проявляется направленность и асимметрия движения. Линии, проведенные штрих-пунктиром по радиусам от взрыва к приборам, хорошо согласуются с осями наибольших перемещений грунта. По различным направлениям преобладают различные составляющие движения. Так, например, по горизонтальному направлению на отметке 10 м, где расположены очаг взрыва и сейсмо-

приемник в шахте, вертикальное перемещение не превышает 1—2 мм, в то время как горизонтальное перемещение достигает 30 мм. Наоборот, в вертикальном направлении от взрыва на поверхности в 0,5 м от эпицентра перемещение грунта превысило 140 мм при значительно меньшем горизонтальном. Колебательные скорости в эпицентре достигли

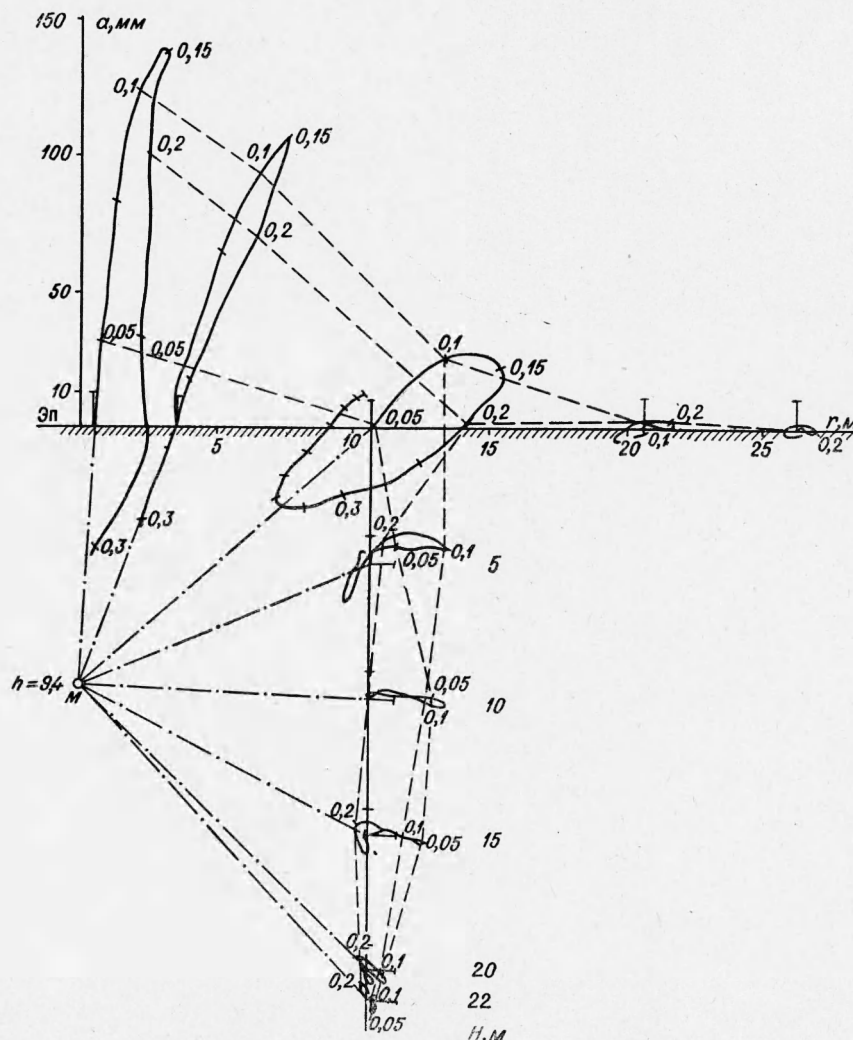


Рис. 8. Траектории движения частиц грунта в ближней зоне взрыва, $q=80$ кг, $r_{\text{эп}}=10,7$ м, $h=9,4$ м, $h=2,2$.

значений 200 см/сек. На поверхности, по мере удаления от эпицентра наряду с общим быстрым уменьшением амплитуд в движении начинает преобладать горизонтальная составляющая.

Асимметрия движения проявляется не только в пространстве, но и во времени. Внутри грунта описанное выше пластическое движение по направлению от взрыва заканчивается приблизительно через 0,075 сек, после чего начинается возвратное движение. Подъем же поверхности продолжается значительно дольше, вплоть до 0,15 сек. После этого происходит возвратное движение грунта вниз, поэтому изохроны, первона-

чально близкие к сферическим (до 0,05 сек), вытягиваются вверх. Весь процесс подъема и опускания грунта длится около 0,25 сек.

Различие в направлениях и в величинах амплитуд перемещений и скоростей различных точек грунта неизбежно должно приводить к возникновению наряду с напряжениями сжатия и вызываемыми ими уплотнениями грунта растягивающих напряжений. Последние влекут за собой в такой слабой среде, как суглинка, потерю сцепления между частицами грунта и появление трещин. Особо сильные растягивающие напряжения и трещины возникают по направлению к поверхности. Действительно, на поверхности грунта после взрыва, несмотря на его значительную приведенную глубину, были обнаружены радиальные трещины до расстояний порядка 4 м.

Наличие вблизи от очага подземного взрыва (на выброс [6], на рыхление и камуфлетного) в пластичных глинистых грунтах особой по механическим свойствам зоны подтверждается различными методами.

Сейсмические признаки ближней зоны:

1. Записи перемещений грунта на поверхности в этой зоне очень просты по форме. Грунт движется сначала вверх и от взрыва, а затем вниз и к центру взрыва. Разделение записи на объемную и поверхностную волны нет. Амплитуды перемещений достигают значений 200—300 мм за время, равное 0,06—0,1 сек и более.

2. Колебательные скорости достигают максимальных значений 300—500 см/сек за время на порядок меньше времени перемещения частиц до максимальной величины.

3. Перемещения грунта в волне сжатия убывают с расстоянием по закону r^{-4} , колебательные скорости как r^{-3} . Следовательно, в этой зоне происходит весьма интенсивная диссипация энергии движения.

4. Время нарастания перемещений до максимума убывает с расстоянием по закону r^{-1} .

5. Колебательные скорости и перемещения частиц в этой зоне подчиняются разным законам моделирования. Главную роль в перемещениях частиц играет сила тяжести [7].

6. При наблюдениях внутри среды (в шахте) выделяется пластическая волна сжатия, вызывающая остаточные деформации грунта.

7. На траекториях движения грунта обнаруживается направленность излучения источника.

8. Относительные деформации, оцененные по сейсмическим записям, достигают значений 10^{-2} — 10^{-4} , а радиальные напряжения — значений 15 кг/см² и более.

Киносъёмкой камуфлетных взрывов в эпицентральной области обнаружено куполообразное поднятие грунта с образованием в нем остаточных деформаций тем больших, чем меньше приведенная глубина взрыва. В эпицентральной области, даже при относительно больших значениях приведенной глубины, проявляются трещины.

Радиус ближней зоны взрыва r_n , в которой имеют место пластические или упруго-пластические деформации грунта, относительно невелик и равен $6 \div 8 \sqrt[3]{q}$. На границе этой зоны получено значение скорости частиц порядка 10 см/сек.

Расчет сейсмобезопасных расстояний. «Единые правила безопасности при взрывных работах» [8] рекомендуют проводить расчет сейсмобезопасных расстояний по формуле $r_c = k_c \alpha \sqrt[3]{q}$, где k_c — характеризует свойства грунта; α — влияние глубины заложения заряда. Особенности внутренних камуфлетных взрывов и специфика охраняемых объектов не дают возможности полностью использовать эту формулу

В ней не делается различий в коэффициентах для различных типов волн, в то время как на близких расстояниях, которые могут иметь место в практике, максимум колебательной энергии переносится объемными волнами, а на $\bar{r} > 20$ — поверхностными типа Релея. Законы затухания колебаний в объемных и поверхностных волнах с расстоянием и глубиной различны.

Для всех типов зданий и сооружений принимается значение $u_{кр} = 12 - 14$ см/сек.

Коэффициент α для всех камуфлетных взрывов $f(n) \leq 0,5$ принимается постоянным и равным 1 и 2, т. е. не учитывается факт роста колебаний грунта при дальнейшем увеличении глубины заложения заряда.

Исходя из полученных экспериментальных данных (формулы (3), (4) и (4')), для глинистых грунтов подобного строения, сейсмобезопасные расстояния при взрывах сосредоточенных зарядов до приведенных расстояний $\bar{r} \leq 15$ рекомендуется рассчитывать по формуле для объемной волны

$$r_c = 16 \sqrt{\frac{\bar{h}}{u_{кр}}} \sqrt[3]{q}, \text{ м} \quad (5)$$

Для приведенных расстояний $\bar{r} > 15$ и при приведенных глубинах $\bar{h} \leq 5$ расчет сейсмобезопасных расстояний должен вестись по поверхностной волне:

$$r_c = 30 \sqrt[3]{\frac{q}{u_{кр}^2}}. \quad (6)$$

Для $\bar{r} > 15$ и $\bar{h} > 5$

$$r_c = 16 \sqrt[3]{\frac{q}{u_{кр}^2}}. \quad (6')$$

Численные значения $u_{кр}$ в формулах (5), (6), (6') принимаются различными для сооружений разного типа.

Сейсмобезопасные расстояния, рассчитанные по этим формулам, оказались в 1,5—2 раза меньше полученных согласно «Единым правилам безопасности при взрывных работах» (прилож. 10, а).

Для сохранения устойчивости подземных полостей, сооружаемых взрывным способом, принято $u_{кр} = 10$ см/сек, что соответствует значению колебательной скорости внутри среды на границе пластической зоны. Для подземных сооружений, вероятно, следует принять большее значение критической скорости. Опыт показал, что шахта, обсаженная стальными кольцами, хорошо выдерживала сейсмическое воздействие при скоростях частиц, достигающих 200 см/сек.

Глубина заложения заряда, м	Приведенная глубина заложения заряда, м/кг ^{1/3}	Расстояние от взрыва до полости, мм
7,0	1,5	19
9,3	2,0	22
14,0	3,0	25
18,6	4,0	28
30,2	6,5	30

В таблице дан пример расчета сейсмобезопасных расстояний при сооружении подземных полостей для заряда $q = 100$ кг, взрывающегося на различных глубинах. Для

этого в формулу (5) подставляется значение скорости $u_{\text{пов}} = 2$, $u_{\text{кр}} = 20$ см/сек и вычисляется гипоцентральное расстояние, которое затем с учетом глубины заложения заряда пересчитывается в эпицентральное.

С ростом глубины заложения заряда необходимо увеличивать расстояния между взрывом и полостью.

ВЫВОДЫ

1. В широком интервале приведенных расстояний прослежено влияние приведенной глубины заряда на интенсивность сейсмических волн. Обнаружено различие влияния глубины на продольные и поверхностные волны. Предложены новые, уточненные формулы для расчета сейсмобезопасных расстояний при камуфлетных взрывах.

2. По наблюдениям на поверхности и внутри среды в ближней зоне подземного взрыва околнурена область неупругих деформаций и выявлена асимметрия в движении грунта в различных направлениях от источника. Эта асимметрия является одной из причин возникновения в грунте растягивающих напряжений и трещин.

*Поступила в редакцию
23/II 1966*

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. К. Акутин. Исследование параметров взрыва при образовании полостей в грунтах. Автореф. докт. дисс. Киевский политехн. ин-т, 1964.
2. В. Н. Родионов, А. Н. Ромашов, А. П. Сухотин. Сб. «Народнохозяйственное использование взрыва», Новосибирск, вып. 2, 1959.
3. Б. Г. Рулев, Д. А. Харин. Тр. ИФЗ АН СССР, вып. 4, № 16 (183), 1961.
4. Д. П. Киринос, Б. Г. Рулев, Д. А. Харин. Тр. ИФЗ АН СССР, вып. 4, № 16 (183), 1961.
5. Е. С. Борисевич. Вест. АН СССР, 1954, 5.
6. Н. В. Кузьмина, А. Н. Ромашов, Б. Г. Рулев и др. Тр. ИФЗ АН СССР, вып. 6, № 21 (188), 1962.
7. Б. Г. Рулев. ПМТФ, 1963, 3.
8. «Единые правила безопасности при взрывных работах». М., Металлургиздат, 1962.