

УДК 622.235.535.2

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА РАССРЕДОТОЧЕННОГО ЗАРЯДА

А. А. ВОВК, А. А. КУЗЬМЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 15.08.2000

Приведены результаты экспериментальных исследований интенсивности колебаний грунта в поверхностной волне при одновременном взрыве рассредоточенных зарядов в различных грунтах и разработана методика ее определения. Получена зависимость эффективной массы единичного заряда от условий взрыва рассредоточенного заряда. Показана практическая целесообразность расчета массовой скорости грунта с использованием эффективной массы единичного заряда, а не общей массы рассредоточенного заряда.

Приведені результати експериментальних досліджень інтенсивності коливань ґрунту у поверхневій хвилі при одночасному вибуху розосереджених зарядів у різних ґрунтових умовах і розроблена методика її визначення. Одержана залежність ефективної маси одиничного заряду від умов вибуху розосередженого заряду. Показана практична доцільність розрахунку масової швидкості ґрунту з використанням ефективної маси одиничного заряду, а не загальної маси розосередженого заряду.

The results of experimental researches of intensity of ground fluctuations in a superficial wave at the simultaneous explosion of the dispersed charges in various grounds are given and its determination technique is developed. The dependence of an individual charge effective weight on the conditions of the dispersed charge explosion is obtained. There is shown the practical expediency of the calculation of a ground mass velocity with use of the effective weight of an individual charge, instead of the total weight of the dispersed charge.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности взрывных работ в горном деле и строительстве в значительной мере зависит от точного прогнозирования интенсивности сейсмозрывного воздействия на окружающую среду, в том числе и на расположенные в зоне распространения сейсмических волн здания и сооружения.

В производственных условиях обычно используют рассредоточенные заряды, подрыв которых осуществляют как одновременно, так и группами с определенными интервалами (короткозамедленное взрывание), а параметры сейсмических волн при этих взрывах рассчитывают по формулам, полученным для сосредоточенного заряда. Так, основной критерий сейсмоопасности – скорость смещения грунта – рассчитывают по формуле М.А.Садовского [1]

$$u = k \left(\frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-n}, \quad (1)$$

где Q – общая масса рассредоточенного заряда; r – расстояние от заряда до точки наблюдения.

Однако уже при первоначальном сравнении интенсивности колебаний грунта при взрывах рассредоточенных и сосредоточенных зарядов равной массы было отмечено, что в первом случае указанный показатель был выше, чем во втором. Аналогичные утверждения имеются также

у других пока что не многочисленных исследователей [2].

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Для удобства изложения материала явление увеличения скорости смещения грунта при взрыве рассредоточенного заряда по сравнению со взрывом сосредоточенного равной массы назовем эффектом рассредоточенного заряда. Здесь, как и в дальнейшем, подразумевается одновременное взрывание рассредоточенного заряда, что может быть практически обеспечено детонирующим шнуром, проложенным вдоль линии скважин, так как время прохождения детонационной волны по шнуру между скважинами в скальных грунтах в 3–4 раза меньше, чем время распространения поверхностной волны, а в мягких грунтах этот показатель увеличивается в 4–5 раз. Это если говорить о первых двух зарядах, но в ряду зарядов первый взаимодействует и с n -ым зарядом.

Для изучения сейсмического эффекта взрывов рассредоточенных зарядов были проведены специальные экспериментальные исследования, проанализированы результаты некоторых рассредоточенных взрывов, проведенных ранее, в том числе и карьерных, что частично отражено на рис. 1–3 и в таблице, где u_1 и u_2 – соответственно фактическая и рассчитанная по формуле (1) скорости смеще-

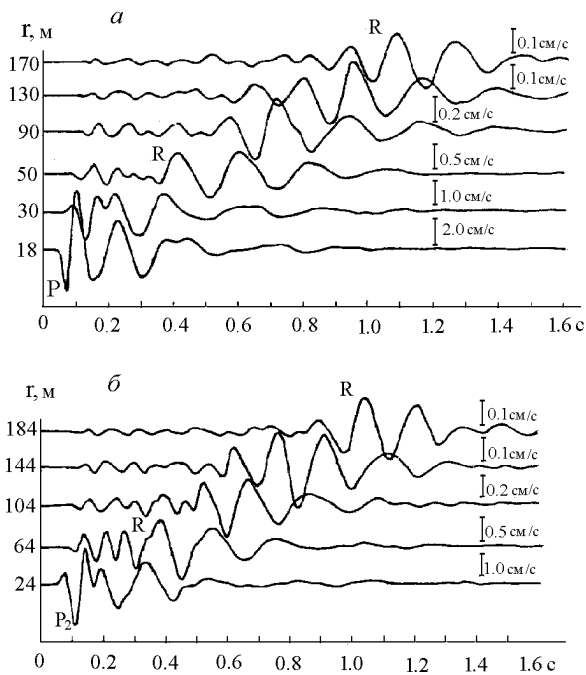


Рис. 1. Осциллограммы волновых процессов при взрывах в глинистых грунтах зарядов массой 12 кг: а – сосредоточенный заряд (п. 5); б – рассредоточенный заряд (п. 3)

ния грунта, а u_1/u_2 – эффект рассредоточенного заряда. Результаты представлены в поверхностной волне по x -составляющей, за исключением взрывов в глинистых грунтах (п. 1–5 таблицы), где массовая скорость измерялась по z -составляющей. Значения массовой скорости представлены в тех грунтах, в которых проводились взрывы зарядов. Измерения осуществлялись с использованием стандартной сейсмометрической аппаратуры по методике, согласованной с НАН Украины.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

На рис. 1 представлены осциллограммы волновых процессов взрывов в глинистых грунтах сосредоточенного и рассредоточенного зарядов массой 12 кг каждый. Характеристики этих зарядов даны в таблице (п. 5 и 3 соответственно).

На рис. 2 представлены зависимости скорости смещения от расстояния при взрывах этих же зарядов, а также другие взрывы рассредоточенных зарядов в глинистых грунтах (позиции их зависимостей 1–5 и порядковый номер в таблице совпадают).

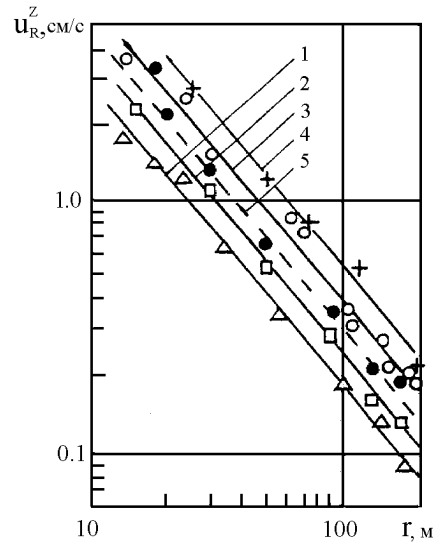


Рис. 2. Зависимости скорости смещения грунта от расстояния при взрывах: 1 – одного заряда массой 3 кг; 2 – 2-х зарядов массой 6 кг; 3 – 4-х зарядов массой 12 кг; 4 – 8-ми зарядов массой 24 кг; 5 – одного заряда массой 12 кг

Как видно из рис. 1, 2 и данных таблицы, при взрывах рассредоточенных зарядов (п. 3) скорость смещения грунта в 1.4 раза больше, чем при взрыве сосредоточенного заряда (п. 5) такой же массы 12 кг на равных расстояниях.

Коэффициент вариации экспериментальных данных, представленных на рис. 2, изменяется от 6.7 до 11.7%, а коэффициент корреляции зависимостей от -0.992 до -0.997 .

Скорость смещения грунта при взрывах рассредоточенных зарядов (п. 2–4) возрастает по сравнению со взрывом единичного заряда (п. 1), но это возрастание не соответствует увеличению приведенного заряда к расстоянию \bar{Q} . Например, \bar{Q} взрыва цепочки из 8 зарядов (п. 4) больше \bar{Q} единичного заряда (п. 1) в 2 раза, а скорость смещения грунта больше в 3 раза. Это говорит о наличии эффекта сложения волн от взрыва каждого отдельного заряда в цепочке с учетом условий взаимодействия.

На рис. 3 представлены зависимости скорости смещения грунта от расстояния при взрывах рассредоточенных зарядов в суглинке (п. 1,3), базальте (п. 6–8), граните (п. 9), а также при взрывах сосредоточенных зарядов в суглинке (п. 2,4,5) и зависимости, рассчитанные по формуле (1) сосредоточенного заряда для базальта и гранита (штри-

Табл. 1. Характеристика зарядов и результаты их взрывов

| Грунт, площадка | рис., позиция | $Q_1, \text{кг}$ | m | $a, \text{м}$ | c | $r, \text{м}$ | k | n | $u_1, \text{см/с}$ | $u_2, \text{см/с}$ | u_1/u_2 |
|---|---------------|------------------|-----|---------------|-------|---------------|-----|------|--------------------|--------------------|-----------|
| Глина, суглинок, полигон шахты "Рокој" (РП) | Рис. 1,2 | | | | | | | | | | |
| | 1 | 3 | 1 | – | – | 50 | 30 | 1.2 | 0.42 | – | – |
| | 2 | 3 | 2 | 1.0 | 0.043 | 50 | 30 | 1.2 | 0.58 | 0.56 | 1.04 |
| | 3 | 3 | 4 | 4.0 | 0.17 | 50 | 30 | 1.2 | 1.02 | 0.73 | 1.4 |
| | 4 | 3 | 8 | 0.7 | 0.03 | 50 | 30 | 1.2 | 1.19 | 0.97 | 1.23 |
| 5 | 12 | 1 | – | – | 50 | 30 | 1.2 | 0.73 | – | – | |
| | Рис. 3 | | | | | | | | | | |
| Суглинок, полигон НАН Украины | 1 | 0.9 | 15 | 1.5 | 0.065 | 50 | 68 | 1.4 | 1.45 | 0.96 | 1.5 |
| | 2 | 14 | 1 | – | – | 50 | 68 | 1.4 | 0.96 | – | – |
| | 3 | 0.9 | 7 | 1.5 | 0.065 | 50 | 68 | 1.4 | 0.83 | 0.67 | 1.24 |
| | 4 | 6 | 1 | – | – | 50 | 68 | 1.4 | 0.67 | – | – |
| | 5 | 0.9 | 1 | – | – | 50 | 68 | 1.4 | 0.27 | – | – |
| Базальт Берестовецкое МР | 6 | 68 | 19 | 3.3 | 0.069 | 300 | 157 | 1.69 | 0.76 | 0.57 | 1.33 |
| | 7 | 80 | 8 | 3.3 | 0.064 | 300 | 160 | 1.69 | 0.45 | 0.4 | 1.12 |
| | 8 | 46 | 3 | 3.3 | 0.077 | 300 | 148 | 1.69 | 0.16 | 0.15 | 1.07 |
| Гранит, Вировское МР | 9 | 365 | 6 | 5.6 | 0.061 | 300 | 175 | 1.61 | 1.23 | 1.07 | 1.15 |
| | 10 | 390 | 3 | 5.6 | 0.061 | 1000 | 175 | 1.61 | 0.12 | 0.11 | 1.05 |
| Известняк прибалтийский | 11 | 147 | 2 | 7.1 | 0.089 | 600 | 130 | 1.49 | 0.17 | 0.16 | 1.06 |
| | 12 | 252 | 4 | 7.1 | 0.074 | 300 | 140 | 1.49 | 1.0 | 0.89 | 1.12 |
| | 13 | 250 | 8 | 7.1 | 0.074 | 300 | 140 | 1.49 | 1.56 | 1.24 | 1.26 |

ховые линии). Из анализа данных рис. 3 и таблицы видно, что эффект рассредоточенного заряда в скальных грунтах меньший, чем в мягких грунтах. Однако при некоторых взрывах в скальных и мягких грунтах такие характеристики рассредоточенных зарядов как количество зарядов m и относительное расстояние между ними c были почти одинаковыми.

Коэффициенты вариации и корреляции экспериментальных данных и зависимостей, представленных на рис. 3, имеют следующие значения: суглинок – $K_{\text{вар}} = 3.5-6.4\%$, $K_k = (-0.991)-(-0.993)$; базальт – $K_{\text{вар}} = 5.9-10.8\%$, $K_k = (-0.991)-(-0.997)$; гранит – $K_{\text{вар}} = 10.4\%$, $K_k = -0.986$.

Рассмотрим взаимосвязь между эффектом рассредоточенного заряда и расстоянием между отдельными зарядами в ряду.

При сближении зарядов сейсмический эффект взрыва уменьшается, т. е. в этом случае заряды взаимодействуют между собой, а значит происходит дополнительное разрушение грунта и соответственно частичная потеря сейсмической энергии. Поэтому каждый отдельный заряд Q_1 по отношению к выходу энергии в волновой процесс может быть охарактеризован эффективным заря-

дом $Q_{\text{эф}}$. По результатам анализа зависимости интенсивности колебания грунта от расстояния между зарядами a были отмечены максимальные значения интенсивности колебаний при расстояниях $a = 2r_n$ (r_n – зона неупругих деформаций грунтов), т. е. наибольшее значение $Q_{\text{эф}}$ будет в том случае, когда заряды в ряду (цепочке) не взаимодействуют между собой. Это происходит, если не соприкасаются их очаги взрывов (зоны неупругих деформаций грунтов). При этом условии $Q_{\text{эф}}^{\text{max}} = Q_1$. При сближении зарядов значение $Q_{\text{эф}}$ уменьшается, а при $a = 0$ отдельные заряды сожмутся в один сосредоточенный заряд $Q = mQ_1$ (m – число зарядов в ряду).

Анализируя данные таблицы, можно сделать выводы, что наименьший эффект рассредоточенного заряда наблюдается при взрывах 2–3 зарядов в ряду с малыми расстояниями между ними, а наибольший эффект рассредоточенного заряда наблюдается при взрывах большого количества зарядов в ряду (до 10) с большими расстояниями между зарядами (сравнимыми с r_n). Последнее особенно относится к взрывам в мягких грунтах, когда упоминаемый эффект может составить 200–300%.

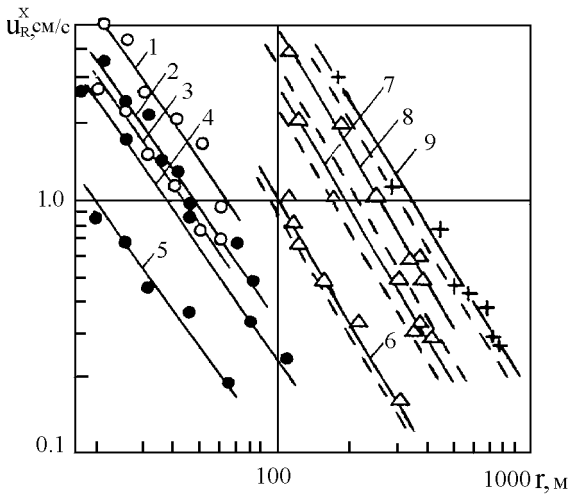


Рис. 3. Зависимости скорости смещения грунта от расстояния при взрывах рассредоточенных зарядов в различных грунтах: 1, 3 – суглинок; 6 – 8 – базальт; 9 – гранит; а также сосредоточенных зарядов в суглинке (п. 2, 4, 5). Штриховыми линиями нанесены значения скорости смещения, рассчитанные по формуле (1) сосредоточенного заряда для базальта и гранита

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ

На основе анализа и обработки экспериментального материала представляется возможным получить зависимость $Q_{эф}$ от условий взрыва рассредоточенного заряда:

$$Q_{эф} = Q_1 \left[\left(1 - \frac{1}{m^b}\right)c + 1/m^b \right], \quad (2)$$

где b – показатель степени при количестве зарядов, зависящий от свойств грунта через коэффициент затухания сейсмозврывной волны n ($b = 3/n - 1$); c – относительное расстояние между зарядами ($c = a/2r_H$).

Размер очага взрыва r_H , по нашим исследованиям, имеет разные значения при прохождении вертикальной z и горизонтальной x составляющих волны и определяется следующей зависимостью:

$$r_H = k_o \sqrt[3]{Q_1},$$

где k_o для рассматриваемых грунтов по z и x -составляющим соответственно будут следующими: глинистые грунты – 8 и 12; известняк – 5.5 и 7.6; гранит – 4.5 и 6.5; базальт – 4 и 6.

Для расчета скорости смещения $u_R^{z,x}$ (см/с) грун-

та при одновременном взрыве ряда (цепочки) рассредоточенных зарядов должна применяться следующая формула:

$$u_R^{z,x} = k \cdot m \left(\frac{r}{Q_{эф}^{1/3}} \right)^{-n}. \quad (3)$$

Коэффициент k , входящий в формулу (3), состоит из двух частей: k_1 учитывает свойства грунта, а k_2 – конструкцию скважинного (шпурового) заряда. Значение k_1 связано с размером очага взрыва (зоной необратимых деформаций грунтов) и его можно определить для поверхностной волны по x -составляющей из следующей зависимости:

$$k_1 = \frac{k_o}{0.05(0.4k_o - 1)}.$$

Коэффициент k_2 для цилиндрического заряда определяется по формуле:

$$k_2 = l^{0.15} \cdot Q_{л}^{0.1},$$

где l – длина заряда; $Q_{л}$ – линейная масса. Для сосредоточенного заряда k_2 является функцией глубины заложения заряда.

Между показателем затухания n поверхностной волны с расстоянием по x -составляющей и скоростью распространения продольной волны V_p в зоне малых скоростей существует линейная зависимость

$$n = 1.3(0.1V_p + 1).$$

При расчете массовой скорости по формуле (3) принимается только то количество зарядов m , волны которых приходят в наблюдаемую точку со сдвигом фаз по отношению к ближайшему заряду не более 90° . Другими словами, если в наблюдаемой точке разница во времени прихода волн от последующего и предыдущего зарядов больше t_n (времени нарастания амплитуды до максимума в волне P) или $1/4T_R$ (T_R – период колебаний в волне R), то этот (последующий) заряд не учитывается в формуле (3). Что касается поверхностной волны, действие которой относится к дальней зоне, то практически всегда, когда половина длины рассредоточенного заряда не превышает зону действия очага взрыва, волны от всех зарядов приходят в наблюдаемую точку со сдвигом фаз между собой не более 90° и складываются.

В действиях объемных волн эффект рассредоточенного заряда проявляется незначительно, поэтому в настоящей работе параметры этих волн не анализируются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментальными исследованиями подтверждено увеличение основного критерия сейсмоопасности при ведении взрывных работ, скорости смещения грунта, при взрыве рассредоточенных зарядов по сравнению со взрывом сосредоточенного заряда с массой, равной сумме масс рассредоточенных зарядов, и с равными условиями их заложения.

2. Получена зависимость (2) для определения эффективной массы единичного заряда в ряду рассредоточенных зарядов. Эффективная масса особенно резко уменьшается при небольших расстояниях между зарядами ($c \leq 0.05$), что с практической точки зрения является положительной стороной при устройстве защитных экранов (щелей) различного назначения вблизи охраняемых объектов.

3. Предложена инженерная формула (3) для расчета скорости смещения грунта при одновременном взрыве группы рассредоточенных зарядов, которая дает более точные результаты, чем формула (1) сосредоточенного заряда и может применяться как при взрыве одиночной группы зарядов, так и при короткозамедленном взрывании необходимого количества групп зарядов.

Проведенные исследования являются составной частью крупной и важной научно-технической задачи по безопасному ведению взрывных работ и вместе с тем новой гранью промышленной сейсмологии. В практическом плане переход по определению интенсивности сейсмозрывного воздействия на охраняемые объекты с метода общей массы рассредоточенных зарядов на метод количества взаимодействующих зарядов, взрывааемых одновременно, позволит более точно прогнозировать безопасность взрывных работ. Особенно эффективным предлагаемый метод является при взрыве цепочки зарядов по проходке траншей, для образования взрывом различных экранов и щелей возле охраняемых объектов, при определении сейсмического эффекта взрыва горизонтального непрерывного удлиненного заряда с дополнительными боевиками по его длине. Кроме того, только рассматриваемый метод позволяет определить сейсмический эффект при переходе ведения взрывных работ с одного диаметра скважин на другой.

1. Садовский М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов. – М: Изд. АН СССР, 1946. – 29 с.
2. Рулев Б.Г., Харин Д.А. Взрывное дело // М.: Недра. – 1968. – N64/21. – С. 211–231.