

## О ПОДОБИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВАХ В ГРУНТАХ

С. С. Григорян

(Москва)

В работе [1] обсуждаются результаты экспериментального изучения поверхностных волн, образующихся вблизи от эпицентра мелкозаглубленного взрыва в глинистых грунтах, и делается попытка дать при помощи анализа опытных данных обобщенные эмпирические соотношения, основанные на соображениях теории размерностей и подобия. Подробному рассмотрению подвергается начальный участок поверхностной волны (окрестность первого вступления сейсмограммы).

Основной качественный результат заключается в том, что вблизи от эпицентра взрыва максимальные скорости частиц поверхности грунта для указанного участка сейсмограммы достигаются в течение интервалов времени, на порядок меньших соответствующих интервалов времени для максимальных смещений; быстро распространяющаяся волна сжатия порождает начальное поле скоростей без заметных смещений и существенно нарушает связи между частицами грунта, после этого частицы будут совершать движение, определяемое в основном действием силы тяжести, что и приводит к сравнительно медленному дальнейшему развитию движения. То обстоятельство, что на начальное поле скоростей сила тяжести не влияет, подтверждается наличием геометрического подобия в распределении максимальных скоростей вдоль поверхности грунта, т. е. существованием эмпирического соотношения

$$u = u_0 f\left(\frac{r}{r_0}\right) = u_0 \Phi\left(\frac{r}{C^{1/3}}\right) = K\left(\frac{C^{1/3}}{r}\right)^n \quad (1)$$

где  $u_0$  — постоянная размерности скорости,  $r_0$  — характерный размер заряда,  $C$  — его вес,  $K$  — размерная постоянная,  $n$  — безразмерная постоянная (см. [1], фиг. 4).

Однако дальнейшие выводы из обнаруженного факта, анализ и форма представления результатов по максимальным смещениям  $a$  и интервалам времени  $\tau_2$ , в течение которых достигаются эти смещения, сделаны в работе [1] неверно.

Целью настоящей заметки является устранение этих неточностей.

Так как на создание начального поля скоростей сила тяжести не влияет, на основе соображений анализа размерностей можно написать следующее выражение для распределения максимальных скоростей частиц вдоль поверхности грунта:

$$u = \sqrt{p_0 / \rho_0} f(r / r_0, \sigma_* / p_0, h / r_0) \quad (2)$$

Здесь  $\rho_0$  — начальная плотность грунта,  $\sigma_*$  — постоянная размерности напряжения, характеризующая упругие и прочностные свойства грунта,  $p_0$  — начальное давление продуктов взрыва,  $r_0$  — характерный размер заряда ВВ,  $h$  — глубина заложения заряда. Вид функции  $f$  зависит от того, в каком грунте происходит взрыв и из какого ВВ сделан заряд. Для случая, рассмотренного в работе [1], эта функция имеет вид (1). Поскольку в опытах среда и ВВ почти не менялись, а при изменении  $C$  глубина заложения менялась так, чтобы отношение  $h / C^{1/3}$  или, что то же,  $h / r_0$  оставалось постоянным, в формуле (2) единственным переменным аргументом функции является первый, и формулу можно писать в виде (1).

После прохождения по грунту ударных волн и возникновения поля скоростей

$$v_0 = \sqrt{p_0 / \rho_0} V(z / r_0, r / r_0) = v_0 V(z / r_0, r / r_0) \quad (3)$$

начинается более медленное движение среды. Для частиц, расположенных вблизи поверхности грунта ( $z / r_0 \approx 0$ ) недалеко от эпицентра, это движение в основном определяется действием силы тяжести, тогда как для более удаленных областей сила тяжести не оказывает существенного влияния на последующее движение. Системой определяющих параметров для этой второй стадии движения, очевидно, будет

$$v_0 = \sqrt{p_0 / \rho_0}, r_0, g, \sigma_*, \rho_0, z, r, t \quad (4)$$

Поэтому для распределения, например, максимальных смещений точек поверхности  $a$  и времен достижения этих смещений  $\tau_2$  можно написать, пользуясь соображениями анализа размерностей, соотношения

$$a = \frac{v_0^2}{g} F_a\left(\frac{r}{r_0}, \frac{v_0^2}{r_0 g}, \frac{\rho_0 v_0^2}{\sigma_*}\right), \quad \tau_2 = \frac{v_0}{g} F_\tau\left(\frac{r}{r_0}, \frac{v_0^2}{r_0 g}, \frac{\rho_0 v_0^2}{\sigma_*}\right) \quad (5)$$

В силу определения  $v_0$  последний аргумент в (5) при изменении размеров явления ( $r_0$ ) не меняется, поэтому формулы (5) имеют вид

$$a = \frac{v_0^2}{g} F_a \left( \frac{r}{r_0}, \frac{v_0^2}{r_0 g} \right), \quad \tau_2 = \frac{v_0}{g} F_\tau \left( \frac{r}{r_0}, \frac{v_0^2}{r_0 g} \right) \quad (6)$$

Принятие предположения о том, что в ближней зоне прочностные и упругие свойства несущественны, означает, что частицы движутся, почти не взаимодействуя, а из этого следует, что в формулах (6) величина  $r_0$  должна входить только в комбинации  $r/r_0$ , т. е. что характер зависимости  $a$  и  $\tau_2$  от  $r$  и  $r_0$  такой же, что и в (1)–(3). Это значит, что в формулах (6) второй аргумент несуществен, т. е. что они имеют вид

$$a = \frac{v_0^2}{g} f_a \left( \frac{r}{r_0} \right), \quad \tau_2 = \frac{v_0}{g} f_\tau \left( \frac{r}{r_0} \right) \quad (7)$$

Если теперь перейти в этих формулах от  $r_0$  к  $C^{1/3}$ , то они будут иметь вид

$$a = \frac{v_0^2}{g} \bar{f}_a \left( \frac{r}{C^{1/3}} \right), \quad \tau_2 = \frac{v_0}{g} \bar{f}_\tau \left( \frac{r}{C^{1/3}} \right) \quad (8)$$

На стр. 98 работы [1] приводятся формулы для  $a$  для двух случаев — при «моделировании по Фрудру»

$$\frac{a}{C^{1/4}} = K \left( \frac{r}{C^{1/4}} \right)^{3.8}, \quad K = \text{const} \quad (9)$$

и при «геометрическом моделировании»

$$\frac{a}{C^{1/3}} = K \left( \frac{r}{C^{1/3}} \right)^{3.8}, \quad K = \text{const} \quad (10)$$

На стр. 97 работы [1] имеется фиг. 6, на которой изображена зависимость  $\tau_2$  от  $r$  (экспериментальные данные), построенная в переменных  $\lg(\tau_2 C^{-1/3})$ ,  $\lg(r C^{-1/3})$  для случая «моделирования по Фрудру» и в переменных  $\lg(\tau_2 C^{-1/3})$ ,  $\lg(r C^{-1/3})$  для «геометрического моделирования», т. е. графики соотношений для  $\tau_2$ , принимаемых в виде

$$\tau_2 C^{-1/3} = f_\tau(r C^{-1/3}), \quad \tau_2 C^{-1/3} = f_\tau(r C^{-1/3}) \quad (11)$$

для двух случаев соответственно. Видно, что формулы (9)–(11) отличаются от формул (8).

Несмотря на то что основной силой, влияющей на рассматриваемое движение, будет сила тяжести, формулы для обработки и представления результатов опытов не могут иметь вида (9) для  $a$  и первой из (11) для  $\tau_2$ .

Правильные формулы имеют вид (8).

Чтобы перестроить график на фиг. 6 из [1], соответствующий второй формуле (11) в правильных переменных, т. е. перейти от переменных

$$y = \lg(\tau_2 C^{-1/3}), \quad x = \lg(r C^{-1/3})$$

к переменным,

$$y_1 = \lg \tau_2, \quad x_1 = \lg(r C^{-1/3}) = x$$

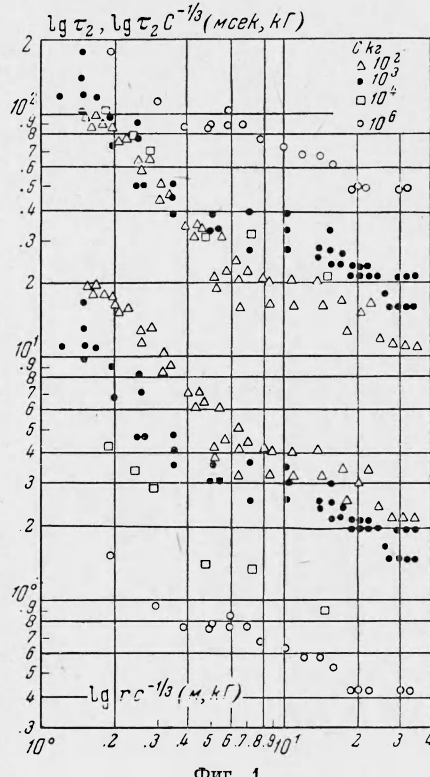
соответствующим формуле (8), необходимо, сохранив абсциссы всех точек графика неизменными, прибавить к ординатам величины  $1/3 \lg C$ , так как

$$y_1 = y + 1/3 \lg C$$

На графике фиг. 6 в [1] приводятся точки для значений  $C = 10^2, 10^3, 10^4, 10^6$ . Поэтому к ординатам нужно прибавить числа  $2/3, 1, 4/3, 2$ .

Приводим результат такого перестроения на фиг. 1 (верхние точки) вместе с данными фиг. 6, б из [1], по которым это перестроение выполнено.

В работе [1] на стр. 95 (фиг. 5) имеются также данные для зависимости  $a$  от  $r$  в переменных  $y = \lg a, x = \lg r$ .



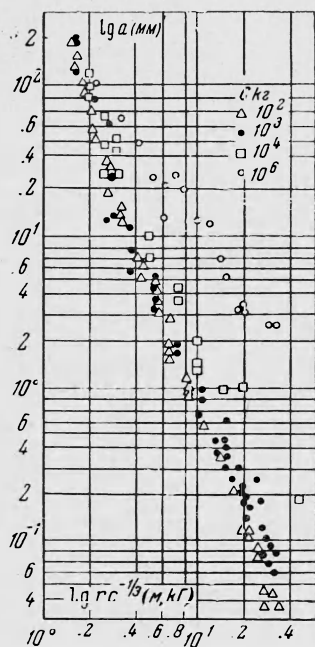
Фиг. 1

В соответствии с первой из формул (8) эти данные следует наносить на график в переменных

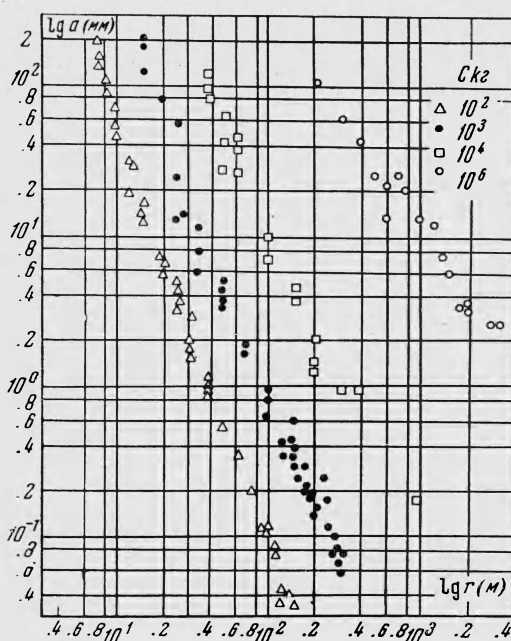
$$y_1 = \lg a = y, \quad x_1 = \lg (rC^{-1/3}) = x - 1/3 \lg C$$

т. е. из абсцисс точек для значений  $C = 10^2, 10^3, 10^4, 10^6$  вычесть числа  $2/3, 1, 4/2, 2$ . Результаты такого перестроения фиг. 5 из [1] приводим на фиг. 2 и, для сравнения, на фиг. 3 воспроизводим фиг. 5 из [1].

Из фиг. 1 и 2 видно, что, действительно, на близких расстояниях от эпицентра опытные данные для разных значений  $C$  хорошо описываются едиными соотношениями вида (8). Как на фиг. 1, так и на фиг. 2 из общего для всех значений  $C$  графика выпадают точки, соответствующие значению  $C = 10^6$ . На фиг. 4 из [1] для зависимости (1) точки для  $C = 10^6$  также выпадают из общего графика, причем в ту же сторону, что и на фиг. 1 и 2 данной заметки. Все это свидетельствует о том, что, по-видимому, условия проведения опыта для  $C = 10^6$  отличались от условий для других значений  $C$  — либо были существенно иные грунтовые условия, либо значе-



Фиг. 2



Фиг. 3

ние величины  $h/r_0$  для  $C = 10^6$  отличалось от соответствующего значения, требующегося условиями геометрического подобия.

Можно еще отметить, что числа вдоль оси абсцисс на фиг. 5 из [1], видимо, представлены неправильно, ибо при пересчете их к фиг. 2 должны получаться те же значения, что и на оси абсцисс фиг. 4, 6 из [1], чего нет, — имеется отличие на один порядок. По этой причине приводим фиг. 5 из [1] и результат ее перестроения со смещенной на один порядок влево осью абсцисс (см. фиг. 3 и 2).

В заключение еще следует отметить, что приведенные в конце работы [1] рассуждения и выводы относительно влияния на больших расстояниях вязких сил не вытекают из экспериментальных данных, приводимых в [1], так как эти данные, как видно из фиг. 1 и 2, хорошо описываются схемой, в которой начальная фаза движения определяется действием только упругих и прочностных сил в среде, а последующая — действием только силы тяжести. Поэтому эти выводы нельзя считать обоснованными.

Поступила 19 VI 1964

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рулев Б. Г. Подобие волн сжатия при взрывах в грунтах. ПМТФ, 1963, № 3.