

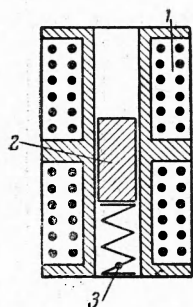
О ВЗРЫВЕ В ПЕСЧАНОМ ГРУНТЕ

В. М. Цветков
(Москва)

Экспериментальное изучение взрыва в мягком грунте проводилось рядом авторов. В работах А. Н. Ромашова, В. Н. Родионова и А. П. Сухотина [1,2] измерялось перемещение грунта во времени. Г. М. Ляхов [3] и В. И. Кривцов [4] измеряли давление в волне сжатия.

В предлагаемой работе производились измерения скорости перемещения грунта во времени при кмуфлетном взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ).

Описание эксперимента. Взрывы зарядов весом $C = 0.49, 1.4, 2.3, 5.5, 24$ г (в пересчете на ТГ 50/50 с удельной теплотой взрыва 1140 ккал/кг) производились в песчаном грунте плотностью 1.7 г/см³ и влажностью 5%. Измерения выполнялись при помощи датчика, регистрирующего скорость перемещения грунта

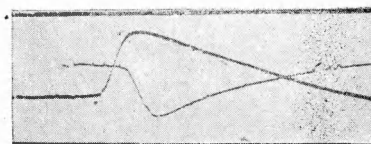


Фиг. 1

во времени. Схематический чертеж датчика представлен на фиг. 1. Датчик состоит из катушки 1 и намагниченного сердечника 2, движение которого относительно катушки наводит в ней напряжение. Расположенная под сердечником пружина 3 позволяет измерять скорости перемещения до 1 см/сек. Используемые датчики имели период собственных колебаний $100 \div 150$ мсек и позволяли регистрировать перемещения до 7 мм. Размеры датчика: диаметр 10 мм, высота 20 мм. Датчики тарировались свободным падением. Запись электрического сигнала датчика производилась при помощи осциллографов ОК-24 и ОК-27 (ИХФ АН СССР). Используемая методика позволяла регистрировать волны со временем нарастания до максимума не менее 0.1 мсек.

1. Представленная на фиг. 2 типичная осциллограмма скорости перемещения грунта во времени позволяет судить о характере волны, распространяющейся по грунту. Во всем исследованном интервале приведенных расстояний $0.7 < R^0 < 10$ наблюдается некоторое время нарастания скорости перемещения до максимума. Затем скорость перемещения плавно спадает до нуля. Измерение времени от момента взрыва до момента t_m достижения максимальной скорости перемещений позволяет построить зависимость скорости распространения максимума D_m от расстояния до центра взрыва R . Эта зависимость, представленная на фиг. 3, для всех использованных зарядов описывается следующими эмпирическими формулами:

$$\begin{aligned} D_m &= 193 (R^0)^{-0.4}, & 0.7 < R^0 < 1.6 \\ D_m &= 192 (R^0)^{0.05}, & 3 < R^0 < 10 \\ \left(D_m [\text{м сек}^{-1}], R^0 = \frac{R}{C^{1/3}} \left[\frac{\text{м}}{\text{кг}^{1/3}} \right] \right) & \quad (1) \end{aligned}$$



Фиг. 2

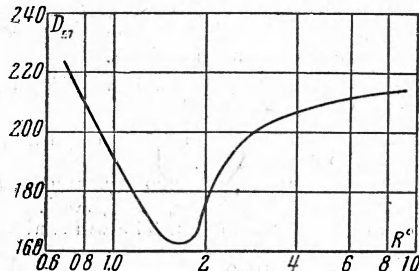
В интервале $1.6 < R < 3$ скорость D_m плавно переходит с одной зависимости на другую.

Таким образом скорость распространения максимума при удалении от центра взрыва сначала падает, перейдя через скорость звука, равную ≈ 215 м/сек, достигает величины ≈ 160 м/сек, а затем начинает возрастать и выходит на скорость звука. Начало перемещений грунта при этом распространяется со скоростью, равной скорости звука.

Такой характер изменения скорости распространения максимума с расстоянием вполне очевиден, если представить процесс сжатия грунта в волне упруго-пластическим.

2. Результаты измерений максимальной скорости перемещения грунта v_m от обратной величины приведенного расстояния представлены на фиг. 4, где зачерненные точки относятся к заряду 24 г; зачерненные наполовину — 5.5 г; незачерненные — 1.4 г; кресты прямые — 2.3 г; кресты косые — 0.49 г. Как видно из графика, все экспериментальные точки ложатся на одну зависимость, которую можно описать следующими эмпирическими формулами:

$$\begin{aligned} v_m &= 10 (R^0)^{-3} & (0.7 < R^0 < 3) \\ v_m &= 2.6 (R^0)^{-1.75} & (3 < R^0 < 10) \\ (v_m [\text{м / сек}]) & \quad (2) \end{aligned}$$

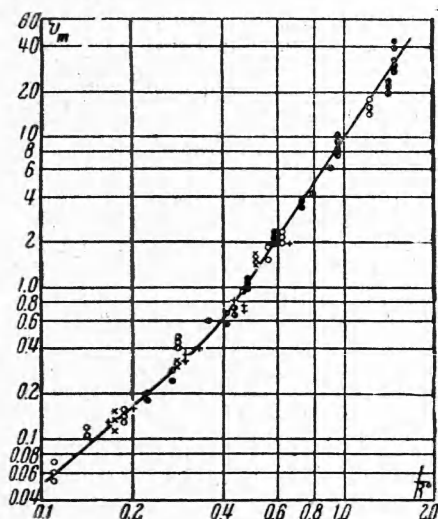


Фиг. 3

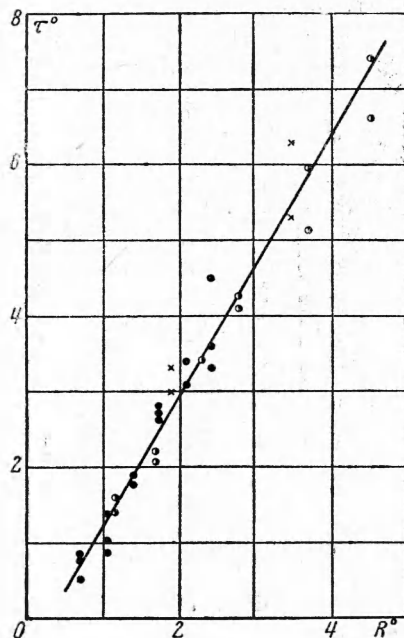
Сравнение наших результатов с экспериментальными данными [1, 2] показывает

значительное расхождение. При этом полученные скорости перемещения на расстояниях $R^\circ < 3$ оказываются не только больше, но и меняются с расстоянием по другому закону.

Это расхождение объясняется следующим. В работе [1] измерялись перемещения грунта во времени. Последующее дифференцирование зависимости перемещений — время — давало величину скорости перемещений. При этом авторы исходили из предположения, что фронт волны сжатия ударный, а максимальная скорость перемещений достигается в момент начала перемещений. Поэтому за величину максимальной скорости перемещений в [1] брали наклон зависимости перемещения — время в начальный момент.

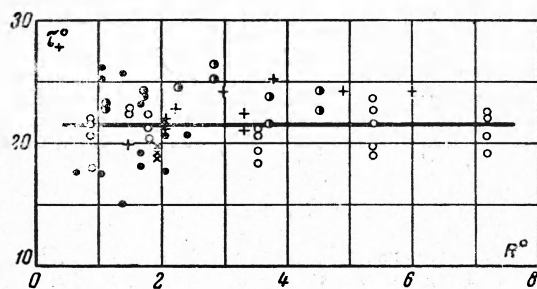


Фиг. 4



Фиг. 5

Из приведенных результатов вытекает, что максимальная скорость перемещения достигается не в начальный момент, а некоторое время спустя. Поэтому зависимость перемещения — время — должна иметь перегиб в момент времени, соответствующий достижению максимальной скорости.



Фиг. 6

В работе [1] этот перегиб не регистрировался из-за большого разброса точек. 3. На фиг. 5 показана зависимость приведенного времени нарастания скорости перемещения τ_m° до максимальной величины. Эта зависимость описывается следующим соотношением:

$$\tau_m^\circ = -0.5 + 1.7 (R^\circ) (\tau_m^\circ [\text{мсек/кг}^{1/3}]) \quad (3)$$

Экспериментальные результаты по измерению времени положительной фазы движения τ_+° (от центра взрыва), представленные на фиг. 6 в приведенных координатах, показывают, что в пределах разброса эксперимента все точки ложатся на одну зависимость

$$\tau_+^\circ = 21 \quad (\tau_+^\circ [\text{м сек кг}^{-1/3}]) \quad (4)$$

Таким образом, время положительной фазы движения не зависит от расстояния до центра взрыва, а зависит лишь от величины заряда.

4. Интегрирование осциллограмм скорости перемещений по времени за время τ_+ позволяет оценить величины смещенного грунта за время положительной фазы движения. Такая обработка осциллограмм показала, что смещение для всех использованных зарядов в приведенных координатах можно описать формулой

$$\Delta R_+^0 = 35 (R^0)^{-1.8} \quad 2.5 < R^0 < 10 \quad (\Delta R_+^0 \text{ [мм кг}^{-1/2}\text{]}) \quad (5)$$

Смещение грунта ΔR_m^0 за время нарастания скорости перемещения до максимума описывается формулой

$$\Delta R_m^0 = 8 (R^0)^{-1.6} \quad (1.5 < R^0 < 10) \quad (6)$$

и может составлять до 25% полного смещения ΔR_+^0 за время положительной фазы движения.

5. Энергия, переносимая волной, определяется соотношением

$$E = 4\pi R^2 \int \rho v \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) dt$$

Пренебрегая членом $v^2/2$ ввиду его малости по сравнению с p/ρ и принимая $p = p_0 + \rho_0 v D$, получим

$$E = 4\pi R^2 \int (p_0 v + \rho_0 v^2 D) dt \quad (7)$$

Подсчитанная таким образом по экспериментальным осциллограммам зависимость энергии волны в единицах энергии заряда $\varepsilon = E/E_0$ от приведенного расстояния R^0 представлена на фиг. 7.

Как видно из графика, в интервале $1 < R^0 < 10$ энергия, переносимая волной, меняется от 20 до 2%. Сильное затухание

энергии волны с расстоянием свидетельствует о том, что значительная ее доля тратится на необратимые процессы и не совершает механической работы.

Однако, если в зоне $R^0 < 0.5$ потери энергии, достигающие 70% от E_0 , приводят к значительному нагреванию грунта, как об этом свидетельствуют опыты по измерению температуры грунта после взрыва [2], в области расстояний $R^0 > 1$, куда передается около 20% E_0 , грунт практически не нагревается.

6. Используя соотношения (1) и (2), можно оценить величины давлений и плотностей, достигаемые в волне сжатия. Считая, что максимальное давление в волне равно

$$\Delta p_m = \rho_0 v_m D_m \quad (8)$$

получаем следующие формулы

$$\Delta p_m = 32 (R^0)^{-3.4} \quad (0.7 < R^0 < 2), \quad \Delta p_m = 10 (R^0)^{-1.8} \quad (2 < R^0 < 10) \quad (\Delta p_m \text{ [кг см}^{-2}\text{]}) \quad (9)$$

Подсчитанные таким образом давления с точностью до 5% совпадают с экспериментально измеренными давлениями пьезоэлектрической методикой в таком же по составу песчаном грунте [4].

Используя соотношение

$$\frac{v_m}{D_m} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (10)$$

были получены величины максимальных плотностей, достигаемых в волне сжатия на различных расстояниях, которые описываются следующим выражением

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{1}{1 - 0.052 (R^0)^{-2.6}} \quad (11)$$

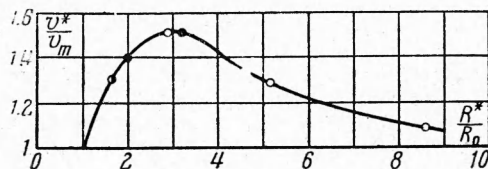
На основании (9) и (11) для сжимаемости грунта получаем

$$\Delta p = 1470 \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right)^{1.3} \quad (12)$$

Это соотношение, описывающее неупругие деформации грунта, справедливо в диапазоне деформаций $0.01 < \rho/\rho_0 < 0.2$. Упругое сжатие происходит при давлениях до 3 кг/см^2 и деформациях до 0.005.

Нужно иметь в виду, что формулы (9), (11), (12) являются оценочными, так как получены при помощи соотношений (8) и (10), справедливых лишь для ударного фронта.

7. Для того чтобы оценить влияние начального давления на параметры волны сжатия в песчаном грунте, проводились эксперименты со взрывом заряда ВВ в воздушной полости радиусом R^* . Сравнивались осциллограммы скорости перемещения грунта на одном и том же расстоянии от центра при сосредоточенном взрыве заряда и при взрыве в полости. Эксперименты показали, что в интервале полостей $1 < R^*/R_0 < 10$, где R_0 —



Фиг. 8

радиус заряда ВВ, массовые скорости при взрыве в полости v^* оказываются больше, чем скорости при взрыве сосредоточенного заряда v_m . Причем для каждого заряда ВВ отношение скоростей перемещений v^* и v_m приблизительно одинаково для всех расстояний от центра взрыва. Полученные экспериментальные результаты представлены на фиг. 8 в виде зависимости v^*/v_m от R^*/R_0 .

Этот результат можно объяснить следующим: в ближней зоне для $R^* < 10 R_0$ падение давления с расстоянием в грунте более сильное, чем в воздухе [3], где давление падает по закону $R^{-1.15}$. Поэтому на стенку полости, вероятно, действует давление большее, чем давление на том же расстоянии, но при взрыве сосредоточенного заряда. Следовательно, на всех расстояниях при взрыве в полости $R^* < 10 R_0$ должны действовать давления и скорости перемещения большие, чем при сосредоточенном взрыве.

Форма волны и временные характеристики при взрыве заряда в полости в пределах экспериментального разброса не отличаются от временных характеристик сосредоточенного взрыва.

Автор признателен В. Н. Костюченко за интерес, проявленный к работе, и обсуждение экспериментальных результатов.

Поступила 28 V 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашов А. Н., Родионов В. Н., Сухотин А. П. Взрыв в уплотняющейся неограниченной среде. ДАН СССР, 1958, т. 123, № 4.
2. Родионов В. Н., Ромашов А. Н., Сухотин А. П. Взрыв в грунте. Уч. совет по народнохозяйственному использованию взрыва. Сб. СО АН СССР, 1959, вып. 2.
3. Ляхов Г. М. Ударные волны в грунте и разжижение водонасыщенного песка. ПМТФ, 1961, № 1.
4. Кривцов В. А. К вопросу о распространении ударной волны в песчаном грунте. Уч. совет по народнохозяйственному использованию взрыва. Сб. СО АН СССР, 1961, вып. 1.
5. Христофоров Б. Д. Параметры фронта ударной волны в воздухе при взрыве зарядов из тэна и азида свинца разной плотности. ПМТФ, 1961, № 6.