

ВЗРЫВНЫЕ ВОЛНЫ В ЛЁССОВИДНОМ ГРУНТЕ

**С. С. Григорян, Г. М. Ляхов, В. В. Мельников,
Г. В. Рыков**

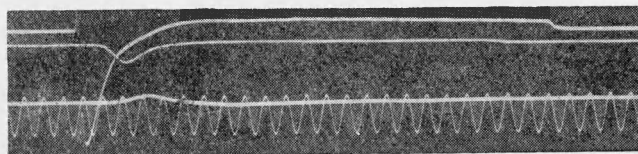
(Москва)

В работах [1-4] описан метод измерения взрывных волн в мягких грунтах и приведены некоторые результаты таких измерений, проведенных в песчаном грунте. По этой же методике, обогащенной измерением массовых скоростей частиц, летом 1962 г. были проведены опыты в лёссе в районе Одессы. Ниже приводятся некоторые результаты этих опытов и их обсуждение.

1. Характеристики грунта и условия проведения опытов. Эксперименты проводились в лёссовидном грунте ненарушенной структуры с объемным весом скелета $\gamma = 1.34-1.38 \text{ г/см}^3$ и объемной влажностью $w = 0.18-0.20$. Гранулометрический состав грунта

Размер частиц, мм	от	—	0.5	0.25	0.20	0.05	0.01	0.005
			до	0.5	0.25	0.20	0.05	0.01
Содержание фракций, %			0.20	0.25	6.45	45.50	13.45	34.15

По гранулометрическому составу грунт относится к тяжелому пылеватому суглинку или к лёссовидным глинам.



Фиг. 1

Волны в грунте создавались при взрывах сосредоточенных зарядов прессованного тротила весом 0.2, 1.6, 25 и 200 кг. Напряжения измерялись при помощи высокочастотных тензометрических датчиков. Скорости частиц измерялись датчиками, представлявшими собой соленоид в металлическом корпусе со свободно перемещающимся внутри соленоида железным сердечником. Показания датчиков фиксировались на шлейфных осциллографах.

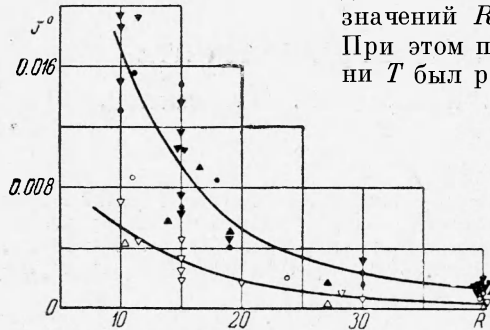
Заряды и датчики устанавливались в пробуренных скважинах. После установки скважины засыпались грунтом и трамбовались.

Датчики устанавливались в диапазоне расстояний $10 \leq R \leq 40$, где $R = r/r_0$, r — расстояние от центра взрыва, r_0 — радиус заряда ВВ.

На каждом расстоянии от взрыва устанавливались два датчика напряжения. У одного из них воспринимающий элемент устанавливался перпендикулярно направлению движения волны, а у другого — параллельно. В первом случае записывалось радиальное, а во втором тангенциальное нормальное напряжение.

При определении по осциллограммам импульса I волны напряжения и времени ее действия Θ учитывались промежутки времени, при которых напряжение составляло не менее 0.02—0.03 от максимального значения.

2. Результаты опытов. Анализ осциллограмм напряжений и скоростей частиц грунта показал, что в лёссовидном грунте, как и в песчаном, взрывная волна имеет скачок давления и скорости частиц на фронте на близких расстояниях от места взрыва. В качестве иллюстрации на фиг. 1 приводится осциллограмма скоростей частиц для значений R (сверху вниз), равных 10, 20 и 30. При этом период колебания отметчика времени T был равен 0.002 сек.



Фиг. 2

На фиг. 2 и 3 представлена зависимость от R радиальных и тангенциальных максимальных напряжений (фиг. 2) и импульсов (фиг. 3). Треугольниками с вершинами, обращенными вниз, обозначены результаты изменений при $C=0.2$ кг, точками — $C=1.6$ кг, треугольниками с вершинами, обращенными вверх, — $C=25$ кг, и квадратами $C=200$ кг. Затусованные знаки относятся к радиальным, а незатусованные — к тангенциальным напряжениям.

На приводимых графиках фиг. 2—11 по осям отложены величины в следующих единицах измерения: σ_m , T , p , σ в кг/см²; $J^0 = JC^{-1/3}$, $\theta^0 = \Theta C^{-1/3}$, $t^0 = tC^{-1/3}$, где J в кг сек/см², C в кг, Θ и t в сек; и D в м/сек.

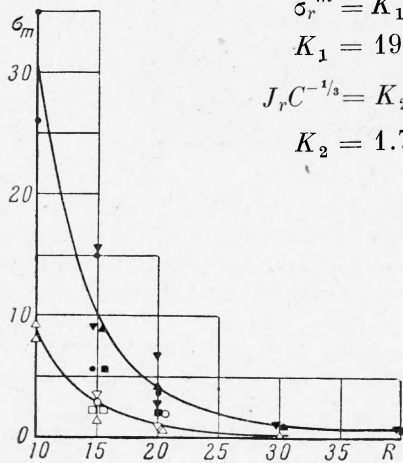
Зависимости, изображенные на фиг. 2 и 3, могут быть представлены в виде, удовлетворяющем принципу подобия

$$\sigma_r^m = K_1 R^{-\mu_1}, \quad \sigma_\theta^m = K_1' R^{-\mu_1} \quad (\text{кг/см}^2) \quad (1)$$

$$K_1 = 19.5 \cdot 10^3, \quad K_1' = 5.25 \cdot 10^3, \quad \mu_1 = 2.80$$

$$J_r C^{-1/3} = K_2 R^{-\mu_2}, \quad J_\theta C^{-1/3} = K_2' R^{-\mu_2} \quad (\text{кг сек/см}^2) \quad (2)$$

$$K_2 = 1.78, \quad K_2' = 0.62, \quad \mu_2 = 1.96$$



Фиг. 3

На фиг. 4 дана зависимость времени действия напряжений от R . Она может быть аппроксимирована соотношением

$$\theta C^{-1/3} = (4.1 + 0.6R) 10^{-3} \text{ сек кг}^{-1/3} \quad (3)$$

На фиг. 5, 6 приведены опытные данные о законе распространения максимальных напряжений и фронта упругой волны (фиг. 5) и максимальных напряжений в логарифмических координатах (фиг. 6). Обозначения значков для зарядов различного веса те же, что и на фиг. 2, 3; затусованные точки относятся к закону движения максимальных напряжений, незатусованные — к фронту упругой волны. Из фиг. 6 следует, что зависимость $t(R)$ может быть приближенно представлена в виде

$$t C^{-1/3} = K_3 (R - 1)^{\mu_3} \quad (\text{сек кг}^{-1/3})$$

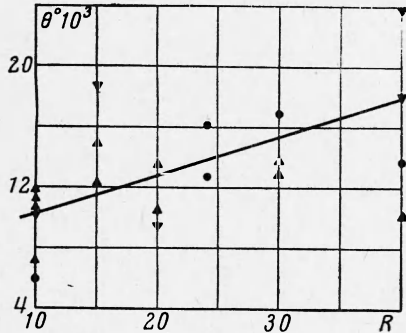
$$K_3 = 0.0732, \quad \mu_3 = 1.5 \quad \text{при } 15 \leq R \leq 40 \quad (4)$$

$$K_3 = 0.0186, \quad \mu_3 = 1.96 \quad \text{при } 7 \leq R \leq 12$$

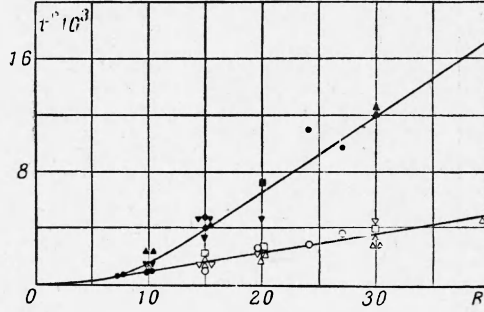
Дифференцируя (4) по t и учитывая, что $r_0 = 0.054 C^{1/3}$, получим выражение для определения скорости распространения максимальных напряжений в виде

$$D = \frac{54}{\mu_3 K_3} (R - 1)^{1-\mu_3} \quad (\text{м / сек}) \quad (5)$$

На фиг. 7 приведены данные о функции пластичности; на этой фигуре по



Фиг. 4



Фиг. 5

осям ординат и абсцисс отложены соответственно величины

$$T \equiv \sqrt{6J_2}, \quad p = -\frac{1}{3} (\sigma_r + 2\sigma_\theta)$$

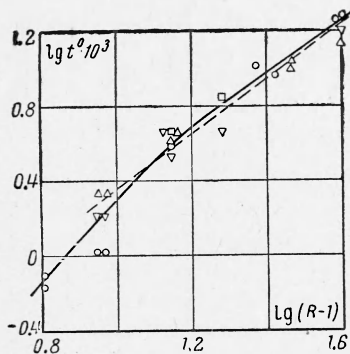
$$\left(J_2 \equiv \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}, \quad S_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij} \right)$$

J_2 — второй инвариант девиатора тензора напряжений, σ_{ij} — компоненты тензора напряжений, p — среднее давление.

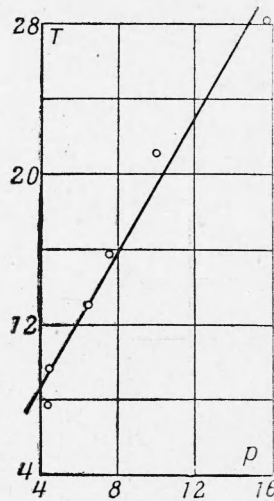
Для условий сферической симметрии

$$J_2 = 2 (\sigma_r - \sigma_\theta)^2$$

Обработка опытных данных показы-



Фиг. 6



Фиг. 7

вает, что условие пластичности для лёссовидного грунта может быть представлено в виде

$$J_2 = \frac{1}{6} (kp + b)^2 \quad (k = 1.8, \quad b = 1.2 - 1.5 \text{ кг / см}^2) \quad (6)$$

Опытные данные об изменении максимальных скоростей частиц (фиг. 8) аппроксимируются степенной зависимостью

$$u_m = K_4 R^{-1.4} \quad (\text{м сек}^{-1}) \quad (K_4 = 3940, \mu_4 = 2.41) \quad (7)$$

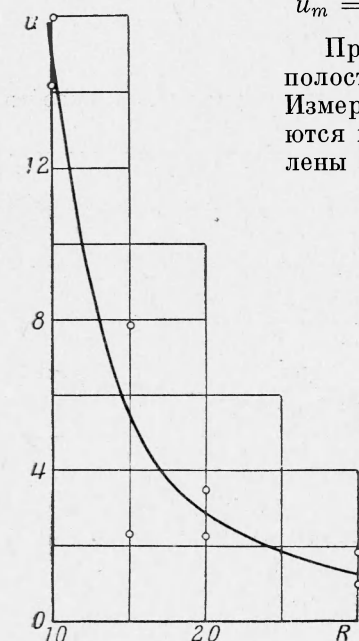
При проведении взрывов измерялись размеры полостей (газовых камер), образующихся в грунте. Измерения показали, что размеры полостей подчиняются геометрическому подобию и могут быть определены по формуле

$$r_k = 0.35 C^{1/3} \quad (C \text{ в кг, } r_k \text{ в м}) \quad (8)$$

Сопоставление размеров полостей при камуфлетных взрывах с размерами воронок при взрывах на выброс показало, что при глубинах заложения $h \geq 5 r_0$ часть воронки, лежащая ниже центра заряда, имеет вид полусферы, радиус которой равен радиусу полости при камуфлетном взрыве заряда того же веса.

Это свидетельствует о том, что полость при взрыве на выброс при $h \geq 5 r_0$ успевает развиться практически полностью, прежде чем газы из нее прорвутся в атмосферу.

3. Обсуждение результатов. Сопоставим результаты опытов в лёссовидном грунте с данными для песчаных грунтов, полученными ранее.



Фиг. 8

На фиг. 9 приведены экспериментальные графики зависимости радиальных напряжений σ_r^m от R . Кривая 1 относится к ненарушенному песчаному грунту с объемным весом скелета $\gamma = 1.50-1.52 \text{ г/см}^3$, $w = 15-17\%$; кривая 2 — к исследуемому лёссовидному грунту; кривая 3 — к нарушенному песчаному грунту для которого $\gamma = 1.30-1.40 \text{ г/см}^3$, $w = 15-17\%$.

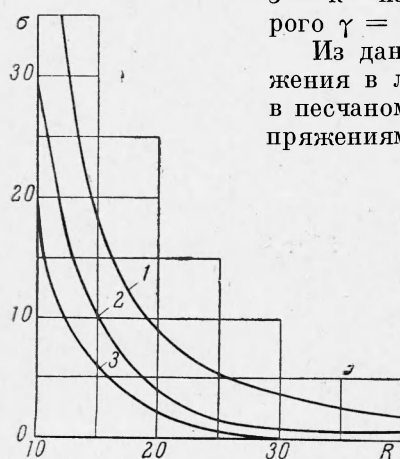
Из данных фиг. 9 следует, что значения напряжений в лёссовидном грунте ближе к напряжениям в песчаном грунте нарушенной структуры, чем к напряжениям в песке ненарушенной структуры.

На фиг. 10 приведены зависимости скоростей распространения максимальных напряжений от расстояния. Кривая 1 для ненарушенного песчаного грунта существенно отличается от кривой 2 для лёссовидного. Последняя близка к кривой 3, соответствующей песчаному грунту нарушенной структуры того же объемного веса.

Сопоставление данных о функции пластичности показывает, что в лёссовидном и песчаном грунтах значения коэффициента b отличаются в 3—4 раза (для нарушенных грунтов), а значения

k в ненарушенных лёссовидном и песчаном грунтах близки.

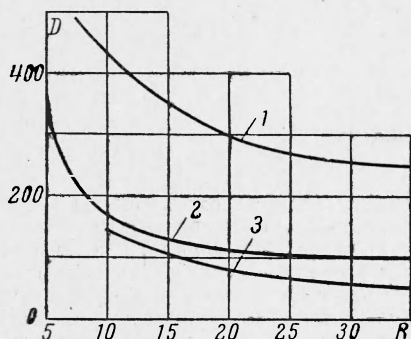
Сопоставление диаграмм объемного сжатия (фиг. 11) лёссовидного (кривая 2) и песчаного (кривые 1 и 3) грунтов, полученных при помощи



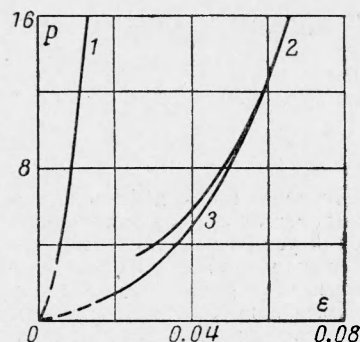
Фиг. 9

соотношений на фронте ударной волны [4], показывает, что сжимаемость этих грунтов близка при близких значениях γ и ω . (Характеристики грунтов, соответствующие кривым 1, 2, 3 на фиг. 10, 11, те же, что на фиг. 9.)

Так как в описываемых опытах измерялись, кроме напряжений, массовые скорости, представляет интерес сравнить максимальные напряже-



Фиг. 10



Фиг. 11

ния на фронте волны, непосредственно измеренные и вычисленные по значениям скоростей при помощи соотношений, необходимо выполняющихся на фронте ударной волны. Приводим значения напряжений σ_r^m , вычисленные для различных значений R по формуле $\sigma_r^{m*} = \rho \omega_m D$ по опытным данным для u_m и D , а также для сравнения данные, полученные в опытах путем непосредственных измерений

$R = 10$	12	15	20	30
$\sigma_r^{m*} = 37.0$	22.0	12.0	4.5	1.9
$\sigma_r^m = 30.0$	19.5	10.0	3.8	1.0

Из этих результатов следует, что соотношение на фронте ударной волны $\sigma_r^m = \rho \omega_m D$ достаточно хорошо удовлетворяется при $R \leq 15$. При $R \geq 20$ наблюдаются более значительные расхождения величин σ_r^{m*} и σ_r^m ; это следствие того, что при $R > 20$ взрывная волна в лёссовидном грунте не будет ударной.

Наконец отметим, что подтвержденная опытами применимость к лёссовидным грунтам принципа геометрического подобия свидетельствует [2] о незначительном влиянии скорости деформирования на напряженное состояние лёссовидного грунта в диапазоне исследованных расстояний и масштабов явления. Этот же вывод подтверждается соблюдением подобия в размерах полостей (см. формулу (8)).

Поступила 24 IV 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорян С. С. Об общих уравнениях динамики грунтов. Докл. АН СССР, 1959, т. 124, № 2.
2. Григорян С. С. Об основных представлениях динамики грунтов. ПММ, 1960, т. XXIV, вып. 6.
3. Алексеенко В. Д., Григорян С. С., Новгородов А. Ф., Рыков Г. В. Некоторые экспериментальные исследования по динамике мягких грунтов. Докл. АН СССР, 1960, т. 133, № 6.
4. Алексеенко В. Д., Григорян С. С., Кошелев Л. И., Новгородов А. Ф., Рыков Г. В. Измерение волн напряжений в мягких грунтах. ПМТФ, 1963, № 2.