

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЗРЫВЕ В ПЕСЧАНОМ ГРУНТЕ

Г. В. Рыков (Москва)

Экспериментальные исследования взрывных волн в песчаных грунтах проводились в работах [1-3], в которых исследовались радиальные составляющие поля напряжений [1] и поле скоростей в нарушенном грунте [2-3]. В работах [4-5] были сформулированы основные соотношения, характеризующие математическую модель мягкого грунта, и предложены методы их экспериментальной проверки. Такие опыты были осуществлены и некоторые их результаты опубликованы в работах [6-7].

Ниже приводятся дополнительные количественные данные, полученные при анализе результатов этих и некоторых новых опытов. Опыты проводились в 1959—1961 гг. в полевых условиях в песчаных грунтах ненарушенной структуры естественной влажности (по объему) $\alpha = 15-17\%$ и $\alpha = 10-12\%$ с объемным весом скелета $\gamma = 1.50-1.52 \text{ г/см}^3$ и гранулометрическим составом

Размер частиц, мм	>5	от 5.0	от 2.5	от 1.20	от 0.50	от 0.30	
Содержание фракций, %		до 2.5	до 1.2	до 0.50	до 0.30	до 0.15	<0.15
		0.30	0.20	4.70	61.0	30.0	3.80

Опыты проводились и в нарушенном песчаном грунте с объемным весом скелета $\gamma = 1.25-1.30 \text{ г/см}^3$ и $\gamma = 1.35-1.40 \text{ г/см}^3$ при $\alpha = 15-17\%$. Гранулометрический состав нарушенного грунта был тот же.

Метод проведения опытов описан в работах [6-7]. Отметим лишь, что центрально-симметрическое поле напряжений создавалось подрывом сосредоточенных зарядов тротила весом от 0.2 до 200 кг. Напряжения измерялись при помощи высокочастотных мембранных тензодатчиков с записью их сигналов на шлейфных осциллографах МПО-2 и Н-102.

В опытах измерялись радиальные σ_r и тангенциальные σ_θ главные нормальные напряжения как функции времени на разных расстояниях от заряда.

1. Ниже приводятся опытные данные об основных параметрах, характеризующих поле напряжений в песчаных грунтах.

На фиг. 1 представлены данные о зависимости максимальных напряжений σ_r^m , σ_θ^m от безразмерного расстояния $R_0 = r/r_0$ в песчаном грунте ненарушенной структуры ($\gamma = 1.50-1.52 \text{ г/см}^3$, $\alpha = 15-17\%$), полученные при взрывах зарядов различного веса; через $r_0 = 0.054 (c)^{1/3}$ обозначен радиус заряда, c — вес заряда в кг. Условные обозначения на этой фигуре приняты и для всех дальнейших, при этом темные точки относятся к радиальным напряжениям; светлые — к тангенциальным.

На фиг. 2 приведены данные о зависимостях напряжений ($\sigma_r^m(R_0)$ и $\sigma_\theta^m(R_0)$) для грунта нарушенной структуры ($\gamma = 1.25-1.40 \text{ г/см}^3$, $\alpha = 15-17\%$), а на фиг. 3 — данные о импульсах радиальных I_r и тангенциальных I_θ напряжений в грунтах ненарушенной структуры.

Опытные данные аппроксимируются формулами

$$\sigma_r^m = K_1 R_0^{-\mu_1} \text{кг/см}^2, \sigma_\theta^m = K_1' R_0^{-\mu_1} \text{кг/см}^2 \quad (1.1)$$

$$I_r^\circ = K_2 R_0^{-\mu_2} \text{кг/см}^2, I_\theta^\circ = K_2' R_0^{-\mu_2} \text{кг·сек/см}^2 \quad (1.2)$$

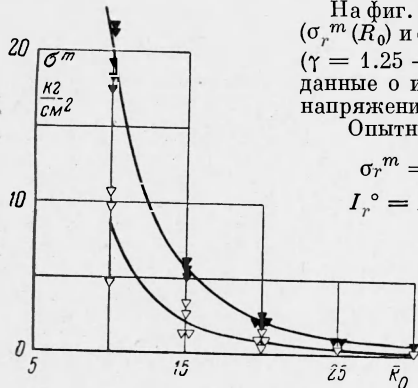
Здесь и дальше верхний индекс $^\circ$ означает, что данный параметр отнесен к масштабу явления, т. е. разделен на $c^{1/3}$.

Значения опытных коэффициентов $K_1, K_1', K_2, K_2', \mu_1, \mu_2$ приведены в табл. 1, где данные строк 1—3 относятся к песчаным грунтам ненарушенной структуры (строка 1 для $\gamma = 1.50-1.52 \text{ г/см}^3$, $\alpha = 15-17\%$; строка 2 для $\gamma = 1.50-1.52 \text{ г/см}^3$, $\alpha = 10-12\%$; строка 3 для



Фиг. 1

заряда, c — вес заряда в кг. Условные обозначения на этой фигуре приняты и для всех дальнейших, при этом темные точки относятся к радиальным напряжениям; светлые — к тангенциальным.



Фиг. 2

$\gamma = 1.50-1.55 \text{ г/см}^3$, $\alpha = 7-10\%$), а данные строк 4,5 к грунтам нарушенной структуры (строка 4 для $\gamma = 1.35-1.40 \text{ г/см}^3$, $\alpha = 15-17\%$; строка 5 для $\gamma = 1.25-1.30 \text{ г/см}^3$; $\alpha = 15-17\%$). В строке 3 приведены для сравнения данные по опытам работы [1].

Таблица 1

α_0 , м/сек	$\frac{K_1}{K_1'}$	μ_1	$\frac{K_2}{K_2'}$	μ_2	K_3	μ_3	$\frac{a}{a'}$	$\frac{\eta}{\eta'}$
350—400	$\frac{11.5 \cdot 10^3}{3.2 \cdot 10^3}$	2.36	$\frac{4.85}{1.74}$	1.53	0.0235	1.52	$\frac{17.5}{18.2}$	$\frac{0.57}{0.44}$
280—300	$\frac{15.8 \cdot 10^3}{4.6 \cdot 10^3}$	2.56	—	—	0.0270	1.57	—	—
180—200	$\frac{47.8 \cdot 10^3}{—}$	3.00	$\frac{2.39}{—}$	1.50	0.0169	1.80	—	—
130—150	$\frac{19.1 \cdot 10^3}{8.6 \cdot 10^3}$	3.00	$\frac{1.72}{0.92}$	1.32	0,0248	1.90	$\frac{2.5}{6.0}$	$\frac{2.5}{2.2}$
80—90	$\frac{19.1 \cdot 10^3}{8.6 \cdot 10^3}$	3.00	$\frac{1.72}{0.92}$	1.32	0.0292	2.00	$\frac{2.5}{6.0}$	$\frac{2.5}{2.2}$

На фиг. 4 приведены данные о законах распространения максимальных напряжений $t^\circ(R_0)$ и фронта упругих волн в грунтах нарушенной (кривые 1 для $\gamma = 1.25-1.30$ г/см³, $\alpha = 15-17\%$; кривые 2 для $\gamma = 1.35-1.40$ г/см³, $\alpha = 15-17\%$ и ненарушенной (кривая 3 для $\gamma = 1.50-1.52$ г/см³, $\alpha = 15-17\%$) структуры. Темные знаки относятся к закону распространения максимальных напряжений, светлые — к фронту упругих волн.



Фиг. 3

На фиг. 5 приведены данные о полном времени действия напряжения τ° на различных безразмерных расстояниях в грунтах нарушенной (кривая 1 для $\gamma = 1.25-1.40$ г/см³, $\alpha = 15-17\%$) и ненарушенной (кривая 2 для $\gamma = 1.50-1.52$ г/см³, $\alpha = 15-17\%$) структуры.

Соответствующие эмпирические формулы для зависимостей $t^\circ(R_0)$ и $\tau^\circ(R_0)$ имеют вид

$$t^\circ = K_3 (R_0^{\mu_3} - 1) \cdot 10^{-3} \text{ сек} / \text{кг}^{1/3} \quad (1.3)$$

$$\tau^\circ = (a + R_0) \cdot 10^{-3} \text{ сек} / \text{кг}^{1/3}$$

Здесь t° — время прихода фронта ударной волны или максимального напряжения в данную точку пространства; τ° — полное время действия напряжения в волне; K_3, μ_3, a, η — опытные коэффициенты (табл. 1). Заметим, что при определении величин τ° , а также величин импульсов $I_r^\circ, I_\theta^\circ$ (формулы (1.2), (1.3)) учитывался промежуток времени спада напряжения до 0.01 максимального значения. Формулы (1.1) — (1.3) получены в пределах $5 \leq R_0 \leq 50$ в грунтах ненарушенной структуры и в пределах $10 \leq R_0 \leq 50$ — в грунтах нарушенной структуры.

Дифференцируя (1.3) по t и учитывая, что $r_0^\circ = 0.054 \text{ мкг}^{-1/3}$, получим следующую формулу для определения скорости распространения максимальных напряжений:

$$D = \frac{54}{\mu_3 K_3 R_0^{\mu_3 - 1}} \frac{\text{м}}{\text{сек}} \quad (1.4)$$

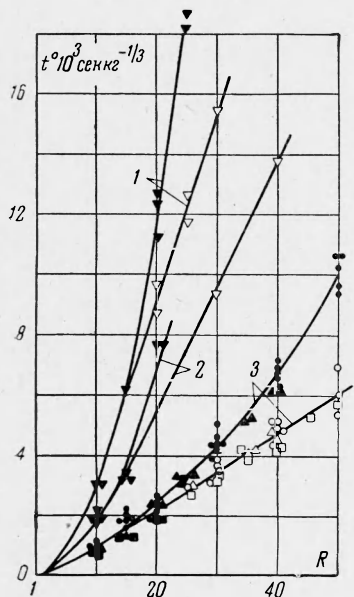
На фиг. 6, 7 нанесены экспериментальные кривые изменения σ_r^m и D в функции R_0 для песчаных грунтов ненарушенной (кривые 1 для $\gamma = 1.50-1.52$ г/см³, $\alpha = 15-17\%$; кривые 2 для $\gamma = 1.50-1.52$ г/см³, $\alpha = 10-12\%$; кривые 3 для $\gamma = 1.52-1.55$ г/см³, $\alpha = 7-10\%$) и нарушенной (кривая 4 фиг. 6 для $\gamma = 1.25-1.40$ г/см³, $\alpha = 15-17\%$; кривая 4 фиг. 7 для $\gamma = 1.40$ г/см³, $\alpha = 15-17\%$ и кривая 5 фиг. 7 для $\gamma = 1.25-1.30$ г/см³, $\alpha = 15-17\%$) структуры, построенные соответственно по формулам (1.1) и (1.4) с учетом данных табл. 1. Сопоставление кривых фиг. 6, 7 показывает, что с увеличением влажности от 7—10% до 15—17% в грунтах ненарушенной структуры максимальные напряжения и скорости их распространения D увеличиваются. При уменьшении объемного веса γ с 1.50—1.52 г/см³ до 1.25—1.40 г/см³ величины σ_r^m и D резко падают (в 2—3.5 раза).

Следует отметить, что в области, где имеют место волны с постепенным нарастанием напряжения до максимального значения, скорости распространения последних мало меняются при увеличении R_0 , в связи с чем время нарастания напряжения до максимального значения t_1° растет с ростом R_0 примерно по линейному закону. Заме-

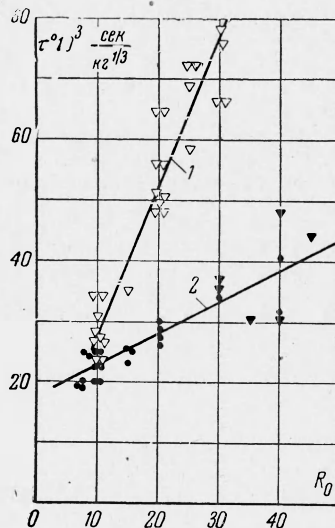
тим, что из данных фиг. 4, 5 следует, что время спада напряжения в волне за максимумом τ_1° растет с увеличением безразмерного расстояния также по линейному закону

$$\tau_1^\circ = (a' + \eta'R_0) \cdot 10^{-3} \text{ сек} / \text{кг}^{1/2} \quad (1.5)$$

Значения a' и η' приведены в табл. 1.



Фиг. 4



Фиг. 5

С уменьшением объемного веса скелета время τ° на одинаковых безразмерных расстояниях резко возрастает (фиг. 5), причем возрастают как времена нарастания t_1° , так и времена спада напряжений за максимумом τ_1° (последнее относится и к ударным волнам). Анализ опытных данных приводит к выводу, что ударные волны в песчаном грунте ненарушенной структуры имеют место при $R_0 \leq 20-25$. При $R_0 = 25-30$ впереди ударной волны распространяется упруго-пластическая волна, интенсивность которой составляет 0.10—0.15 от интенсивности ударной волны. Поэтому можно считать, что практически существование ударных волн имеет место вплоть до $R_0 = 30$. При $R_0 \geq 35-40$ наблюдаются непрерывные упруго-пластические волны. Аналогичное явление имеет место в грунтах нарушенной структуры. При этом пределы существования ударных волн составляют величину $R_0 \leq 15-20$, а непрерывных волн — $R_0 \geq 30-35$. Подобные же значения для нарушенного песчаного грунта приводились ранее в [2].

Изучение характера изменения напряжений за фронтом ударной сферической волны, а также за максимумом напряжения в непрерывной волне позволяет получить аналитическую зависимость в виде

$$\sigma(t) = \sigma_r^m \left(1 - \frac{t^\circ}{\tau_1^\circ}\right)^\lambda \quad (5 \leq R_0 \leq 40) \quad (1.6)$$

Величина λ определяется из условия

$$I_r^\circ = \int_0^{\tau_1^\circ} \sigma_r^m \left(1 - \frac{t^\circ}{\tau_1^\circ}\right)^\lambda dt^\circ \quad (1.7)$$

Отсюда

$$\lambda = \frac{\sigma_r^m \tau_1^\circ}{I_r^\circ} - 1$$



Фиг. 6

Подставляя в (1.7) значения σ_r^m , I_r° , τ_1° согласно (1.1), (1.2), (1.5), получим

$$\lambda = \frac{K_1}{K_2} \frac{(a' + \eta'R_0) 10^{-3}}{R_0^{\mu_1 - \mu_2}} - 1 \quad (1.8)$$

Из (1.8) и данных табл. 1 следует, что в грунтах ненарушенной структуры имеет место более резкое падение напряжений во времени, чем в грунте нарушенной структуры, при одинаковых величинах R_0 .

Приведенные выше формулы (1.1) — (1.3) получены в форме, удовлетворяющей закону простого геометрического подобия. Применимость формул (1.1) и первой из формул (1.3) была проверена при изменении масштаба моделирования ($c^{1/3}$) на один порядок (фиг. 1,4). Это свидетельствует на основании теории подобия [5,8] о несущественности влияния временных факторов типа вязкости при нагружении в пределах изменения C от 0.2 до 200 кг.

Заметим, что данные фиг. 1, 4, полученные при взрыве зарядов $C = 1.6$ кг, относятся к глубинам заложения, $h = 30-40 r_0$. Остальные данные фиг. 1, 4 для зарядов $C = 0.2, 25$ и 200 кг получены при взрывах на глубине $h = 8 r_0$.

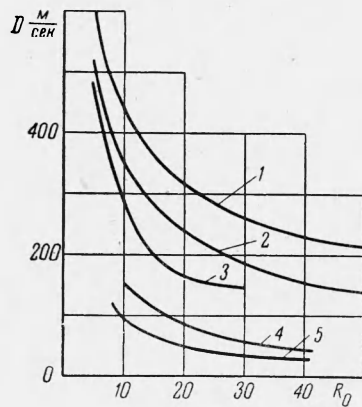
Совпадение максимальных напряжений и времени их прихода на соответствующих безразмерных расстояниях при камуфлетных взрывах ($h = 30-40 r_0$) и при взрывах на выброс (при $h = 8 r_0$) свидетельствует о том, что выброс грунта и прорыв газов из каверны на поверхность, а также волны разрежения, идущие от поверхности, не оказывают заметного влияния на максимальные параметры волн напряжений вплоть до $R_0 = 30-40$ (при $h \geq 8 r_0$). Однако в этих же случаях параметры волны напряжений за максимумом, как показывает анализ опытных данных, существенно изменяются.

2. Опытные данные о $\sigma_r^m(R_0)$, $\sigma_\theta^m(R_0)$ и $D(R_0)$ позволяют сделать ряд выводов об объемах деформаций песчаных грунтов при действии взрыва.

Используя законы сохранения массы и импульса на фронте ударной волны, получим

$$\theta_* \equiv 1 - \frac{\rho_0}{\rho_*} = - \frac{\sigma_r^m}{\rho_0 D_*} = \varphi(R_0^*) \quad (2.1)$$

где ρ_0 и ρ_* — начальная и текущая плотность грунта. Значок * показывает, что данные величины относятся к фронту ударной волны.



Фиг. 7

Подставляя в (2.1) значения σ_r^m и D согласно (1.1) и (1.4), получим

$$\varphi(R_0^*) = \theta_1 (R_0^*)^{-n} \quad \left(\theta_1 = \frac{K_1}{\rho_0} \left(\frac{\mu_3 K_3}{54} \right)^2, \quad n = \mu_1 - 2(\mu_3 - 1) \right) \quad (2.2)$$

Значение коэффициентов θ_1 и n для песчаных грунтов ненарушенной и нарушенной структуры приводятся в табл. 2, где характеристики грунтов для каждой из строк соответствуют 1, 2, 4 и 5 строкам табл. 1.

Учитывая далее, что $p = -1/3 (\sigma_r + 2\sigma_\theta)$, используя формулы (1.1) и исключая из них и из (2.2) R_0 , получим диаграмму объемного сжатия при нагружении в следующем виде (фиг. 8)

$$p_* = m \theta_*^v \quad (2.3)$$

где

$$m = \frac{1 + 2\xi}{3} K_1 \theta^{-\mu_1/n}, \quad \xi = \frac{3\sqrt{2} + 2k}{3\sqrt{2} - k}, \quad v = \left(1 - \frac{2(\mu_3 - 1)}{\mu_1} \right)^{-1}$$

Значения коэффициентов m и v приводятся в табл. 2. Формула (2.3) получена в пределах $4 \leq p \leq 130$ кг/см² — для грунтов ненарушенной структуры и в пределах $2 \leq p \leq 12$ кг/см² — для грунтов нарушенной структуры.

Из табл. 2 и фиг. 8 следует, что с увеличением влажности от 10—17% сжимаемость песчаных грунтов ненарушенной структуры (кривая 1 для $\gamma = 1.50-1.52$ г/см³, $\alpha = 15-17\%$; кривая 2 для $\gamma = 1.50-1.52$ г/см³, $\alpha = 10-12\%$) уменьшается. Нарушение струк-

Таблица 2

θ_1	n	$m, \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$	v	k	$b, \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$
0.30	1.33	$50.0 \cdot 10^3$	1.79	1.90—1.95	0.50
0.60	1.42	$21.1 \cdot 10^3$	1.80	1.80—1.90	0.40
0.92	1.20	$15.1 \cdot 10^3$	2.50	1.23—1.25	0.00
1.49	1.00	$3.72 \cdot 10^3$	3.00	1.23—1.25	0.00

туры грунта и уменьшение объемного веса (кривая 3 для $\gamma = 1.35-1.40 \text{ г/см}^3$, $\alpha = 15-17\%$; кривая 4 для $\gamma = 1.25-1.30 \text{ г/см}^3$, $\alpha = 15-17\%$) приводит к значительному увеличению сжимаемости грунта. Так при изменении γ от $1.50-1.52 \text{ г/см}^3$ до $\gamma = 1.25-1.30 \text{ г/см}^3$ (примерно на $15-17\%$) сжимаемость грунта возрастает в $10-15$ раз.

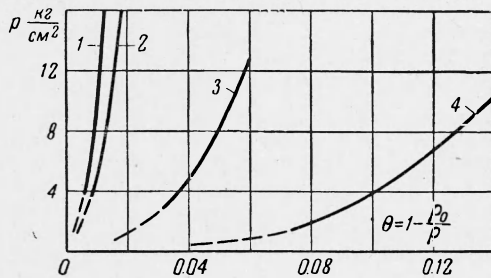
Одновременное измерение радиальных и тангенциальных напряжений позволило получить условие пластичности для песчаных грунтов в следующем виде

$$J_2 = 1/6 F^2(p) = 1/6 (kp + b)^2 \quad (p = -1/3 \sigma_{ii}) \quad (2.4)$$

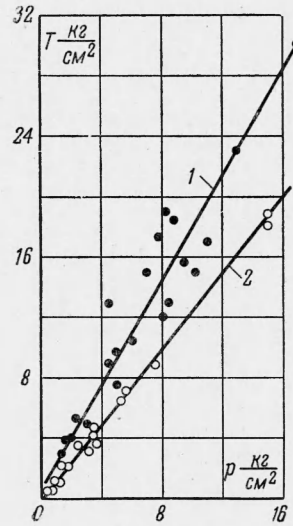
Здесь k , b — константы (табл. 2), характеризующие трение и сцепление в грунте;

$$I_2 = 1/2 S_{ij} S_{ij}, \quad S_{ij} = \sigma_{ij} + p \delta_{ij} \quad (ij = 1, 2, 3)$$

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; p — среднее гидростатическое давление.



Фиг. 8



Фиг. 9

В работах [6,7] приведены данные о проверке соотношения (2.4) в различных условиях сферической, цилиндрической и осевой симметрии, а также при взрывах зарядов различного веса в грунтах ненарушенной структуры. На фиг. 9 приводится сопоставление данных о зависимости $T = \sqrt{6} I_2 = F(p)$, полученных в песчаных грунтах ненарушенной (кривая 1 для $\gamma = 1.50-1.52 \text{ г/см}^3$) и нарушенной (кривая 2 для $\gamma = 1.25-1.40 \text{ г/см}^3$) структуры с одинаковым гранулометрическим составом и естественной влажностью $15-17\%$. Как видно из фиг. 9, зависимость (2.4) остается справедливой и для песчаных грунтов нарушенной структуры, при этом в последнем случае величина $b = 0$, а величина k несколько уменьшается (табл. 2), что свидетельствует об уменьшении сил внутреннего трения.

Автор признателен С. С. Григоряну за руководство работой, В. Д. Алексеенко, А. И. Кошелеву и А. Ф. Новгородову — за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований.

Поступила 19 IV 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхов Г. М., Покровский Г. И. Взрывные волны в грунтах. Госгортехиздат, 1962.
2. Родионов В. Н., Ромашов А. Н., Сухотин А. П. Взрыв в уплотняющейся неограниченной среде. Докл. АН СССР, 1958, т. 123, № 4.
3. Цветков В. М. О взрыве в песчаном грунте. ПМТФ, 1962, № 5.
4. Григорян С. С. Об общих уравнениях динамики грунтов. Докл. АН СССР, 1959, т. 124, № 2.
5. Григорян С. С. Об основных представлениях динамики грунтов. ПММ, 1960, т. XXIV, вып. 6.
6. 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.
7. Алексеенко В. Д., Григорян С. С., Кошелев Л. И., Новгородов А. Ф., Рыков Г. В. Измерение волн напряжений в мягких грунтах. ПМТФ, 1963, № 2.
8. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. Гостехтеоретиздат, 1957.