

Полученные результаты могут оказаться полезными при инженерных расчетах. В заключение авторы благодарят Е. Д. Федина за помощь, оказанную при постановке эксперимента.

Поступила 19 VII 1965

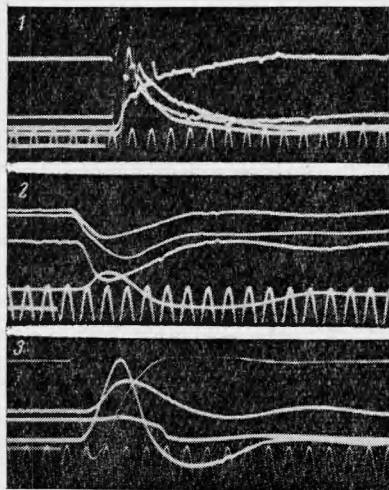
ЛИТЕРАТУРА

1. An explosive sheet material for hardning and forming metals. Mashinery, 1959, vol. 95, № 2447, p. 697—698.
2. Дубнов Л. В., Пукров В. А. Исследование детонации листовых зарядов ВВ, ПМТФ, 1964, № 6.
3. Яковлев Ю. С. Гидродинамика взрыва. Судпромгиз, 1961.
4. Адушкин В. В. О формировании ударной волны и разлете продуктов взрыва в воздухе, ПМТФ, 1963, № 5.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕССОВОГО ГРУНТА РАЗЛИЧНОЙ ВЛАЖНОСТИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВЗРЫВА

В. В. Мельников, Г. В. Рыков
(Москва)

В работе [1] изложены результаты экспериментальных исследований сферических взрывных волн в лессовом грунте ненарушенной структуры естественной влажности. Ниже приводятся результаты аналогичных исследований, проводившихся в тех же грунтах, но с различной влажностью ($w = 19-21\%$ и $22-25\%$ при $\delta = 1.34-1.38 \text{ г/см}^3$, где w — весовая влажность, δ — объемный вес скелета грунта). Опыты проводились по методике, описанной ранее [2-3]. Главные нормальные напряжения, радиальные и тангенциальные, измерялись как в [1-3] при помощи высокочастотных мембранных тензодатчиков с записью их сигналов на осциллографах МПО-2 и Н-102. Скорости частиц измерялись датчиками, представлявшими собой соленоид в металлическом корпусе со свободно перемещающимся внутри соленоида цилиндрическим постоянным магнитом. Различная влажность грунта ненарушенной структуры достигалась путем предварительного замачивания его на специально подготовленных площадках, причем обеспечивалось проведение опытов в зоне равномерного увлажнения. Часть опытов проводилась в грунте нарушенной структуры ($\delta = 1.30-1.34 \text{ г/см}^3$ при $w = 19-21\%$). Опытные данные были обработаны методом наименьших квадратов.



Фиг. 1

1. На фиг. 1 представлены осциллограммы записей напряжений и скоростей частиц грунта, соответствующие взрыву заряда весом $C = 0.2 \text{ кг}$ в лессовом грунте ненарушенной структуры при $w = 19-21\%$ на глубине $h/r_3 = 20$, где $r_3 = 0.054 \text{ с}^{1/3}$ — радиус заряда и h — расстояние от поверхности земли до центра заряда. Первый и второй лучи первой осциллограммы (счет ведется сверху вниз) соответствуют радиальному напряжению σ_r и тангенциальному напряжению σ_α на расстоянии $R = 10$; третий и четвертый лучи σ_r и σ_α на расстоянии $R = 15$. Здесь $R = r/r_3$ — безразмерное расстояние от центра взрыва. Пятый луч обозначает отметку взрыва.

Первый и второй лучи второй осциллограммы соответствуют σ_r и σ_α на расстоянии $R = 20$; третий и четвертый — σ_r и σ_α на расстоянии $R = 30$. На третьей осциллограмме первый, второй и третий лучи соответствуют скорости частиц грунта на расстояниях $R = 10, 20$ и 30 . Период колебания отметки времени равен 0.002 сек .

Из приведенных осциллограмм видно, что в лессовом грунте повышенной влажности ударные волны имеют место, как и в лессовом грунте естественной влажности ($w = 13-14\%$), только на достаточно близких расстояниях до $R = 10-15$ при напряжениях $\sigma_r > 15-20 \text{ кг/см}^2$. На более далеких расстояниях при $\sigma_r < 15-20 \text{ кг/см}^2$

взрывные волны имеют вид волн сжатия с постепенным нарастанием напряжения до максимального значения. Аналогичное явление имеет место в лессовом грунте нарушенной структуры.

Анализ опытных данных показал, что закономерности затухания взрывных волн в лессовых грунтах различной влажности в целом аналогичны [1-3] и описываются одними и теми же эмпирическими формулами. В частности, для максимальных напряжений и удельных импульсов имеем:

$$\sigma_r^m = K_1 \cdot R^{-\mu_1} \text{ кг/см}^2$$

$$\sigma_\alpha^m = K_1' \cdot R^{-\mu_1} \text{ кг/см}^2 \quad (1.1)$$

$$I_r^0 = K_2 \cdot R^{-\mu_2} \text{ кгсек}^2 / \text{см}^2 \text{кг}^{1/3}$$

$$I_\alpha^0 = K_2' \cdot R^{-\mu_2} \text{ кгсек}^2 / \text{см}^2 \text{кг}^{1/3} \quad (1.2)$$

где σ_r^m и σ_α^m — соответственно максимальные радиальные и тангенциальные нормальные напряжения, I_r^0 и I_α^0 — соответственно удельные импульсы радиальных и тангенциальных напряжений.

Здесь и далее верхний индекс «0» означает, что данная величина разделена на масштаб явления, т. е. на $C^{1/3}$, где C — вес заряда ВВ в кг.

Приводим значения опытных коэффициентов $K_1, K_1', \mu_1, K_2, K_2'$ и μ_2 :

K_1	K_1'	μ_1	K_2	K_2'	μ_2	ξ
$9.0 \cdot 10^3$	$3.6 \cdot 10^3$	2.42	7.40	2.96	1.61	0.40
$10.2 \cdot 10^3$	$4.6 \cdot 10^3$	2.43	4.26	1.92	1.35	0.45
$7.1 \cdot 10^3$	$3.5 \cdot 10^3$	2.39	2.88	1.44	1.15	0.50

Здесь и далее в значениях коэффициентов первая строка соответствует ненарушенному лессовому грунту при влажности $w = 19-21\%$; вторая строка — $w = 22-25\%$; третья строка — нарушенному лессовому грунту с $\delta = 1.30-1.34 \text{ г/см}^3$ при $w = 19-21\%$.

Сопоставление аналогичных данных и работы [1] показывает, что максимальные радиальные напряжения при повышении влажности меняются незначительно; нарушение структуры приводит к уменьшению напряжений на соответствующих расстояниях по сравнению с грунтом ненарушенной структуры той же влажности. При этом величина коэффициента бокового давления $\xi = \sigma_\alpha^m / \sigma_r^m$ возрастает с повышением влажности и нарушением структуры грунта. Величины импульсов I_r^0 и I_α^0 также возрастают с увеличением влажности и нарушением структуры грунта.

На фиг. 2 приводятся годографы фронтов ударных волн и максимальных напряжений. Точками обозначены опытные данные, относящиеся к грунту ненарушенной структуры с $w = 19-21\%$; треугольниками — с $w = 22-25\%$. Квадратами обозначены опытные данные, относящиеся к грунту нарушенной структуры¹ с $w = 19-21\%$. Каждая из этих кривых аппроксимируется как и в [1] двумя эмпирическими формулами:

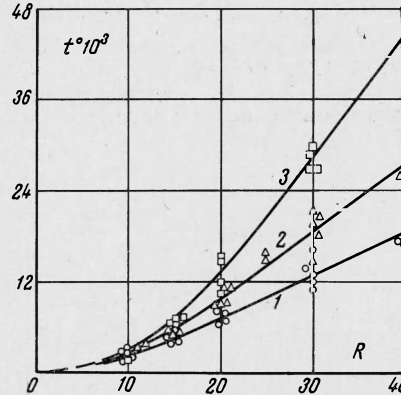
$$t^0 = K_3 \cdot (R^{\mu_3} - 1) \cdot 10^{-3} \text{ сек} / \text{кг}^{1/3}, \quad 10 \leq R \leq 25 \quad (1.3)$$

$$t^0 = (a_1 + \eta_1 R) \cdot 10^{-3} \text{ сек} / \text{кг}^{1/3}, \quad 25 \leq R \leq 40 \quad (1.4)$$

где t^0 — время прихода фронта волны (или максимального напряжения) в данную точку пространства; K_3, μ_3, a_1 и η_1 — опытные коэффициенты.

K_3	μ_3	a_1	η_1	$a_0, \text{ м/сек}$	a_2	η_2
0.1150	1.40	-4.25	0.585	360	16.50	0.500
0.0665	1.66	-9.40	0.930	372	13.55	0.865
0.0371	1.96	-19.85	1.605	126	22.00	1.600

¹ Аналогичные обозначения сохраняются на всех последующих графиках.



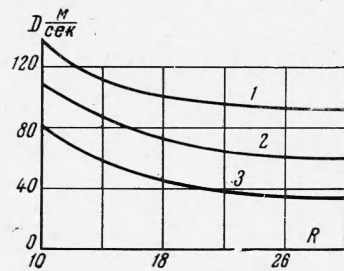
Фиг. 2

Дифференцируя (1.3) и (1.4) по t , получим, как и в [1, 3], формулы для определения скорости распространения ударной волны (или максимальных напряжений)

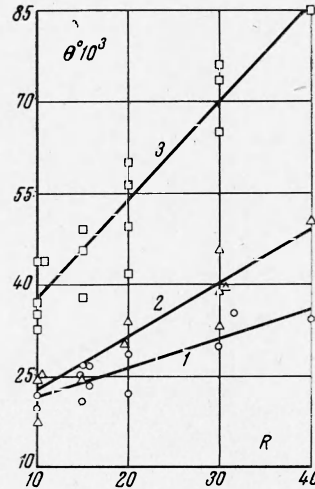
$$D = \frac{54}{\mu_3 K_3 R^{\mu_3 - 1}}, \quad \frac{м}{сек} \quad 10 \leq R \leq 25 \quad (1.5)$$

$$D = \frac{54}{\eta_1}, \quad \frac{м}{сек} \quad R \geq 25 \quad (1.6)$$

Графики скоростей, соответствующие формуле (1.5), (1.6), приведены на фиг. 3. Как следует из фиг. 3 и [1], скорости распространения фронта ударной волны и максимальных напряже-



Фиг. 3



Фиг. 4

ний уменьшаются с увеличением влажности грунта от $w = 12-13\%$ до $w = 22-25\%$ в 1.5-2 раза.

При нарушении структуры грунта (кривые 1, 3 фиг. 3) скорость распространения максимальных напряжений убывает также в 2 раза. Скорости упругих волн a_0 с увеличением влажности возрастают мало — от $a_0 = 350$ м / сек для грунта с влажностью $w = 12-13\%$ [1] до $a_0 = 372$ м / сек для грунта с влажностью $w = 22-25\%$.

На фиг. 4 приведены опытные данные об изменении с расстоянием времени действия волны θ^0 , которые хорошо аппроксимируются линейным законом [3]

$$\theta^0 = (a_2 + \eta_2 R) 10^{-3} \text{ сек} / \text{кг}^{1/3} \quad (1.7)$$

Значения опытных коэффициентов a_2 и η_2 приведены выше. Как видно из фиг. 4, с увеличением влажности, и особенно нарушением структуры, время действия возрастает.

На фиг. 5, 6 приводятся опытные данные об изменении с удалением от центра взрыва максимальных скоростей частиц грунта (фиг. 5) и максимальных смещений грунта (фиг. 6). Соответствующие эмпирические формулы имеют вид:

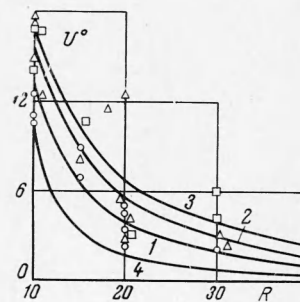
$$V_m = K_4 R^{-\mu_4} \text{ м} / \text{сек}, \quad U_m = K_5 \cdot R^{-\mu_5} \text{ см} / \text{кг}^{1/3} \quad (1.8)$$

Здесь K_4 , μ_4 , K_5 и μ_5 — опытные коэффициенты

K_4	μ_4	K_5	μ_5	k	b
$1.46 \cdot 10^3$	1.94	6.82	1.72	1.41	1.20
$1.58 \cdot 10^3$	1.88	6.55	1.60	1.23	0.50
$1.05 \cdot 10^3$	2.70	3.64	1.34	1.06	0.40

На фиг. 6 для сопоставления приведена кривая смещений 4 для грунта с влажностью $w = 12-13\%$ [1]. Анализ данных для лессовых грунтов различной влажности показывает, что на подобных расстояниях при увеличении влажности с $w = 12-13\%$ до $w = 22-25\%$ смещения в таких грунтах возрастают в 2-4 раза.

2. На основании полученных данных о полях напряжений и скоростей частиц можно сделать ряд выводов о сжимаемости и пластических свойствах данных грунтов [1-3].



Фиг. 6

Используя законы сохранения массы и импульса на фронте ударной волны, получим аналогично [3] диаграмму объемного сжатия при нагружении:

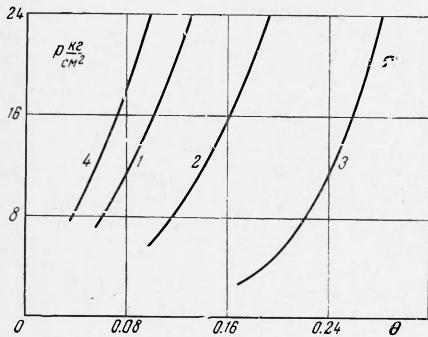
$$p_* = m \cdot \varepsilon_*^v, \quad m = \frac{1 + 2\xi}{3} \cdot K_1 \cdot \varepsilon_1^{-v_1/n}, \quad \varepsilon_1 = \frac{K_1}{\rho_0} \left(\frac{\mu_3 \cdot K_3}{54} \right)^2$$

$$\rho_0 = (1 + 0.01 w) \cdot \frac{\delta}{g}; \quad n = \mu_1 - 2(\mu_3 - 1), \quad v = \frac{\mu_1}{\eta} \quad (2.1)$$

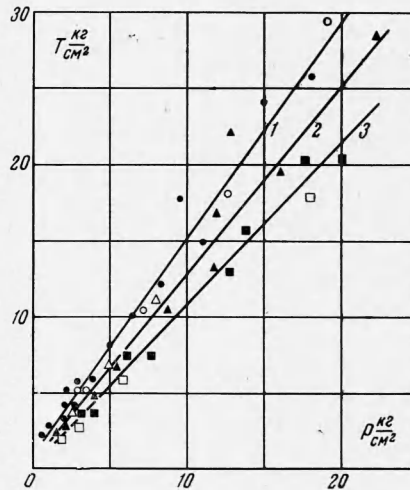
Здесь ρ_0 — начальная плотность грунта.

На фиг. 7 приведены графики, построенные по формуле (2.1) для всех рассматриваемых случаев. Как видно из фиг. 7, изменение влажности оказывает существенное влияние на сжимаемость лессового грунта. Так, при изменении влажности с $w = 13-14\%$ (кривая 4) до $w = 22-25\%$ (кривая 3), деформации увеличились в 2-3 раза (при $p = 8-24 \text{ кг/см}^2$). При нарушении структуры грунта сжимаемость возрастает в 3-4 раза (при $p = 8-24 \text{ кг/см}^2$).

Очевидно, в данном случае в наибольшей степени проявляется такая отличительная особенность лессовых грунтов по сравнению с другими нескальными грунтами, как способность этих грунтов давать весьма значительные осадки и просадки. При кратковременных динамических нагрузках не удается проследить за развитием просадки, которая столь типична для лессов при постоянных статистических нагрузках, но протекает обычно в гораздо больший промежуток времени. По-видимому, рассматривая



Фиг. 7



Фиг. 8

поведение лессовых грунтов при динамических нагрузках, не следует выделять просадку в самостоятельную характеристику, а необходимо рассматривать лишь общую деформативную способность лессовых грунтов.

Анализ данных измерений радиальных и тангенциальных напряжений показал, что условие пластичности для лессового грунта различной влажности имеет, как и ранее в [1-3], вид:

$$I_2 = \frac{1}{6} F^2(p) = \frac{1}{6} (kp + b)^2 \quad (2.2)$$

Здесь k и b — опытные коэффициенты, характеризующие внутреннее трение и сцепление в грунте. $I_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}$; $S_{ij} = \sigma_{ij} + p\delta_{ij}$ ($i, j = 1, 2, 3$), σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; $p = -\frac{1}{3} \sigma_{ii}$ — среднее гидростатическое давление.

На фиг. 8 приведены опытные данные о зависимости $T = \sqrt{6I_2}$ и p для рассматриваемых случаев. Загущенные знаки относятся к опытным точкам, соответствующим нагружению; не загущенные — к разгрузке.

Анализ графиков фиг. 8 показывает, что с увеличением влажности величины коэффициентов внутреннего трения k и сцепления b уменьшаются. Нарушение структуры грунта приводит к еще более резкому уменьшению этих коэффициентов.

Существенно отметить, что и при нагружении и при разгрузке условие пластичности совпадает.

Авторы признательны С. С. Григоряну за участие в опытах и в обсуждении результатов настоящей работы, Г. М. Ляхову и С. Д. Мизякину за помощь в организации и проведении опытов.

Поступила 14 VI 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорян С. С., Ляхов Г. М., Мельников В. В., Рыков Г. В. Взрывные волны в лессовом грунте. ПМТФ, 1963, № 4.
2. Алексеенко В. Д., Григорян С. С., Кошелев Л. И., Новгородов А. Ф., Рыков Г. В. Измерение волн напряжений в мягких грунтах. ПМТФ, 1963, № 2.
3. Рыков Г. В. Экспериментальное исследование поля напряжений при взрыве в песчаном грунте. ПМТФ, 1964, № 1.

ИСПРАВЛЕНИЯ К ОБЗОРУ «МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТРЕЩИН, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ», ПМТФ, 1961, № 4

Г. И. Баренблатт

(Москва)

При подготовке монографии по хрупкому разрушению мною было замечено, что формулы (5.40) и (5.42) для примера трещины в полосе, поддерживаемой равными и противоположно направленными сосредоточенными силами, находящимися на расстоянии одна от другой, содержат ошибку. Правильный вид этих формул таков

$$\frac{P}{K\sqrt{L}} = \left(\frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi l}{L} (1 + \alpha^2) \right)^{1/2} \left[\operatorname{ch} \frac{\pi s}{2L} + \frac{(1 + \nu)}{1 + \alpha^2} \frac{\pi s}{4L} \operatorname{sh} \frac{\pi s}{2L} \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi l}{2L} \right]^{-1} \quad (5.40)$$

$$\frac{P}{K\sqrt{L}} = 2 \left(\frac{1}{\pi} \operatorname{cotg} \frac{\pi l}{2L} \right)^{1/2} \quad (5.42)$$

Указанная ошибка связана с неправильным вычислением сумм одного ряда в работе [1]: правильная формула для распределения напряжений в указанной задаче имеет вид

$$p(x) = \frac{P}{2\pi} \left\{ \left(\frac{\pi}{2L} \operatorname{sh} \frac{\pi s}{L} \right) \frac{1}{H} - (1 + \nu) \frac{\pi^2}{4L^2} s \left(\operatorname{sh} \frac{\pi s}{L} \right) \frac{1}{H} + \right. \\ \left. + (1 + \nu) \frac{\pi^2}{8L^2} s \left(\operatorname{sh}^2 \frac{\pi s}{L} \right) \frac{1}{H^2} \right\}, \quad H = \sin^2 \frac{\pi x}{2L} + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi s}{2L}$$

Кроме того, в формуле (5.10) пропущена двойка в числителе правой части. Следует отметить также, что здесь, как и при рассмотрении аналогичных конфигураций в статьях [1, 2], взяты распределения напряжений, отвечающие плоскому напряженному состоянию. Формулы для плоской деформации получаются подстановкой вместо ν величины $\nu / (1 - \nu)$.

Поступила 15 XI 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Баренблатт Г. И. и Черепанов Г. П. О влиянии границ тела на развитие трещин хрупкого разрушения. Изв. АН СССР. ОН. Механика и машиностроение, 1960, № 3.
2. Баренблатт Г. И. О равновесных трещинах, образующихся при хрупком разрушении. Прямолинейные трещины в плоских пластинках. ПММ, 1960, т. 23, вып. 4.