

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА

Г. М. Ляхов

(Москва)

Динамические задачи, связанные с распространением волн в неводонасыщенных грунтах и их взаимодействием с преградами и элементами сооружений, в настоящее время решаются на основе моделей, в которых учитываются пластические, но не учитываются вязкие свойства грунтов [1-5]. Анализ опытных данных и сопоставление их с результатами расчета [4,5] свидетельствует о допустимости применения к грунтам модели упруго-пластической среды при решении задач о взаимодействии волн и сооружений. В то же время угасание плоских волн в грунтах происходит интенсивнее, чем это следует из расчетов, выполненных на основе моделей упруго-пластической среды. Например, если в песчаном насынном грунте в сечении, принимаемом за начальное, максимальное напряжение в волне  $\sigma_m = 11 \text{ кг/см}^2$ , а ее длительность  $\theta = 8 \text{ мсек}$ , то на расстоянии 25 см расчеты дают  $\sigma_m = 9.5 \text{ кг/см}^2$ , а опыт  $\sigma_m = 5 \text{ кг/см}^2$ . Если в начальном сечении  $\sigma_m = 20 \text{ кг/см}^2$ ,  $\theta = 6 \text{ мсек}$ , то на расстоянии 35 см, расчет дает  $\sigma_m = 17 \text{ кг/см}^2$ , а опыт  $\sigma_m = 9 \text{ кг/см}^2$ . В расчетах разгрузка принималась происходящей при постоянной деформации. Это отклонение результатов расчета от опыта следует объяснить, в первую очередь, зависимостью диаграммы  $\sigma(\epsilon)$  от скорости деформирования  $\dot{\epsilon}$ , что не учитывается в модели упруго-пластической среды. Вязкие свойства обуславливают дополнительные потери энергии и более интенсивное угасание волн.

Экспериментально зависимость кривых  $\sigma(\epsilon)$  от скорости деформирования исследовалась для многих грунтов [5-8]. Динамическая нагрузка на образец создавалась телом, падавшим с высоты или разгонявшимся каким-либо методом.

Ниже приводятся результаты опытов по определению вязких свойств грунта при обжатии образца воздушной ударной волной. Получены кривые сжатия и приближенные численные значения коэффициента вязкости.

1. Экспериментальное определение вязких свойств грунта. Обычно динамические свойства исследуются при ударе об образец грунта тела, сбрасываемого с высоты или ускоряемого какой-либо силой. В этом случае нарастание нагрузки кратковременно, но за ним следует и быстрая разгрузка. Применение воздушной ударной волны разной длительности для сжатия грунта позволило получить разгрузку, протекающую в заданное время.

В опытах проводилось сжатие среднезернистого песка в цилиндре с гладкими стенками. Внутренний диаметр цилиндра 24 см. Грунт сверху накрывался легким алюминиевым диском толщиной 0.2 см. На фиг. 1 он изображен цифрой 1. Воздушная волна, двигаясь по ударной трубе, в опытах первой серии дважды проходила над диском до и после отражения от стенки, закрывающей трубу. Поэтому нагрузка на диск достигала максимума за два скачка примерно за 3 мсек. Меняя расстояние цилиндра от стенки, можно изменять время нарастания нагрузки на диск.

Во второй серии опытов воздушная волна отражалась непосредственно от диска, нагрузка возрастала практически мгновенно. Деформация грунта в обоих случаях определялась по смещению диска, регистрировавшемуся во времени. Изменение давления в воздушной волне фиксировалось датчиком 3, а в грунте — датчиками 2, 4, 5.

Опыты проводились при толщине слоя грунта  $h$  в цилиндре равной 5 и 9 см. Различий в значениях исследуемых величин при разных  $h$  не наблюдалось. В опытах первой серии объемный вес скелета составлял  $\gamma = 1.55-1.60 \text{ г/см}^3$ , влажность  $w = 3-8\%$ , скорость распространения максимума напряжения  $c = 100 \text{ м/сек}$ . В опытах второй серии  $\gamma = 1.50-1.55 \text{ г/см}^3$ ,  $w = 5-10\%$ ,  $c = 80 \text{ м/сек}$ .

На фиг. 2 представлены графики зависимостей  $\sigma(t)$  и  $\epsilon(t)$ , построенные по одному из опытов первой серии. В остальных опытах наблюдался примерно такой же ход этих кривых.

Некоторые средние экспериментальные данные по опытам первой серии приведены в табл. 1.

Таблица 1

$\sigma_m \text{ кг/см}^2$	$\tau \text{ мсек}$	$t^* \text{ мсек}$	$\epsilon(\tau)100$	$\epsilon(t^*)100$	$\epsilon+100$	$\dot{\epsilon} \text{ сек}^{-1}$
1.8	8	13	1.3	2.0	1.7	1.6
2.7	5	10	2.2	2.7	2.2	2.7
3.9	5	12	2.4	3.5	2.6	2.9
6.0	5	10	4.3	5.6	4.3	5.6

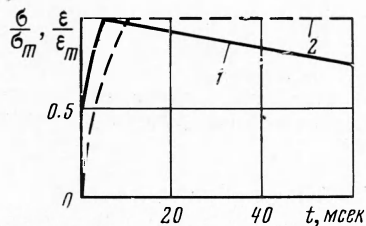
Здесь  $\sigma_m$  — максимальное напряжение в грунте, соответствующее оси цилиндра,  $\tau$  — время нарастания напряжения,  $t^*$  — время нарастания деформации,  $\varepsilon^+$  — остаточная деформация,  $\dot{\varepsilon}$  — средняя скорость деформации при  $t \leq t^*$ .

Длительность воздушной волны составляла 200—250 мсек.

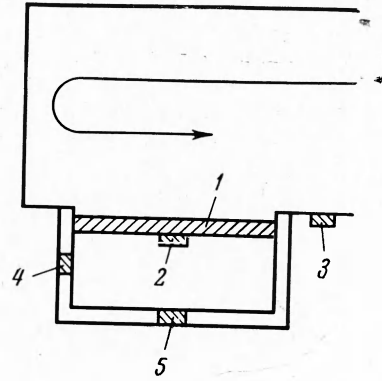
На фиг. 3 представлены экспериментальные графики зависимости  $\sigma(\varepsilon)$ , соответствующие четырем значениям максимального напряжения. Незаштрихованные точки соответствуют максимуму напряжения, заштрихованные — максимуму деформации. Здесь, а также на фиг. 4 и 5, по оси ординат отложено напряжение в  $\text{кг}/\text{см}^2$ . Из графиков следует, что кривые  $\sigma(\varepsilon)$  при нагрузке волнаты относительно оси деформаций. В момент достижения максимального напряжения деформация составляет 0.6—0.8 максимальная. После достижения максимума напряжения в течение нескольких  $\text{сек}^{-3}$  наблюдается ползучесть грунта — деформации растут, напряжение за это время убывает мало и зависимость  $\sigma(\varepsilon)$  практически параллельна оси деформации. При дальнейшем падении напряжения до значения, примерно равного 20—40% максимального, деформация, достигнув максимального значения, практически не меняется и лишь затем начинает убывать. Остаточные деформации составляют 0.7—0.9 максимальных.

На фиг. 4 и 5 представлены графики  $\sigma(\varepsilon)$ , полученные в опытах второй серии, когда нагрузка на грунт возрастала практически скачком. Фиг. 4 соответствуют первичным, а фиг. 5 — повторным опытам, проводившимся без переукладки грунта после первого опыта. Давление в воздушной волне при повторных опытах было примерно таким же, как и при соответствующих первичных.

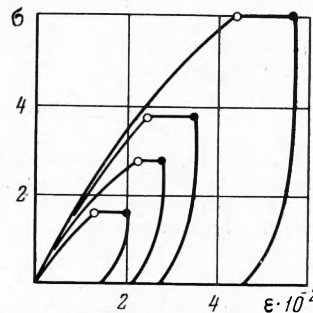
Кривые  $\sigma(\varepsilon)$  на фиг. 4 и 5 выпуклы относительно оси  $\varepsilon$ . Это отличие от кривых фиг. 3 объясняется более быстрым возрастанием нагрузки в опытах второй серии. Величины деформаций, по сравнению с графиками на фиг. 3, увеличились, что связано с меньшей плотностью грунта. Из сопоставления графиков на фиг. 4 и 5 следует, что при повторном сжатии грунта воздушной ударной волной деформации немного уменьшаются, соответствующая кривая  $\sigma(\varepsilon)$  приближается к оси напряжений.



Фиг. 2



Фиг. 1



Фиг. 3

Незаштрихованные точки на фиг. 4 и 5 определяют кривые, которые в первом приближении соответствуют первичному (фиг. 4) и повторному (фиг. 5) динамическому (ударному) сжатию грунта при скорости деформации  $\dot{\varepsilon} \rightarrow \infty$ . По заштрихованным точкам также может быть проведена кривая, которую можно рассматривать как предельную (статическую) при рассматриваемом режиме падения давления в воздушной волне. Таким образом, при повторном сжатии различия между кривыми динамического и статического сжатия сохраняются.

**2. Определение коэффициента вязкости.** Существование на кривой  $\sigma(\varepsilon)$  участка роста деформации при убывании напряжения подтверждает наличие у грунта вязких свойств. В первом приближении, помимо кривых динамического и статического сжатия, эти свойства характеризуются еще коэффициентом вязкости  $\eta$ .

Для определения приближенного численного значения  $\eta$  сопоставим экспериментальные значения  $\varepsilon(\tau)$ ,  $t^*$ ,  $\varepsilon(t^*)$  с расчетными, полученными в соответствии с моделью грунта, предложенной в работе [5]. Расчеты проведем при разных значениях  $\eta$ . Подбирается значение  $\eta$ , в наибольшей мере отвечающее опыту.

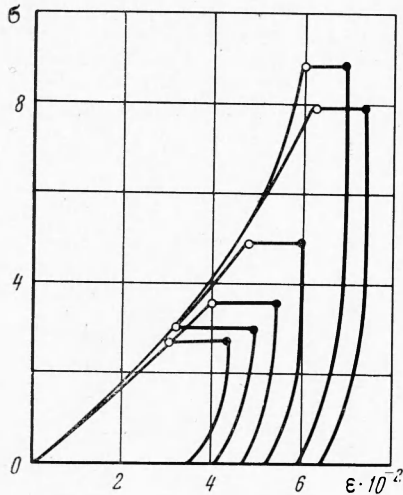
В соответствии с [5], зависимость  $\sigma(\epsilon)$  при ударном и статическом сжатиях принимается линейной

$$\sigma = E_1 \epsilon \text{ при } \dot{\epsilon} \rightarrow \infty, \quad \sigma = E_2 \epsilon \text{ при } \dot{\epsilon} \rightarrow 0 \quad (2.1)$$

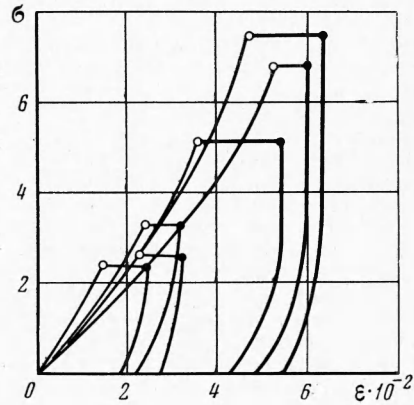
Коэффициент вязкости постоянен. Предел упругости равен нулю.

Деформацию элемента среды  $\epsilon$  представим в виде суммы

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$$



Фиг. 4



Фиг. 5

В период нарастания напряжения эти величины определяются уравнениями

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1}, \quad \sigma = E_3 \epsilon_2 + \eta \dot{\epsilon}_2, \quad \frac{1}{E_3} = \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \quad (2.2)$$

Тогда общая деформация элемента среды

$$\dot{\epsilon} + \mu \epsilon = \frac{\dot{\sigma}}{E_1} + \frac{\mu \sigma}{E_2}, \quad \mu = \frac{E_3}{\eta} \quad (2.3)$$

При уменьшении напряжения принимается, что  $\epsilon_1$  убывает по закону, отличному от (2.1), что обуславливает наличие остаточных деформаций грунта

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_m}{E_1} - \frac{\sigma_m - \sigma}{E^*}, \quad E^* > E_1 \quad (2.4)$$

где  $\sigma_m$  — максимальное значение достигнутого напряжения.

При уменьшении напряжения  $\epsilon_2$  может или нарастать или оставаться постоянной. Если  $\dot{\epsilon}_2 > 0$ , то ее изменение по-прежнему определяется вторым из уравнений (2.2). Тогда общая деформация элемента среды

$$\dot{\epsilon} + \mu \epsilon = \frac{\dot{\sigma}}{E^*} + \frac{\mu \sigma (E_3 + E^*)}{E_3 E^*} + \frac{E^* - E_1}{E_1 E^*} \mu \sigma_m \quad (2.5)$$

При дальнейшем уменьшении напряжения, когда  $\epsilon_2 = \text{const}$ , общая деформация определяется уравнениями

$$\sigma - \sigma^{(1)} = E^* (\epsilon_1 - \epsilon_1^{(1)}), \quad \epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (2.6)$$

где  $\sigma^{(1)}$  и  $\epsilon_1^{(1)}$  соответствуют максимуму  $\epsilon_2$ .

Физически  $\epsilon_1$  выражает деформацию, обусловленную сжатием водных пленок и пленок солей, расположенных между зернами грунта, и отдельных выступов зерен. Эта деформация включает обратимую (упругую) и необратимую (пластическую) части. Деформация  $\epsilon_2$  соответствует смещению зерен, процессу их более плотной укладки, протекающему в течение конечного времени. Эта деформация принимается необратимой, так как в неводонасыщенных грунтах при не слишком больших напряжениях вода и воздух, заключенные в порах, расширяясь при разгрузке, не могут преодолеть силы трения между твердыми зернами и вернуть их в исходное положение, что имеет место в водонасыщенных грунтах. Таким образом, модель [5] учитывает некоторые специфические свойства грунта и этим отличается от других моделей вязких сред.

В опытах первой серии напряжение в грунте нарастало примерно по линейному закону

$$\sigma = \sigma_m \frac{t}{\tau}, \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (2.7)$$

Если известен закон нарастания напряжения, то (2.3) представляет собой дифференциальное уравнение

$$\dot{\varepsilon} + \mu\varepsilon + Bt + D = 0, \quad B = -\frac{\mu\sigma_m}{E_2\tau}, \quad D = -\frac{\sigma_m}{E_1\tau} \quad (2.8)$$

Интегрируя, получим зависимость деформации от времени в виде

$$\varepsilon(t) = -\frac{D}{\mu} - \frac{B}{\mu^2}(\mu t - 1) + N e^{-\mu t}, \quad N = -\frac{B}{\mu^2} + \frac{D}{\mu} \quad (2.9)$$

При  $t \geq \tau$  напряжение убывало также примерно по линейному закону

$$\sigma = \sigma_m \frac{\theta - t}{\theta - \tau} \quad (2.10)$$

Подставляя это выражение в (2.5), получим дифференциальное уравнение вида (2.8), интегрируя которое, найдем зависимость деформации от времени в виде (2.9), при этом

$$B = \frac{\mu\sigma_m(E^* + E_3)}{E^*E_3(\theta - \tau)}, \quad D = \frac{\sigma_m}{E^*(\theta - \tau)} - \frac{\mu\sigma_m(E^* + E_3)\theta}{E_3E^*(\theta - \tau)} - \frac{E^* - E_1}{E_1E^*} \mu\sigma_m$$

$$N = \left[ \varepsilon(\tau) + \frac{D}{\mu} + \frac{B}{\mu^2}(\mu\tau - 1) \right] e^{\mu\tau}$$

Зная зависимость  $\varepsilon(t)$ , найдем момент времени  $t^*$ , когда деформация  $\varepsilon$  достигает максимума

$$t^* = -\frac{1}{\mu} \ln \frac{-B}{N\mu^2} \quad (2.11)$$

Таблица 2

$\sigma_m$ кг/см <sup>2</sup>	$\mu$ сек <sup>-1</sup>	$t^*$ msec	$\varepsilon(\tau)100$	$\varepsilon(t^*)100$
2.7	200	22	2.3	3.2
	500	12	2.7	3.2
	1000	8.6	3.0	3.3
6	500	11.7	6.0	7.3

В табл. 2 приведены результаты расчета величин  $\varepsilon(\tau)$ ,  $t^*$ ,  $\varepsilon(t^*)$ , выполненного в соответствии с приведенными уравнениями при нескольких значениях  $\mu$ . Плотность и скорость распространения пластических деформаций взяты теми же, что и в грунтах, с которыми проводились опыты. При этом  $E^* = 4E_1$ ,  $2E_2 = E_1$ .

Из сопоставления данных, приведенных в табл. 1 и 2, следует, что экспериментальные и расчетные значения оказываются наиболее близкими при  $\mu = 500$  сек<sup>-1</sup>. Изменение  $\mu$  на несколько десятков и даже сотен единиц оказывает, однако, малое влияние на значения  $\varepsilon(\tau)$ ,  $t^*$ ,  $\varepsilon(t^*)$ . Поэтому значение  $\mu = 500$  сек<sup>-1</sup> является приближенным.

Зная  $\mu$ , найдем соответствующее значение коэффициента вязкости исследованного грунта:

в системе СИ

$$\eta = \frac{E_3}{\mu} = 3.2 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{мсек}}$$

в системе CGS

$$\eta = 3.2 \cdot 10^5 \text{ пз}$$

Автор благодарит А. И. Шишкина за участие в опытах.

Поступила 23 XII 1966

#### ЛИТЕРАТУРА

- Чедвик П., Кокс А., Гопкинс Г. Механика глубинных подземных взрывов. Изд-во «Мир», 1966.
- Зволинский Н. В. Об излучении упругой волны при сферическом взрыве в грунте. ПММ, 1960, т. 24, вып. 4.
- Григорян С. С. К решению задачи о подземном взрыве в мягких грунтах. ПММ, 1964, т. 28, вып. 6.
- Ляхов Г. М. Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах. Изд-во «Недра», 1964.
- Ляхов Г. М., Полякова Н. И. Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. Изд-во «Недра», 1967.
- Хархута Н. Я., Евлев В. М. Реологические свойства грунтов. Автотрансиздат, 1961.
- Мельников В. В., Рыков Г. В. О влиянии скорости деформирования на сжимаемость лессовых грунтов. ПМТФ, 1965, № 2.
- Ставицер Л. Р. Исследование динамической сжимаемости грунтов. Сб. трудов НИИ Оснований, Стройиздат, 1966, № 56.