

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЖИМАЕМОСТИ
ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ
И УСЛОВИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ
ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ**

А. И. Котов, З. В. Нарожная, Г. В. Рыков, В. П. Сутырин

(Москва)

1. Экспериментальные исследования образцов песчаных грунтов с объемным весом $\gamma_0 = 1,50$ г/см³, влажностью $w = 0,003$ (воздушно-сухой грунт) и 0,05; 0,15 проводились на установке квазистатического типа, аналогичной по конструкции, описанной ранее в [1]. Установка представляет вертикально стоящий цилиндр с размещенным в нем в специальном кольце образцом грунта диаметром $D_0 = 150$ мм и высотой $h_0 = 30$ мм и поршня, передающего на образец грунта ударную нагрузку. При помощи резиновых прокладок и изменения высоты сбрасывания груза создавались различные режимы деформирования образцов. Кроме того, проводились статические испытания образцов при скорости деформирования $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3} - 0,5 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹. Каждый образец подвергался трехкратному нагружению. Предусматривалось пятикратное повторение опытов в одних и тех же условиях (серия опытов).

Главные напряжения в образце $\sigma_1(t)$ и $\sigma_2(t)$ регистрировались с помощью тензометрических датчиков, установленных в центре поршня, в центре и крае дна цилиндра (четыре датчика) и в боковой поверхности кольца (два датчика). С помощью тензометрического стакана регистрировалось также общее усилие, передаваемое на образец при ударе.

Тензометрические датчики для измерения напряжений имели диаметр чувствительного элемента (круглой тошкой пластинки, защемленной по контуру) $d = 22$ мм и толщину $\delta = 2-4$ мм. Систематические погрешности измерений напряжений такими датчиками в исследуемом диапазоне нагрузок были исследованы в [3] и не превышали в опытах $\pm 3-5\%$.

Сопоставление показаний датчиков, установленных в центре поршня, в центре и крае дна цилиндра, свидетельствует об их совпадении с точностью до случайных погрешностей измерений. Аналогичный вывод сделан относительно данных о напряжениях $\sigma_1(t)$, получаемых путем измерений общего усилия, передаваемого на образец при ударе. Поэтому в дальнейшем все датчики для измерения напряжений $\sigma_1(t)$ обрабатывались как равноправные. Тем самым предполагалось, что напряжения по высоте образца и по его диаметру распределены равномерно.

Деформации образца измерялись с помощью трех тензометрических датчиков перемещений, установленных под углами 120° (в плоскости образца). Датчик перемещений состоял из двух консолей, жестко укрепленных в нижней части цилиндра. Между консолями перемещался клин, соединенный с подвижным поршнем установки. На консоли наклеивались тензомеры, сигналы которых пропорциональны перемещению поршня.

Деформация определялась в квазистатическом приближении соотношением $\epsilon(t) = u(t)/h_0$, где $u(t)$ — перемещение поршня. Регистрируемые напряжения $\sigma_{1i}(t)$, $\sigma_{2i}(t)$ и деформации $\epsilon_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, l$, l — количество измерений в выборке) представляют некоторые реализации случайных процессов. При обработке результатов совокупность этих реализаций

при фиксированных моментах времени t_j ($j = 1, 2, \dots, n$) рассматривалась как система случайных величин. Здесь n — количество равных интервалов Δt , на которые разбивался весь процесс для каждого из датчиков в опытах данной серии. Величина интервалов Δt составляла $\Delta t = (0,25-1,0)10^{-3}$ с в зависимости от длительности нагрузки в серии. Для каждого из моментов t_j ($j=1, 2, \dots, n$) в серии опытов производилась проверка гипотезы о нормальном распределении напряжений $\sigma_1(t_j)$, $\sigma_2(t_j)$ и деформаций $\varepsilon(t_j)$ с помощью критерия Уилка W [4].

w	Номер нагружения	k	r	r_1	r_2	ξ
0,003	1	0,893	0,664	-0,106	0,912	0,550
	2	1,183	0,881	0,421	0,970	0,461
	3	1,200	0,567	-0,799	0,975	0,455
0,05	1	1,493	0,972	0,831	0,992	0,379
	2	1,595	0,942	0,674	0,986	0,354
	3	1,649	0,979	0,869	0,995	0,341
0,15	1	1,559	0,914	0,549	0,979	0,361
	2	1,763	0,960	0,761	0,990	0,320
	3	1,782	0,945	0,790	0,991	0,315

Затем для каждой из случайных величин $\sigma_1(t_j)$, $\sigma_2(t_j)$, $\varepsilon(t_j)$ ($j = 1, 2, \dots, n$) производились оценки параметров распределения (математического ожидания и дисперсии) методом доверительных интервалов с помощью распределения Стюдента и распределения χ^2 соответственно [5, 6].

Если вычисленное значение W оказывалось меньше 5% критического значения, принятого по таблице для данной выборки, то вероятность того, что выборка взята из совокупности, распределенной по нормальному закону, не превышала 0,05. В этих случаях гипотеза о нормальном распределении должна быть отвергнута.

Воспользовавшись для представления закона распределения случайной величины рядом Грама-Шарлье [5], можно показать, что в случае малой асимметрии ($A \leq 0,5-0,8$) распределение можно приближенно приписать нормальным. При $A > 0,5-0,8$ распределение значительно отличается от нормального. При обработке опытов в качестве критического принималось $A = 0,7$.

Следует отметить, что последнее обстоятельство является существенным только при оценке точности определения дисперсии. Оценка математического ожидания в данных опытах во всех случаях может быть с достаточной точностью произведена на основе закона о нормальном распределении среднего арифметического в связи с достаточным объемом выборки [5, 6].

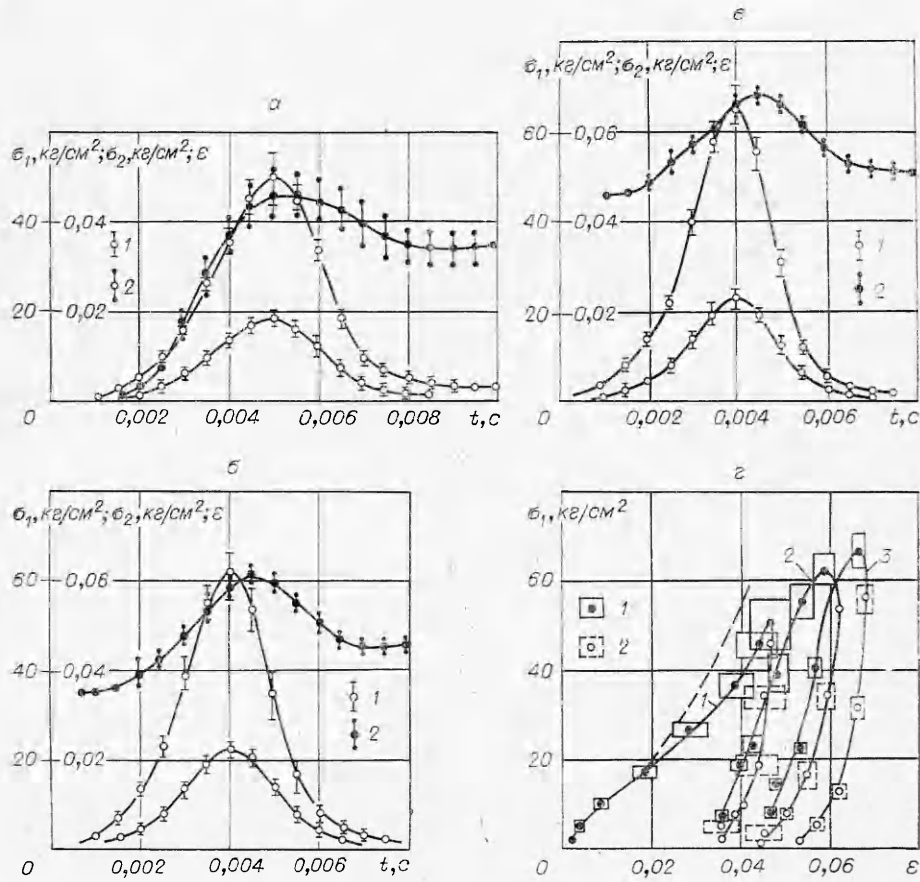
Оценка доверительных интервалов для линейной регрессии при определении условия пластичности производилась с помощью распределения Стюдента, а при оценке доверительных интервалов для коэффициентов корреляции использовалось преобразование Фишера [5].

2. На фиг 1, а — в приведены результаты измерений напряжений $\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$ и деформаций $\varepsilon(t)$ при трех последовательных нагружениях образцов песчаного грунта с $\gamma_0 = 1,50$ г/см³, $w = 0,05$. Фиг 1, а — в соответствуют первому, второму и третьему нагружениям. Обозначения

$$I - \text{средние арифметические значения напряжений } \sigma_1(t_j) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \sigma_{1i}(t_j),$$

$$\sigma_2(t_j) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \sigma_{2i}(t_j), \quad 2 - \text{деформаций } \varepsilon(t_j) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \varepsilon_i(t_j) \text{ с соответствующими доверительными интервалами } \pm I_\beta, \text{ определенными с надежностью } \beta = 0,9.$$

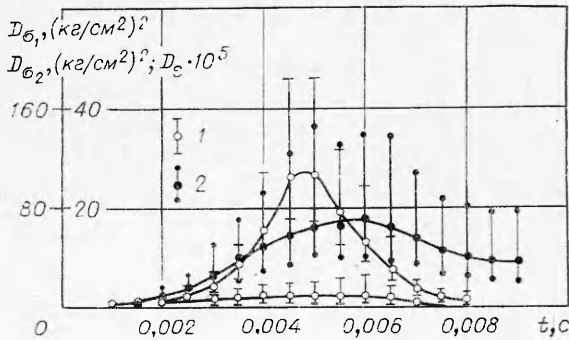
Относительные доверительные интервалы для средних арифметических $\alpha(\sigma_{1j}) = \pm I_\beta(\sigma_{1j})/\sigma_{1j}$, $\alpha(\sigma_{2j}) = \pm I_\beta(\sigma_{2j})/\sigma_{2j}$, $\alpha(\varepsilon_j) = \pm I_\beta(\varepsilon_j)/\varepsilon_j$, как



Фиг. 1

следует из данных фиг. 1, а—в, составляют $\alpha = \pm(0,10 - 0,15)$ при $0,0025 \leq t \leq 0,0075$ с для напряжений и при $0,003 \leq t \leq 0,010$ с для деформаций.

В начальные и конечные моменты времени (в последнем случае для напряжений) величины α могут быть больше в связи с невозможностью обеспечить одинаковую точность измерений для малых и больших значений измеряемой величины с помощью одного и того же датчика.



Фиг. 2

На фиг. 2 приведены результаты оценки дисперсий напряжений $D_{\sigma_1}(t_j)$, $D_{\sigma_2}(t_j)$ и деформаций $D_{\epsilon}(t_j)$, соответствующих данным фиг. 1. Обозначения 1, 2 — оценки дисперсий напряжений и деформаций с соответствующими доверительными интервалами, определенными с надежностью $\beta = 0,9$. Из фиг. 2 следует, что для основной части процесса для напряжений и деформаций коэффициенты вариации составляли $k_v = (0,20 - 0,30)$.

Таким образом, серия из 5 опытов позволила существенно увеличить точность эксперимента (до двух раз). Оценки соответствующих параметров распределения для других случаев аналогичны. Несколько меньшая точность получена для воздушно-сухого грунта.

Гипотеза о законе нормального распределения для измеряемых величин $\sigma_1(t_j)$, $\sigma_2(t_j)$, $\epsilon(t_j)$, как показали оценки с помощью W , не может быть отвергнута для основной части процесса для исследованных грунтов при различных режимах деформирования. Исключения в ряде случаев составляют начальные и конечные моменты времени, где точность измерений мала.

На фиг. 1, *г* по данным фиг. 1, *а* — *в* построены путем исключения времени t кривые $\sigma_1(\epsilon)$ для первого, второго и третьего нагружений (кривые 1—3 соответственно). Точки 1 соответствуют нагружению ($\partial\sigma_1/\partial t > 0$), точки 2 — разгрузке ($\partial\sigma_1/\partial t < 0$). Из этих результатов видно, что кривые $\sigma_1(\epsilon)$ при повторных нагружениях не совпадают с линиями предыдущей разгрузки. Доля остаточных деформаций ϵ_0 по отношению к максимальным ϵ_* при повторных нагружениях убывает: $\epsilon_0/\epsilon_* = 0,72$ при первом нагружении, 0,44 и 0,25 при втором и третьем нагружениях.

На фиг. 1, *г* штриховая кривая, полученная с использованием законов сохранения на фронте ударной волны при $\epsilon = \infty$ [3, 7], соответствует результатам полевых исследований в близком по характеристикам грунте ($\gamma_0 = 1,48$ г/см³, $w = 0,05$).

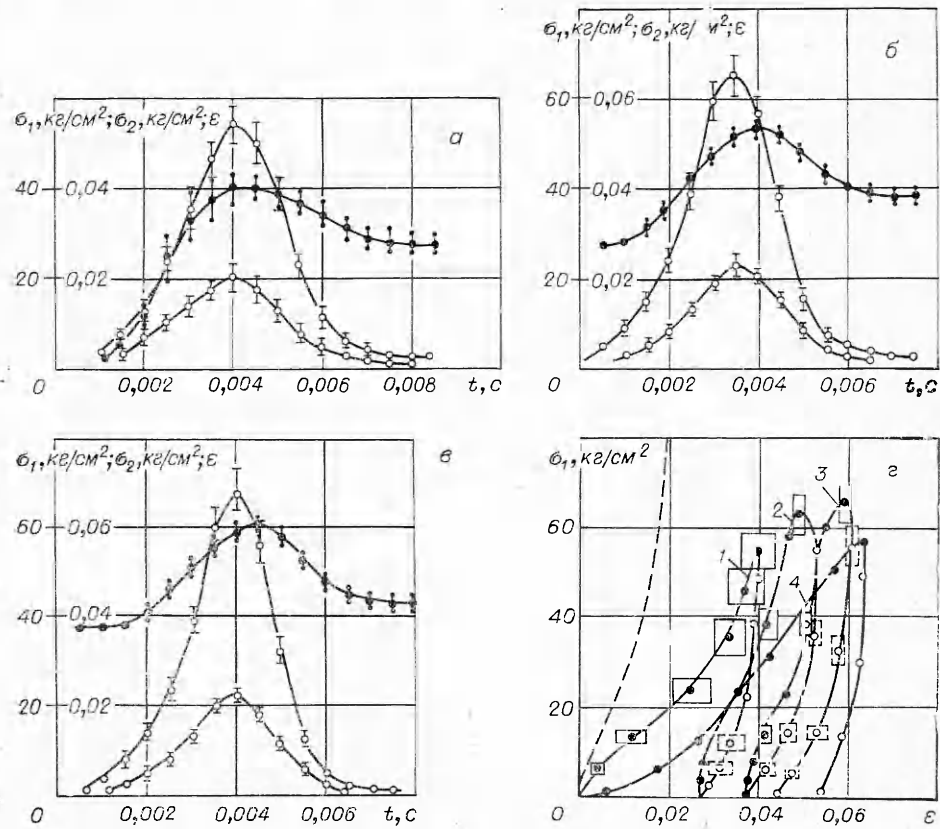
Представленные результаты с достаточной надежностью подтверждают опубликованные ранее данные [1] с существенным влиянием скорости деформирования (вязкости) на сжимаемость песчаных грунтов естественной влажности. При этом было отмечено также значительное влияние влажности песчаного грунта на его вязкопластические свойства.

В частности, для образцов $w = 0,003$ (воздушно-сухие образцы) в пределах точности эксперимента при максимальных нагрузках до 50 кг/см² и при средних скоростях деформирования $\dot{\epsilon} \leq 17 - 20$ с⁻¹ не удалось обнаружить эффектов влияния скорости деформирования на сжимаемость грунта. Для образцов с $w = 0,05$, как видно из фиг. 1, *г*, это влияние становится существенным.

На фиг. 3, *а* — *в* показаны кривые $\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$, $\epsilon(t)$, полученные для образцов с $\gamma_0 = 1,50$ г/см³, $w = 0,15$ при тех же условиях нагружения, что для кривых фиг. 1.

Кривые $\sigma_1(\epsilon)$ для этих случаев (1—3) представлены на фиг. 3, *г*; штрихом, как и ранее, показана кривая $\sigma_1(\epsilon)$, $\epsilon = \infty$, соответствующая результатам полевых исследований в аналогичном грунте ($\gamma_0 = 1,50 - 1,52$ г/см³, $w = 0,12 - 0,15$) по данным [7]. Кривая 4 соответствует данным статических испытаний при $\dot{\epsilon} = 0,5 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹. Различия в деформациях, соответствующих предельным диаграммам ($\dot{\epsilon} = 0,5 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹ и $\dot{\epsilon} = \infty$) при $\sigma_1 = 20 - 60$ кг/см², составляет в данном грунте 300%. При $w = 0,05$ это различие не более 200% (фиг. 5). Таким образом, при увеличении влажности до $w = 0,15$ роль эффектов вязкости в песчаном грунте возросла по сравнению с грунтом при $w = 0,05$. Величины отношения ϵ_0/ϵ_* при $w = 0,15$ при трех последовательных нагружениях несколько уменьшились и составили соответственно 0,65; 0,37 и 0,24.

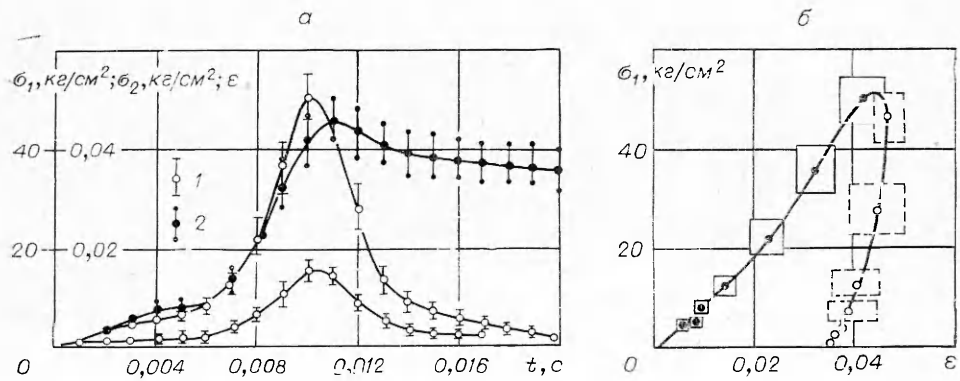
При увеличении длительности воздействия отмечены факты существенного вырастания деформаций при разгрузке по напряжениям ($\partial\sigma_1/\partial t < 0$). В частности, на фиг. 4, *а*, *б* представлены кривые $\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$, $\epsilon(t)$ (фиг. 4, *а*) и $\sigma_1(\epsilon)$ (фиг. 4, *б*) при однократном нагружении песчаного грун-



Фиг. 3

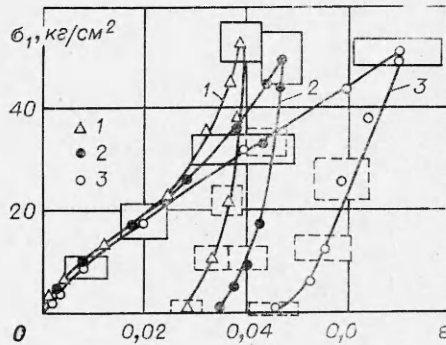
та с $\gamma_0 = 1,50 \text{ г/см}^3$, $w = 0,15$. На фиг. 4, б деформации при $\partial\sigma_1/\partial t < 0$ продолжают расти в течение некоторого времени. При меньшей длительности процесса для аналогичного грунта таких эффектов не наблюдалось (фиг. 3, г, кривая 1).

На фиг. 5 представлены кривые $\sigma_1(\epsilon)$ для песчаных грунтов с $\gamma_0 = 1,50 \text{ г/см}^3$ различной влажности (1— $w = 0,15$; 2— $w = 0,05$; 3— $w = 0,003$), полученные при близких значениях средних скоростей дефор-



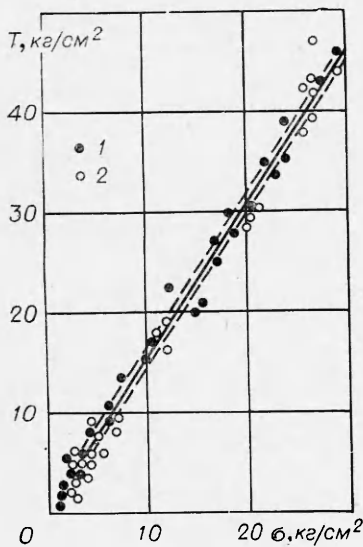
Фиг. 4

мирования при нагружении (1 — $\epsilon_1 = 13,0$; 2 — $\epsilon_2 = 12,5$; 3 — $\epsilon_3 = 17,5$ с⁻¹). Доверительные интервалы указаны здесь только для максимальных значений напряжений и деформаций. Видно, что при увеличении влажности с $w=0,003$ до 0,15 деформация грунта при значениях $\sigma_1 = 20-30$ кг/см² существенно уменьшается (до 1,75 раза при $\sigma_1=50$ кг/см²). Соответственно изменяется и вид кривой $\sigma_1(\epsilon)$, на которой при увеличении влажности до $w = 0,05-0,15$ появляется ярко выраженная точка перегиба. При $w=0,003$ и $\sigma_1 \leq 50$ кг/см² кривая $\sigma_1(\epsilon)$ имеет выпуклость к оси напряжений ($\partial^2 \sigma_1 / \partial \epsilon^2 < 0$). Аналогичные данные о характере динамических кривых для песчаных грунтов были получены ранее в [8].



Фиг. 5

3. На фиг. 6 представлены результаты исследований условия пластичности для песчаного грунта с $\gamma_s = 1,50$ г/см³, $w = 0,05$. По оси ординат отложена величина $T = \sqrt{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$, на оси абсцисс — среднее напряжение $\sigma = (1/3)(\sigma_1 + 2\sigma_2)$. Каждая из точек в плоскости (T, σ) — среднее арифметическое значение для каждого из опытов по результатам пяти измерений для $\sigma_1(t_j)$ и по двум измерениям для $\sigma_2(t_j)$, $j = 1, 2, \dots, n$. Сплошная линия — линии линейной регрессии $T = k\sigma + b$, штриховая соответствует доверительному интервалу для линейной регрессии с надежностью $\beta = 0,9$. Аналогичные результаты получены для образцов влажностью $w = 0,003$ и 0,15. В таблице приведены данные по величинам коэффициентов k , коэффициентов бокового давления $\xi = (3\sqrt{2} - k)/(3\sqrt{2} + 2k)$ [1], а также коэффициентов корреляции r для линейной регрессии и соответствующих доверительных интервалов r_1, r_2 при $\beta = 0,9$ для коэффициентов корреляции для песчаных грунтов различной влажности. Величины b во всех случаях с точностью до погрешности измерений равны нулю.



Фиг. 6

Из таблицы видно, что с увеличением влажности величины коэффициентов k увеличиваются (соответственно величины ξ убывают) в 1,4—1,7 раза. Заметим, что полученные результаты близки к данным, полученным при испытаниях аналогичных грунтов в полевых условиях [1, 7].

Следует отметить, что для грунта с $w = 0,003$ имеет место существенно более широкий, чем для $w = 0,05$ и 0,15, доверительный интервал для коэффициента корреляции. Анализ результатов опытов показывает, что этот факт связан с заметным различием зависимости $T(\sigma)$ для воздушно-сухого грунта при нагружении и разгрузке. Для влажных грунтов условие пластичности (величины k) в пределах точности опытов не зависит от условий нагружения или разгрузки. В частности, на фиг. 6 точки 1 соответствуют нагружению ($\partial \sigma / \partial t > 0$), а точки 2 — разгрузке ($\partial \sigma / \partial t < 0$).

Для условий статического нагружения песчаного грунта с $w = 0,05$ величина k оказалась равной 1,459, что также близко к данным таблицы для первого нагружения.

При повторных нагружениях величины k несколько возрастают. При этом для воздушно-сухого грунта ($w = 0,003$) это возрастание при трех последовательных нагружениях составляет 35%, а для влажных — не превышает 7—14%. Последние величины находятся в пределах точности измерений.

Поэтому можно считать, что для песчаных грунтов естественной влажности величина k не изменяется при повторных (трехкратных) нагружениях и, таким образом, не зависит от скорости деформирования.

Получены также данные, свидетельствующие о существенной роли влажности в формировании эффектов вязкости в песчаных грунтах.

Оценка параметров функций распределения при измерениях напряжений и деформаций в установке квазистатического типа и оценка точности этих измерений позволяют перейти к количественной оценке механических характеристик грунтов с учетом их вязкопластических свойств при кратковременных динамических нагрузках.

Авторы выражают благодарность В. В. Викторovu и Ю. М. Глухову за помощь в подготовке экспериментальных исследований, А. В. Горбушину, Л. Г. Романовой и Л. А. Яшковой за участие в обработке результатов опытов.

Поступила 3 XI 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыков Г. В. Влияние скорости деформирования на сжимаемость и сдвиг песчаных глинистых грунтов при кратковременных нагрузках.— ПМТФ, 1969, № 3.
2. Григорян С. С. Об основных представлениях динамики грунтов.— ПММ, 1960, т. 24, вып. 6.
3. Нарожная З. В., Рыков Г. В. О погрешностях измерения напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках.— ПМТФ, 1972, № 4.
4. Шапиро С., Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах. М., «Мир», 1969.
5. Кендалл М., Стьюарт А. Теория распределений. М., «Наука», 1966.
6. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. М., ИЛ, 1956.
7. Рыков Г. В. Экспериментальное исследование поля напряжений при взрыве в песчаном грунте.— ПМТФ, 1964, № 1.
8. Рахматулин Х. А., Сагомоян А. Я., Алексеев Н. А. Вопросы динамики грунтов. М., изд. Моск. ун-та, 1964.