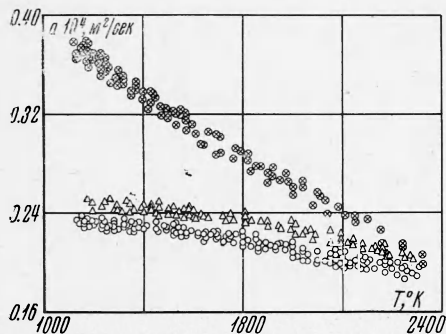


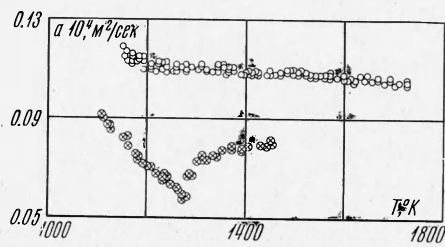
толщиной 0.2—0.8 мм и диаметром 10—20 мм. Частота модуляции электронного потока менялась в пределах от 20 до 600 *гц*, величина ускоряющего напряжения от высоковольтного выпрямителя ВВ (фиг. 2) — от 500 до 3000 *в*.

На фиг. 3 приведены значения температуропроводности тантала, молибдена и ниобия в зависимости от температуры с учетом поправки на тепловое расширение (эк-

спериментальные точки нанесены кружками, крестами и треугольниками соответственно). Аналогичные зависимости для ванадия (кружки) и кобальта (кресты) показаны на фиг. 4.



Фиг. 3



Фиг. 4

спериментальные точки нанесены кружками, крестами и треугольниками соответственно). Аналогичные зависимости для ванадия (кружки) и кобальта (кресты) показаны на фиг. 4.

Для определения истинной температуры были использованы литературные данные по степени черноты для тантала, молибдена, ниобия [3,4] и ванадия [5]. Так как в настоящее время нет надежных данных по степени черноты для кобальта, то приведена зависимость температуропроводности кобальта от яркостной температуры для длины волны 0.655 *мк*.

Поступила 28 X 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Краев О. А., Стельмах А. А. Температуропроводность и теплопроводность металлов при высоких температурах. В сб.: Исследования при высоких температурах, Новосибирск, «Наука», СО АН СССР, 1966.
2. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. Л.—М., Госэнергоиздат, 1958.
3. Иванов А. П. Электрические источники света. М.—Л., Госэнергоиздат, 1955.
4. Хрусталева Б. А., Колченогова И. П., Раков А. М. Спектральные коэффициенты излучения тантала, молибдена, ниобия. Теплофизика высоких температур, 1963, т. I, № 1.
5. Ростокер У. Металлургия ванадия. М., Изд-во иностр. лит., 1959.

#### ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА СЖИМАЕМОСТЬ И СДВИГ ПЕСЧАНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

Г. В. Рыков

(Москва)

Излагаются результаты экспериментальных исследований сжимаемости и сдвига песчаных и глинистых грунтов при кратковременных динамических нагрузках, создававшихся за счет удара по образцу грунта падающего груза [1], а также путем подрыва заряда тротила в массиве ненарушенного грунта [2-5]. Анализ этих результатов свидетельствует о существенности влияния на объемную сжимаемость исследованных грунтов временных эффектов типа вязкости (влияние скорости деформирования). Одновременно отмечается возможность в первом приближении не учитывать влияния этих эффектов на сдвиг.

1. Исследования сжимаемости грунтов в лабораторных условиях. В [1] описана методика проведения лабораторных исследований сжимаемости грунтов при кратковременных динамических нагрузках, создававшихся за счет удара падающего груза. Описана также конструкция лабораторной установки, состоящей из цилиндра с размещенными в нем в специальном кольце образцом грунта диаметром  $D = 150$  мм и вы-

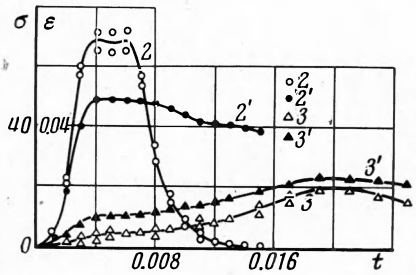
сотой  $h = 30$  мм и поршня, передававшего на образец грунта ударную нагрузку. При помощи резиновых прокладок и изменения высоты сбрасывания груза создавались различные режимы деформирования образцов. Мембранные тензометрические датчики, размещенные в центре поршня, в центре и крае дна цилиндра и в боковой поверхности кольца позволили регистрировать главные нормальные напряжения — вертикальные  $\sigma_x(t)$  и горизонтальные  $\sigma_y(t)$ , возникающие в образце при ударе. Перемещение поршня  $u(t)$  измерялось с помощью высокочастотной консольной балочки с наклеенным на нее тензосопротивлением. Учитывая, что отношение  $D/h = 5$  достаточно велико, будем предполагать однородное распределение деформаций по высоте образца и определять деформацию по формуле

$$\varepsilon(t) = u(t) / h \quad (1.1)$$

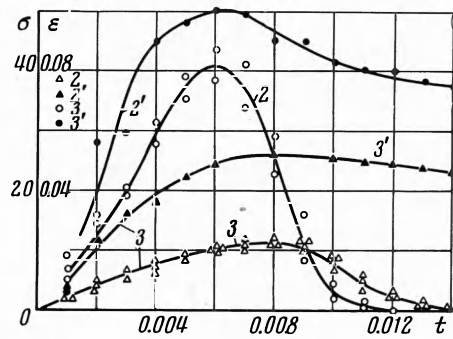
где  $h$  — первоначальная высота образца.

Показания датчиков регистрировались через усилитель УТС-12 на шлейфных осциллографах Н-102, Н-105.

Исследования сжимаемости образцов грунта предполагают квазистатический режим нагружения, когда волновыми процессами в образце можно пренебречь. Для оценки возможных погрешностей были проведены расчеты многократного отражения пластических ударных волн в образце грунта применительно к условиям экспериментов. При этом принималось, что грунт характеризуется однозначной связью между напряжениями и деформациями, линейной при нагружении. При разгрузке предполагалось, что плотность в частице не меняется. В результате расчетов было получено, что ошибка при квазистатическом подходе к оценке результатов опытов по сравнению с волновым не превышает  $\pm 15\%$  после момента времени  $t_0 = (5 \div 6)h / a_0$ , где  $a_0$  — скорость распространения фронта ударной волны. Длительность процесса во всех опытах значительно превышала величину  $t_0$ .



Фиг. 1



Фиг. 2

Величины напряжений  $\sigma_x(t_0)$  составляли в опытах, как правило, не более 5—10% (в отдельных случаях — до 20%) максимальных значений  $\sigma_x^m$ .

Путем исключения времени из записей  $\sigma(t) \equiv \sigma_x(t)$  и  $\varepsilon(t)$  строились диаграммы одноосного сжатия  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ . Одновременное измерение в опытах двух главных напряжений  $\sigma_x(t)$  и  $\sigma_y(t)$  в условиях плоской деформации позволяло построить условие пластичности. Каждая из построенных описанным выше способом диаграмм  $\sigma(\varepsilon)$  соответствовала, вообще говоря, некоторому произвольному режиму деформирования. Для оценки этих режимов использовалась средняя скорость деформирования

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\varepsilon_{*i}}{t_{*i}} \quad (1.2)$$

Здесь  $\varepsilon_{*i}$  и  $t_{*i}$  — соответственно максимальная деформация и время ее достижения,  $i$  — номер кривой.

Испытаниям в лабораторных условиях подвергались пески с объемным весом скелета  $\gamma_0 = 1.50-1.55$  г/см<sup>3</sup> и весовой влажностью  $w = 8-10\%$ , ненарушенный лессовидный суглинок с  $\gamma_0 = 1.35-1.45$  г/см<sup>3</sup> и влажностью  $w$  от 3% до 12—14%, суглинок с  $\gamma_0 = 1.60-1.65$  г/см<sup>3</sup> и  $w = 10-15\%$ . Гранулометрический состав этих грунтов приведен в [3-5].

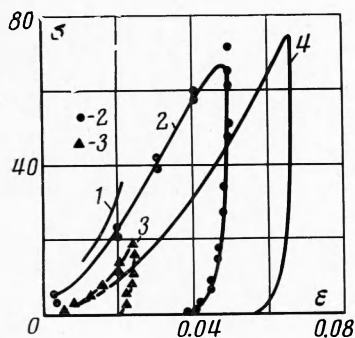
На фиг. 1, 2 представлены результаты обработки осциллограмм напряжений  $\sigma(t)$  (точки 2, 3), деформаций  $\varepsilon(t)$  (точки 2', 3') для образцов песчаного грунта (фиг. 1) и суглинка (фиг. 2). Здесь и далее величины  $\sigma$  имеют размерность кг/см<sup>2</sup>, время  $t$  — сек, скорости деформирования  $\dot{\varepsilon}_i$  — 1/сек, скорость изменения напряжений  $\dot{\sigma}$  — кг/см<sup>2</sup> сек. На фиг. 3, 4 построены описанным способом диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  для песка (фиг. 3) и суглинка (фиг. 4). При этом точки 2, 3 (фиг. 3, 4) соответствуют точкам 2, 2'

и 3, 3' (фиг. 1, 2). Средние скорости деформирования для кривых 2, 3 равны — для песчаного грунта (фиг. 3)  $\dot{\epsilon}_2 = 12.2$ ;  $\dot{\epsilon}_3 = 1.2$  — для суглинка (фиг. 4)  $\dot{\epsilon}_2 = 15.0$ ;  $\dot{\epsilon}_3 = 6.5$ .

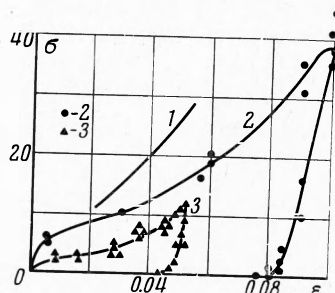
Кривые 1 (фиг. 3, 4) построены для тех же грунтов, исходя из соотношений на фронте ударной волны по экспериментальным данным, полученным в полевых условиях при подземных взрывах тротильных зарядов [2,4,5]. Эти кривые соответствуют, таким образом, бесконечной скорости деформирования  $\dot{\epsilon}_1 = \infty$  и являются предельными для данного вида грунта. Кривая 4 (фиг. 3) построена по результатам статических испытаний при  $\dot{\epsilon}_4 = 1 \cdot 10^{-7}$ . Аналогичные данные для лессовидных суглинков были приведены ранее в [1].

Из данных фиг. 3, 4 и [1] видно, что различия в деформациях при напряжениях  $\sigma = 20 \div 40$  и при изменении  $\dot{\epsilon}$ , в диапазоне от  $\dot{\epsilon}_1 = \infty$  до  $\dot{\epsilon}_4 = 1 \cdot 10^{-7}$  составляют 50—100% для песчаного грунта и достигают 300% и более для суглинка и лессовидного суглинка. Для песчаного грунта с  $\gamma_0 = 1.60 \text{ г/см}^3$  и  $w = 15\text{—}16\%$  в [6] было получено, что различие между статическими деформациями и деформациями при средней скорости  $\dot{\epsilon} = 35$  и  $\sigma = 20$  составляли около 100%. Для сухого песчаного грунта с  $\gamma_0 = 1.66\text{—}1.75 \text{ г/см}^3$  в [7,8] было получено, что максимальные различия в деформациях при статическом и мгновенном динамическом нагружении составляют 30—50%. При этом из [8] следует, что различие в деформациях в пределах 30% сохраняется вплоть до напряжений порядка  $50.000 \text{ кг/см}^2$ .

Анализ экспериментальных результатов свидетельствует, таким образом, о существенности в целом влияния скорости деформирования на сжимаемость песчаных и глинистых грунтов при кратковременных динамических нагрузках при нагружении. Причем это влияние, как было отмечено в [1], такое, что при больших скоростях деформирования  $\dot{\epsilon} \rightarrow \infty$  оно исчезает, так что существует предельная форма соотношений между напряжениями и характеристиками деформаций — предельная динамическая диаграмма, уже не содержащая скорости деформирования. Существует также и другая предельная форма соотношений между напряжениями и характеристиками деформации — статическая диаграмма, соответствующая нулевой скорости деформирования.



Фиг. 3



Фиг. 4

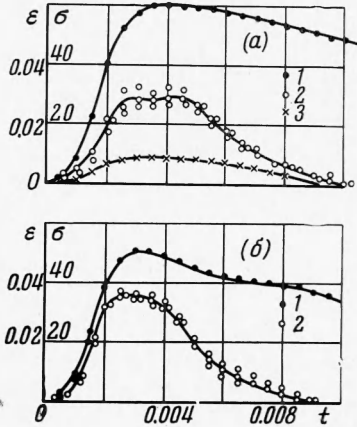
Рассмотрим далее некоторые экспериментальные результаты, характеризующие влияние скорости деформирования на сжимаемость при разгрузке. В опытах по сжимаемости песчаных и глинистых грунтов, несмотря на довольно большой диапазон изменения средней скорости падения напряжений  $|\dot{\sigma}_{*i}| = 1 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^5$ , не удалось достигнуть величин средней скорости падения деформаций  $|\dot{\epsilon}_{*i}|$  больших, чем  $|\dot{\epsilon}_{*i}| = 3 \div 6$ . В частности, для кривой 2 (фиг. 1) величина  $|\dot{\sigma}_2|$  равна  $|\dot{\sigma}_{*2}| = 1.7 \cdot 10^4$  и совпадает со средней скоростью изменения напряжений при нагружении  $\dot{\sigma}_2$ , а абсолютная величина  $\dot{\epsilon}_{*2}$  равна  $|\dot{\epsilon}_{*2}| = 1.4$ , что почти на порядок меньше  $\dot{\epsilon}_{*2}$ . Средняя скорость деформирования при разгрузке для кривой 3 (фиг. 1) равна  $|\dot{\epsilon}_{*3}| = 0.5$ . Для кривых 2' и 3' (фиг. 2) имеем  $|\dot{\epsilon}_{*2}| = 4.1$ ,  $|\dot{\epsilon}_{*3}| = 1.0$ . Средняя скорость  $|\dot{\epsilon}_{*i}|$  в опытах с лессовидными грунтами не превышала  $|\dot{\epsilon}_{*i}| = 2 \div 3$ .

Следует отметить, что при взрывах в грунтах сосредоточенных зарядов весом  $C = 0.2 \div 200 \text{ кг}$  при максимальных напряжениях  $\sigma^m \leq 200 \div 250$  величины  $|\dot{\sigma}_*|$  не превышали  $|\dot{\sigma}_*| = 1 \cdot 10^5 \text{ [2}^{-5}]$ . При увеличении веса заряда и, следовательно, увеличении длительности взрывных волн величины  $|\dot{\sigma}_*|$  будут уменьшаться. Таким образом, можно ожидать, что при распространении взрывных волн в грунтах, песчаных и глинистых, при  $C \geq 0,2 \div 200 \text{ кг}$  величины  $|\dot{\sigma}_*|$  и  $|\dot{\epsilon}_*|$  также не будут более указанных выше пределов.

Анализируя теперь диаграммы  $\sigma(\epsilon)$  (фиг. 3, 4), а также аналогичные результаты для лессовидных суглинков [1], можно заключить, что в пределах изменения  $|\dot{\sigma}_*| \leq 1 \cdot 10^5$  и  $|\dot{\epsilon}_{*i}| = 6 \div 1 \cdot 10^{-7}$  (последнее значение относится к статическим испытаниям) влияние скорости деформирования на сжимаемость при  $\partial \epsilon / \partial t < 0$  не существенно.

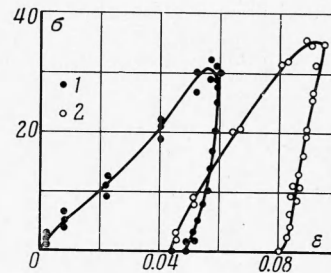
Заметим далее, что в опытах были отмечены случаи дальнейшего роста деформаций образца при выполнении условий разгрузки по напряжениям  $\partial\sigma / \partial t < 0$ . Для иллюстрации на фиг. 5, 6 приведены экспериментальные результаты по сжимаемости лессовидного суглинка с  $\gamma_0 = 1.50 \text{ г/см}^3$  и  $w = 10,6\%$  при двух последовательных нагружениях образца.

На фиг. 5, а, б нанесены экспериментальные точки, характеризующие изменение напряжений  $\sigma(t)$  и деформаций  $\varepsilon(t)$  во времени при первом (фиг. 5, а) и втором (фиг. 5, б) нагружениях. Точки 1 относятся к деформации  $\varepsilon(t)$ , точки 2 — к вертикальным напряжениям  $\sigma_x(t) \equiv \sigma(t)$ , точки 3 — к горизонтальным напряжениям  $\sigma_y(t)$ .



Фиг. 5

На фиг. 6 построены соответствующие фиг. 5 диаграммы сжатия  $\sigma(\varepsilon)$  при первом (кривая 1) и втором (кривая 2) нагружениях. Из фиг. 5, а, б видно, что в обоих случаях деформации образца продолжают нарастать в течение некоторого времени после выполнения условия  $\partial\sigma / \partial t < 0$ .



Фиг. 6

Таким образом, обычно применяющееся для грунтов условие разгрузки по напряжениям  $\partial\sigma / \partial t < 0$  не может служить критерием начала разгрузки в условиях существенности влияния на сжимаемость скорости деформирования и должно быть заменено более общим условием, связанным с разгрузкой по деформациям  $\partial\varepsilon / \partial t < 0$ .

Отметим, наконец, еще два экспериментальных факта, свидетельствующих о влиянии временных эффектов в грунтах на их сжимаемость. В опытах было отмечено, что как в песчаных, так и в глинистых грунтах линия повторного нагружения на диаграммах  $\sigma(\varepsilon)$  не совпадала с линией разгрузки в первом опыте. Это видно, в частности, на фиг. 6, где при одном и том же напряжении  $\sigma = 31$  величина деформации при повторном нагружении увеличилась более чем на 30% по сравнению с первым нагружением. В ряде случаев после падения напряжений до нуля деформации в течение некоторого времени продолжали убывать, т. е. имело место последствие. Величины максимальных деформаций последствия в суглинках и лессовидных суглинках не превышали 10—15% остаточных деформаций в момент исчезновения нагрузки (фиг. 4, 6).

**2. Результаты экспериментальных исследований сдвига грунтов при кратковременных нагрузках.** Характер деформирования пластической среды при сдвиге, как известно, аналитически описывается зависимостями между девиатором тензора скоростей деформаций (или девиатором тензора деформаций в деформационных теориях) и девиатором тензора напряжений. При этом необратимая, пластическая, деформация возможна лишь при выполнении некоторого условия пластичности [9—11]. Для грунтов, в частности, в [11] предложены уравнения, в которых девиаторы тензоров скоростей деформаций и напряжений связаны между собой по типу теории течения Прандля — Рейсса, а условие пластичности имеет вид условия Мизеса — Шлейхера

$$I_2 = \frac{1}{6}F^2(p), \quad p = -\frac{1}{3}\sigma_{kk} \quad (2.1)$$

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

Здесь  $\sigma_{ij}$  — компоненты тензора напряжений,  $p$  — среднее гидростатическое давление,  $F(p)$  — некоторая неубывающая функция  $p$ , определяемая экспериментально.

При этом связь между указанными девиаторами в [11] обладает свойствами сухого трения. Таким образом, рассматриваемые соотношения для сдвига грунта являются однородными во времени и, следовательно, не учитывают влияния эффектов вязкости на сдвиг.

Экспериментальные исследования [2—5] подтвердили применимость для песчаных и глинистых грунтов условия пластичности (2.1), при этом функция  $F(p)$  была получена в виде линейного соотношения

$$F(p) = kp + b \quad (2.2)$$

где  $k$  и  $b$  — константы, характеризующие внутреннее трение и сцепление в грунте

	$k$	$c, \text{кг/см}^2$	$\xi_*$	$\xi_0$
(1)	1.23—1.25	0	0.45	0.42
(2)	1.80—1.90	0.40—0.50	0.23—0.29	0.36
(3)	1.70—1.80	1.50—1.70	0.31—0.38	—
(4)	1.00	1.00	0.52	0.50—0.60
(5)	0.95	2.00	0.54	0.55—0.70

Здесь строки относятся

- (1) к насыпному песчаному грунту с  $\gamma_0 = 1.30—1.40 \text{ г/см}^3$ ,  $w = 10—12\%$ ;
- (2) к ненарушенному песчаному грунту с  $\gamma_0 = 1.50—1.52 \text{ г/см}^3$ ,  $w = 8—12\%$ ;
- (3) к лессовидному суглинку [1,3] с  $\gamma_0 = 1.35—1.45 \text{ г/см}^3$ ,  $w = 12—14\%$ ;
- (4) к суглинку с  $\gamma_0 = 1.60—1.65 \text{ г/см}^3$ ,  $w = 10—15\%$ ;
- (5) к плотной глине с  $\gamma_0 = 1.70—1.75 \text{ г/см}^3$  и  $w = 20—22\%$ .

Гранулометрический состав этих грунтов приведен в [3-5]. Заметим, что строки (2), (4) таблицы соответствуют грунтам, рассмотренным в п. 1.

Соотношение (2.1) оказалось не зависящим ни от величины напряжений в диапазоне от  $\sigma = 1—2$  до  $\sigma = 250$ , ни от условий симметрии [2-4].

Дальнейшие исследования показали, что на условие пластичности (2.1) не оказывает существенного влияния также и скорость деформирования ни при нагружении, ни при разгрузке.

На фиг. 7 представлены результаты построения функции пластичности  $F(p)$  по данным фиг. 5 при двух последовательных нагружениях (кривая 1). Здесь по оси ординат отложена величина  $T = \sqrt{6}I_2 = \sqrt{2}(\sigma_x - \sigma_y)$ , а по оси абсцисс — среднее гидростатическое напряжение  $p = -1/3(\sigma_x + 2\sigma_y)$ . Знаки 1 и 1' относятся к нагрузке и разгрузке (по напряжениям) при первом нагружении, знаки 2 и 2' — к нагрузке и разгрузке при втором нагружении соответственно. Из фиг. 7 видно, что все опытные точки достаточно хорошо аппроксимируются единственной линейной функцией  $F(p)$  при  $k = 1.80$ ,  $b = 2.0 \text{ кг/см}^2$ .

Ранее в [1] были изложены результаты исследований условия пластичности для образцов лессовидных суглинков при различных средних скоростях деформирования, для которых наблюдались существенные различия в диаграммах сжатия  $\sigma(\epsilon)$ . Условие пластичности в этих опытах также оказалось не зависящим от скорости деформирования при нагружении, ни при разгрузке.

Аналогичный вывод был получен также при анализе результатов исследований условия пластичности в ненарушенных песчаных и глинистых грунтах при распространении взрывных волн [2-5]. В этих опытах также скорость деформирования менялась в довольно широких пределах от  $\dot{\epsilon} = \infty$  на фронте ударной волны до  $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$  при разгрузке. Однако все результаты достаточно хорошо описывались единственной (для каждого грунта) линейной функцией (2.2). Для песчаных грунтов такие данные приведены в [2,4], а для суглинков и глин — на фиг. 7. Суглинкам соответствуют обозначения 3, а глинам — обозначения 4. Величины коэффициентов  $k$  и  $b$  для этих грунтов даны в строках (4), (5).

Для оценки роли вязкости при сдвиге в общем случае недостаточно оценить только влияние скорости деформаций сжатия. Необходимо также оценить влияние на сдвиг скорости деформаций сдвига. Можно показать, однако, что в данных опытах максимальная скорость деформаций сдвига имеет тот же порядок, что и скорость деформаций сжатия. В частности, для испытаний образцов в условиях плоской деформации максимальные скорости деформаций сдвига  $\dot{\gamma}_{x'y'}$  имеют место на площадках, расположенных под углом  $\alpha = 1/4\pi$  к поверхности образца, и равны

$$\dot{\gamma}_{x'y'} = -2\dot{\epsilon}_x \equiv -2\dot{\epsilon}, \quad \dot{\gamma}_{x'y'} = \frac{\partial v_{x'}}{\partial y'} + \frac{\partial v_{y'}}{\partial x'} \quad (2.3)$$

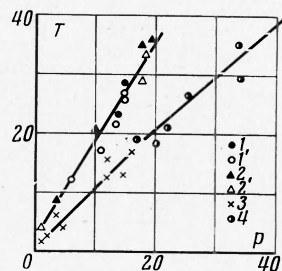
где  $v_{x'}$ ,  $v_{y'}$  — скорости смещения частиц в новой системе координат  $x'$ ,  $y'$ .

Таким образом, можно заключить, что скорость деформаций сдвига также не оказывает существенного влияния на условие пластичности при динамических нагрузках в пределах исследованных в опытах режимов деформирования.

Сравним данные по условию пластичности, полученные при кратковременных нагрузках, с имеющимися в механике грунтов коэффициентами бокового давления.

Из (2.1), учитывая, что  $p = -1/3(\sigma_x + 2\sigma_y)$ , для плоской деформации получим

$$\xi(p) = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} = \frac{(3\sqrt{2} - k)p/b + 1}{(3\sqrt{2} + 2k)p/b - 2} \quad (2.4)$$



Фиг. 7

