

**О ПОГРЕШНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ГРУНТАХ  
ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ****З. В. Нарожная, Г. В. Рыков***(Москва)*

Излагаются результаты экспериментальных исследований систематических погрешностей измерений напряжений в песчаном грунте с помощью тензодатчиков при кратковременных нагрузках, возбуждаемых взрывом плоского заряда. Анализируется влияние жесткости чувствительных элементов таких датчиков, а также эффектов концентрации напряжений вокруг их корпуса на измеряемое поле напряжений. Производится сопоставление результатов опытов с теоретическими расчетами [1, 2]. Показано, что рассматриваемые систематические погрешности при выполнении некоторых достаточно легко осуществимых требований к датчикам не будут превышать  $\pm (3 \div 7)\%$ .

Вопросы оценки систематических погрешностей измерений напряжений в грунтах при статических нагрузках небольшой интенсивности рассматривались в [3-6].

**1. Методика экспериментальных исследований.** Датчики, применяющиеся для измерения напряжений в грунтах при распространении взрывных волн [7-9], имеют форму цилиндра с отношением высоты  $h$  к диаметру  $D$ , изменяющемся в пределах  $h/D = 0.30 \div 0.166$ . Чувствительным элементом такого датчика является заземленная по контуру тонкая пластинка толщиной  $\delta$  с наклеенным на нее тензосопротивлением.

Диаметр пластинки  $d$  меньше диаметра корпуса, причем, как правило, выполняется соотношение  $d/D \leq 0.5 \div 0.75$ .

На внутреннюю боковую поверхность корпуса датчика наклеивается компенсационное тензосопротивление, образующее вместе с рабочим тензосопротивлением полумост. Второй полумост располагается в тензометрическом усилителе. Принцип работы такого датчика построен на возникновении разбаланса моста при воздействии на чувствительный элемент датчика динамической нагрузки. Градуировка датчика производится статически в масляной камере.

При контактных измерениях датчик располагается в преграде таким образом, что на границе контакта находится лишь упругая пластинка. Соответствующие систематические погрешности связаны с прогибом пластинки и зависят от отношения жесткостей пластинки и грунта.

При измерениях напряжений в неограниченном массиве датчик располагается внутри грунта. На измеряемое поле напряжений в этом случае будет влиять не только прогиб пластинки, но и концентрация напряжений вокруг корпуса датчика как жесткого инородного включения в среде.

Для исследования влияния жесткости пластинки на измеряемые напряжения применялись датчики с различными величинами  $d$  и  $\delta$ , изменявшимися в пределах  $d = 18 \div 45$  мм,  $\delta = 1.0 \div 4.0$  мм. Датчики были изготовлены из дюралюминия, имевшего модуль упругости  $E_0 = 7.4 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона  $\nu_0 = 0.33$ , предел прочности  $\sigma_s = 60$  кг/мм<sup>2</sup>.

Датчики с различными величинами  $d$  и  $\delta$  устанавливались на массивной железобетонной плите размерами  $2 \times 2 \times 0.5$  м<sup>3</sup> в ее центральной части, так что поверхности их чувствительных элементов располагались на одном уровне с поверхностью плиты. Сверху насыпался с послойным трамбова-

нием песок. Высота слоя грунта 0.5 м. Волны напряжения генерировались путем подрыва плоского заряда ВВ. Объемный вес скелета песка  $\gamma_0 = 1.45 \div 1.50 \text{ г/см}^3$  при весовой влажности  $w = 5 \div 7\%$ .

Для исследования влияния на измеряемые напряжения эффектов концентрации их вокруг жесткого корпуса применялись датчики цилиндрической формы с различными соотношениями  $h/D = 0.166, 0.33, 0.50, 1.0$  и  $2.5$ . Эти датчики имели максимальную для данных опытов жесткость чувствительных элементов ( $d = 22 \text{ мм}, \delta = 3.0 \text{ мм}$ ).

Проводились также опыты, имевшие целью экспериментально изучить характер распределения напряжений по поверхности жесткого цилиндрического блока, располагавшегося в массиве грунта, при взаимодействии его с падающей волной. Этот блок, изготовленный также из дюралюминия, имел диаметр  $D = 150 \text{ мм}$  и высоту  $h = 50 \text{ мм}$  ( $h/D = 0.33$ ). На поверхности блока (по оси симметрии и на расстоянии 30 и 60 мм от оси) располагались три датчика с диаметром  $d = 18 \text{ мм}$  и толщиной  $\delta = 2.5 \text{ мм}$ .

Приведенный объемный вес датчиков в этих опытах  $\gamma_1 = P/V$ , где  $P$  — вес датчика,  $V$  — его объем, изменялся от 2.2 до 2.6  $\text{г/см}^3$ , а отношение  $\gamma_1/\gamma$  — от 1.37 до 1.65 ( $\gamma = 1 + 0.01w$  — объемный вес грунта). Для цилиндрического блока  $\gamma_1 = 2.85 \text{ г/см}^3$ ,  $\gamma_1/\gamma = 1.78$ .

Датчики различных форм и при различных отношениях  $h/D$  устанавливались в грунте на одном и том же относительном расстоянии  $R$  от источника взрыва. Здесь  $R = r/G$ ,  $r$  — расстояние в м,  $G$  — вес заряда ВВ в  $\text{кг/м}^2$ .

Часть опытов проводилась в ненарушенном грунте с  $\gamma_0 = 1.50 \div 1.55 \text{ г/см}^3$ ,  $w = 5-7\%$ .

Регистрация показаний датчиков производилась через усилители типа УТС-ВТ-12/35 на шлейфных осциллографах типа Н-105. При этом во всех опытах использовались шлейфы одного и того же типа. Таким образом, временная погрешность была в каждой из серий опытов постоянной и не влияла на величину исследуемых систематических погрешностей [9].

**2. Механические характеристики грунта.** Для проведения теоретических расчетов по оценке погрешностей измерений необходимо было иметь соответствующие данные о механических характеристиках грунта, в котором проводились исследования. В связи с этим были проведены лабораторные исследования сжимаемости образцов этого грунта и условия пластичности при различных режимах деформирования в установке квазистатического типа по методике, описанной в [10]. Образцы с  $\gamma_0 = 1.50 \text{ г/см}^3$  и  $w = 5\%$  диаметром  $D_0 = 150 \text{ мм}$  и высотой  $h_0 = 30 \text{ мм}$  подвергались трехкратному нагружению ударной нагрузкой. При этом измерялись общее усилие на образец с помощью тензометрического стакана, главные нормальные напряжения  $\sigma_1(t)$  и  $\sigma_2(t)$  с помощью мембранных датчиков, а также деформации образца  $\varepsilon(t) = h_0^{-1}u(t)$  ( $u(t)$  — смещение поршня установки) с помощью тензометрического датчика перемещений. Предусматривалось пятикратное повторение опытов в одних и тех же условиях. Каждый из параметров в опыте измерялся с помощью двух или трех датчиков. Средний коэффициент вариации  $\beta$  для напряжений и деформации с доверительной вероятностью  $\alpha = 0.95$  составлял в этих опытах  $\beta = \pm 15 \div 17\%$ .

На фиг. 1, а, б представлены результаты измерений величин  $\sigma_1(t)$ ,  $\sigma_2(t)$ ,  $\varepsilon(t)$  при трех последовательных нагружениях образцов (а — точки 2 —  $\sigma_1(t)$ , 2а —  $\varepsilon(t)$ , 2б —  $\sigma_2(t)$  — первое нагружение; б — точки 3 —  $\sigma_1(t)$ , 3а —  $\varepsilon(t)$ , 3б —  $\sigma_2(t)$  — второе, 4 —  $\sigma_1(t)$ , 4а —  $\varepsilon(t)$ , 4б —  $\sigma_2(t)$ , третье нагружение). Соответствующие кривые  $\sigma(\varepsilon)$ , построенные путем исключения времени  $t$  из записей  $\sigma_1(t)$  и  $\varepsilon(t)$ , приведены на фиг. 2 (кривые 2, 3, 4). Кривая 1 здесь соответствует результатам полевых исследо-

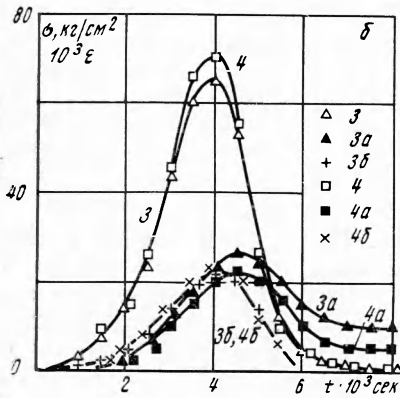
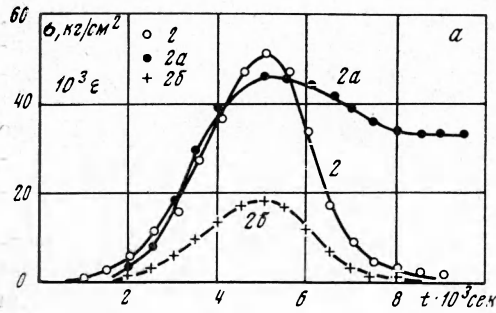
ваний  $\sigma_1(\epsilon_*)$  на фронте ударной волны  $\dot{\epsilon} = \partial\epsilon / \partial t = \infty$ , а кривая 5 — статических исследований ( $\epsilon = 1 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$ ). Из фиг. 1, 2 видно, что на деформирование данного грунта существенное влияние оказывает скорость деформирования [10]. Важно отметить, что в зависимости от скорости деформирования существенно изменяется величина модуля деформаций

$$E(\epsilon) = \frac{d\sigma_1(\epsilon)}{d\epsilon}$$

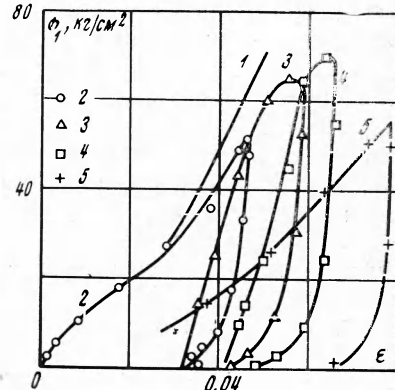
При этом при  $\dot{\epsilon} > 0$  максимальные величины  $E(\epsilon)$  соответствуют (при  $\sigma_1 = \text{const}$ ) кривой 1, где  $\dot{\epsilon} = \infty$ , а минимальные — кривой 5 ( $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$ ).

Величины  $E_*(\epsilon)$  при  $\dot{\epsilon} > 0$  больше  $E(\epsilon)$  при одних и тех же напряжениях.

Для дальнейшего представляет интерес получить количественные данные об изменении величины  $E_*$  в зависимости от  $\sigma_1$  при  $\dot{\epsilon} < 0$ . Для этого осциллограммы записей  $\sigma_1(t)$  и  $\epsilon(t)$  при  $\dot{\epsilon} < 0$  разбивались на  $n$  рав-



Фиг. 1



Фиг. 2

ных интервалов длительностью  $\Delta t = 0.25 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$ , а затем определялись средние модули  $E_{*i}$  по формуле

$$E_{*i}^p = \frac{k_2}{k_1} \sum_{j=1}^{k_1} (\sigma_{1i+1/2, j}^p - \sigma_{1i-1/2, j}^p) \left[ \sum_{j=1}^{k_2} (\epsilon_{i+1/2, j}^p - \epsilon_{i-1/2, j}^p) \right]^{-1} \quad (2.1)$$

$(i = 1, 2, \dots, n; p = 1, 2, \dots, l)$

которые ставились в соответствие напряжениям

$$\bar{\sigma}_{1i}^p = \frac{1}{2k_1} \sum_{j=1}^{k_1} (\sigma_{1i+1/2, j}^p + \sigma_{1i-1/2, j}^p) \quad (2.2)$$

Здесь  $k_1, k_2$  — число измерений напряжений и деформаций в каждом из опытов,  $l$  — число опытов в серии.

Зависимость  $E_*(\sigma_1)$ , соответствующая кривой 2 (фиг. 2) приведена на фиг. 3 (кривая 1). Участок кривой при  $4 \leq \sigma_1 \leq 20 \text{ кг/см}^2$  с достаточной

точностью аппроксимируется линейным законом

$$E_* = \alpha_1 + \beta_1 \sigma_1 \quad (\text{кг/см}^2) \quad (2.3)$$

где

$$\alpha_1 = \bar{E}_* - r_1 \Delta S_1^2 [\Delta S_2^2]^{-1} \bar{\sigma}_1, \quad \beta_1 = r_1 \Delta S_1^2 [\Delta S_2^2]^{-1}$$

$$r_1 = \frac{1}{\Delta S_1 \Delta S_2} \sum_{p=1}^l \sum_{i=1}^n (E_{*i}^p \bar{\sigma}_{1i}^p - n l \bar{E}_* \bar{\sigma}_1)$$

коэффициент корреляции

$$\bar{E}_* = \frac{1}{nl} \sum_{p=1}^l \sum_{i=1}^n E_{*i}^p, \quad \bar{\sigma}_1 = \frac{1}{nl} \sum_{p=1}^l \sum_{i=1}^n \sigma_{1i}^p$$

$$\Delta S_1^2 = \frac{1}{nl} \sum_{p=1}^l \sum_{i=1}^n (E_{*i}^p - \bar{E}_*)^2, \quad \Delta S_2^2 = \frac{1}{nl} \sum_{p=1}^l \sum_{i=1}^n (\sigma_{1i}^p - \bar{\sigma}_1)^2$$

дисперсии величин  $E_*$  и  $\sigma_1$  соответственно. Здесь  $r_1 = 0.79$ ,  $\alpha_1 = -400$   $\text{кг/см}^2$ ,  $\beta_1 = 300$ . Пунктир 2 на фиг. 3 соответствует доверительному интервалу с надежностью  $\alpha = 0.95$ .

При повторных нагружениях величины  $E_*(\sigma_1)$  больше  $E_*(\sigma_1)$  при первом нагружении на 10—15% (для одних и тех же величин  $\sigma_1 \leq 20$   $\text{кг/см}^2$ ), что находится, однако, в пределах точности измерений (фиг. 3).

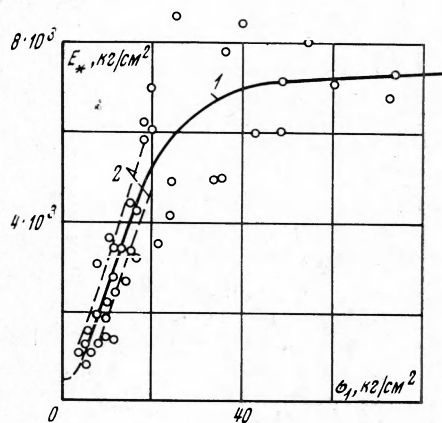
Функция пластичности для данного грунта, как и ранее в [7, 8, 10], может быть принята линейной, а условие пластичности записывается в виде

$$J_2 = (k\sigma + b)^2 / 6, \quad J_2 = 2 (\sigma_1 - \sigma_2)^2,$$

$$\sigma = (\sigma_1 + 2\sigma_2) / 3 \quad (2.4)$$

где  $k = 1.50$ ,  $b = 0$  — экспериментальные коэффициенты. Из (2.4) согласно [10] имеем для коэффициента бокового давления  $\xi_*$

$$\xi_* = \frac{3\sqrt{2} - k}{3\sqrt{2} + 2k} = 0.38$$



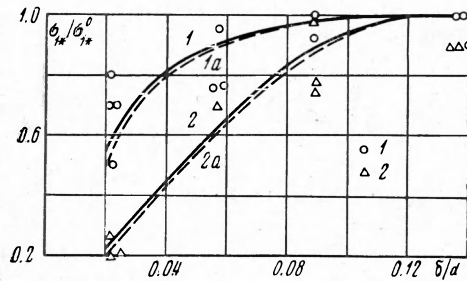
Фиг. 3

**3. Влияние прогиба чувствительного элемента датчика на измеряемые напряжения.** На фиг. 4 представлены результаты испытаний датчиков различной жесткости, установленных на плите. По оси ординат отложены  $\sigma_{1*} / \sigma_{1*}^0$ , по оси абсцисс — безразмерная величина  $\delta / d$ , характеризующая жесткость чувствительного элемента. Здесь  $\sigma_{1*}$  — максимальные напряжения, регистрируемые датчиком;  $\sigma_{1*}^0$  — среднеарифметическое значение максимального напряжения по данным наиболее жесткого в опыте датчика ( $\delta / d = 0.136$ ), равные для точек 1 — 5.1  $\text{кг/см}^2$ , для точек 2 — 41.1  $\text{кг/см}^2$ . Точки 1, 2 соответствуют расположению датчиков и плиты на различных расстояниях  $R$  от источника взрыва: 1 —  $R = 4.0$ , 2 —  $R = 1.0$ . Кривые 1, 2 (фиг. 2) построены по теоретиче-

ской формуле [1]

$$\frac{\sigma_{1*}}{\sigma_1^{\circ}} = \left(1 - \frac{m(1-m)}{23.2} \frac{E}{J_1}\right)^{-1}, \quad m = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} = \left(\frac{b_0}{a_0}\right)^2 \quad (3.1)$$

где  $\sigma_{1*}$  — максимальные напряжения, записываемые датчиком,  $\sigma_1^{\circ}$  — «истинные» напряжения в грунте,  $E$  — модуль деформаций грунта,  $\nu$  — коэффициент Пуассона для грунта,  $b_0$ ,  $a_0$  — скорости распространения поперечных и продольных волн в грунте,  $J_1 = J(d/2)^{-3}$  — безразмерная



Фиг. 4

жесткость пластинки (чувствительного элемента) датчика,  $J = E_0 \delta^3 / 12(1-\nu_0^2)$  цилиндрическая жесткость пластинки,  $E_0$  — модуль упругости материала пластинки,  $\nu_0$  — коэффициент Пуассона материала пластинки.

Для рассматриваемых песчаных грунтов  $m = 1/3$ , а  $E = E_*(\sigma_{1*})$  согласно кривой 1 (фиг. 3). Здесь учитывалось, что процесс взаимодействия датчика с ударной волной происходит в стадии разгрузки грунта  $\dot{\epsilon} < 0$ .

Для исключения из (3.1) неизвестной величины  $\sigma_1^{\circ}$  все расчетные значения  $\sigma_{1*}$  были разделены на величину

$$\sigma_{1*}^{\circ} = \sigma_1^{\circ} \left(1 + \frac{m(1-m)}{23.2} \frac{E_*^{\circ}}{J_1^{\circ}}\right)^{-1} \quad (3.2)$$

где  $J_1^{\circ}$  — жесткость датчика с  $\delta/d = 0.136$ , а  $E_*^{\circ} = E_*(\sigma_{1*}^{\circ})$ . При вычислении значений  $\sigma_{1*} / \sigma_{1*}^{\circ}$  кривой 1 при  $\delta/d = 0.02 \div 0.04$  принималось  $E_* = 600 \text{ кг/см}^2$  (фиг. 3).

Как видно из фиг. 4, кривые 1, 2 достаточно хорошо описывают эксперимент. Средний коэффициент вариации  $\beta$  в данных опытах с надежностью  $\alpha = 0.95$  составлял для кривых 1, 2  $\pm 25$  и  $\pm 17\%$  соответственно.

Для сравнения пунктиром на фиг. 4 показаны кривые 1, 2, построенные по данным [4] для тех же условий опытов, для которых были получены кривые 1, 2.

Таким образом, рассматриваемая погрешность измерения максимальных напряжений при кратковременных нагрузках может быть с достаточной точностью определена по формуле

$$\Delta_- = - \left(1 - \frac{23.2}{m(1-m)} \frac{J_1}{E_*}\right)^{-1}, \quad \Delta_- = \frac{\sigma_{1*} - \sigma_1^{\circ}}{\sigma_1^{\circ}} \quad (3.3)$$

Учитывая, что формула (3.3) проверялась в наиболее неблагоприятных условиях для датчика при  $\dot{\epsilon} < 0$ , оценка (3.3) применима также и за фронтом ударной волны.

Величины погрешностей  $\Delta_-$ , определенные по формуле (3.3) для рассмотренных выше датчиков, приведены ниже

$\delta/d =$	0.022	0.057	0.089	0.136
$\Delta_- =$	0.450	0.085	0.020	0.010
$\Delta_- =$	0.790	0.380	0.150	0.050

Первая и вторая строки соответствуют кривым 1, 2 (фиг. 4). Из этих данных и (3.3) следует, что датчики с  $\delta/d = 0.022$  и  $0.057$  имеют при напряжениях  $\sigma_{1*} = 20 \div 40 \text{ кг/см}^2$  большие погрешности и для измерений



непригодны. Поэтому при проведении экспериментальных исследований в рассматриваемом диапазоне напряжений применяются обычно более жесткие датчики с  $\delta / d = 0.089 \div 0.136$  [7-10].

4. Погрешности, связанные с концентрацией напряжений вокруг датчика, располагающегося в массиве грунта. На фиг. 5 представлены результаты экспериментов, характеризующих распределение напряжений по поверхности жесткого блока при  $h / D = 0.33$ , располагающегося в массиве грунта, при его взаимодействии со взрывной волной. Точки 1 и кривая 1 соответствуют моменту времени  $t_1 = 0.5 \cdot 10^{-3}$  сек, точки 2 и кривая 2 —  $t_2 = 2.5 \cdot 10^{-3}$  сек, точки 3 и кривая 3 —  $t_3 = 5.0 \cdot 10^{-3}$  сек. Кривые 1, 2, 3 построены по результатам теоретических расчетов [2] применительно к данным условиям. Из этих результатов следует, в частности, что при  $h / D \leq 1$  в центральной части датчика в области  $d \leq (0.3 \div 0.5)D$  распределение напряжений близко к равномерному, величина концентрации напряжений минимальна и определяется по формуле

$$\Delta_+ = m \frac{h}{D}, \quad \Delta_+ = \frac{\sigma_{1*} - \sigma_1^0}{\sigma_1^0}, \quad \frac{h}{D} \leq 1 \quad (4.1)$$

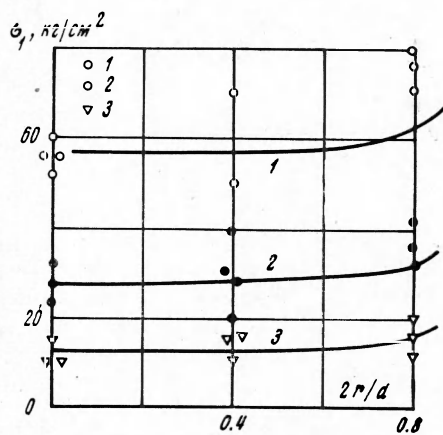
где  $m = (b_0 / a_0)^2$ ,  $\sigma_1^0$  — величина напряжений в падающей волне,  $\sigma_{1*}$  — величина напряжений, регистрируемых жестким датчиком.

Теоретические выводы о постоянстве напряжений на жестком блоке при  $d \leq (0.3 \div 0.5)D$  подтверждаются экспериментальными данными фиг. 5. Аналогичные выводы об уменьшении эффектов концентрации для датчиков при уменьшении отношения  $d / D$  высказывались ранее в [3].

Формула (4.1) относится к моментам времени, когда устанавливается квазистатический режим движения датчика, т. е. дифракционными процессами вокруг него можно пренебрегать. Этот момент  $t_0$  наступает для датчика достаточно быстро и при  $\gamma_1 / \gamma \leq 1.5 \div 2.0$  составляет  $(2.0 \div 2.5) D / a_0$ , где  $a_0$  — скорость распространения упругих волн в грунте [2]. Для стандартных датчиков в рассматриваемых опытах  $\gamma_1 / \gamma = 1.3 \div 1.5$ , а величина  $t_0$  при  $D = 60$  мм составляет  $0.5 \cdot 10^{-3}$  сек. Для блока (фиг. 4)  $t_0 \approx 1.2 \cdot 10^{-3}$  сек.

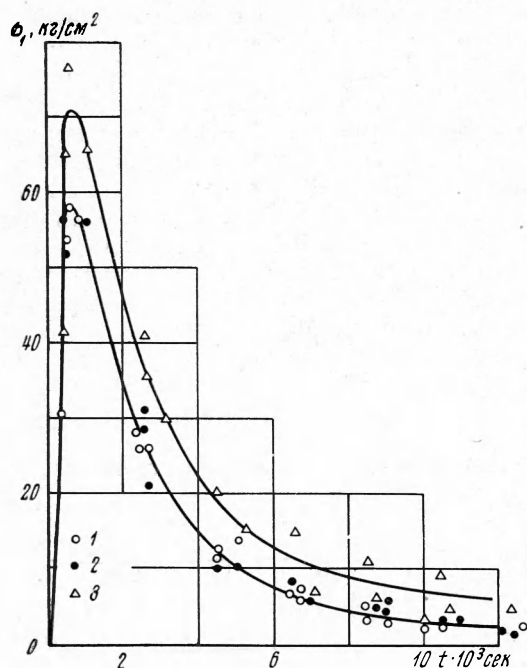
На фиг. 6 приведены опытные данные об изменении во времени напряжений на поверхности блока (фиг. 5). Точки 1 соответствуют показаниям стандартного датчика, располагавшегося на том же расстоянии от источника взрыва, с  $h / D = 0.166$  ( $d = 22$  мм,  $\delta = 3.0$  мм,  $\Delta_- = -0.050$ ), точки 2 — показаниям датчика в центральной части блока, а точки 3 — показаниям датчика на краю блока ( $d = 18$  мм,  $\delta = 2.5$  мм,  $\Delta_- = -0.040$ ).

Из данных фиг. 6 видно, что показания датчика 1 совпадают с показаниями датчика 2 в центре блока. Это свидетельствует об установлении квазистатического режима для датчика и блока к моменту времени  $t_0 = 0.5 \cdot 10^{-3}$  сек. Показания датчика 3 в течение всего процесса на 25% — 30% превышают показания датчиков 1, 2. Это подтверждает выводы [2] о том, что концентрация напряжений для датчиков носит квазистатический характер.



Фиг. 5

На фиг. 7 представлены результаты измерений напряжений в массиве песчаного грунта датчиками одинаковой жесткости ( $\delta / d = 0.136$ ) при  $d / D = 1/3$  и при различных соотношениях  $h / D$ . По оси ординат отложены максимальные напряжения  $\sigma_1^*$ , регистрируемые датчиками с различными величинами отношений  $h / D$ .



Фиг. 6

Точки 1 ÷ 3 соответствуют датчикам, установленным на различных относительных расстояниях  $R$  от источника взрыва: 1 —  $R = 0.5$ , 2 —  $R = 1.0$ , 3 —  $R = 1.5$ .

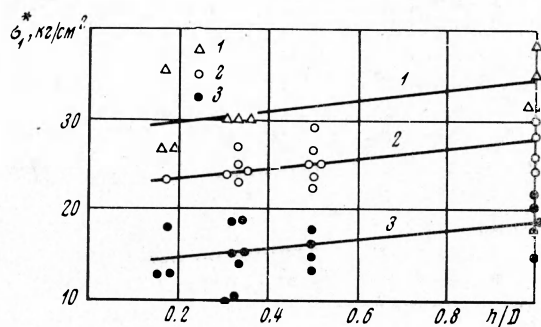
Коэффициенты вариации  $\beta$  для совокупностей точек 1, 2, 3 с надежностью  $\alpha = 0.95$  составляют соответственно  $\pm 19.0$ ,  $\pm 9.0$ ,  $\pm 22.0\%$ .

Из результатов опытов следует, что зависимость  $\sigma_1^*(h/D)$  с достаточной точностью может быть аппроксимирована линейным законом

$$\sigma_1^* = \sigma_1^0 + m_1 h / D \quad (4.2)$$

где  $\sigma_1^0$ ,  $m_1$  — экспериментальные коэффициенты. Для кривой 1  $\sigma_1^0 = 28.5 \text{ кг/см}^2$ ,  $m_1 = 6.3 \text{ кг/см}^2$ , 2 —  $\sigma_1^0 = 22.0 \text{ кг/см}^2$ ,  $m_1 = 5.9 \text{ кг/см}^2$ , 3 —  $\sigma_1^0 = 14.0 \text{ кг/см}^2$ ,  $m_1 = 4.5 \text{ кг/см}^2$ .

Для погрешности  $\Delta_+ = (\sigma_1^* - \sigma_1^0) / \sigma_1^0$  получим из (4.2) формулу, аналогичную (4.1), но с различными величинами  $m$  для кривых 1 ÷ 3: 1 —  $m = 0.22$ , 2 —  $m = 0.27$ , 3 —  $m = 0.32$ .



Фиг. 7

Тенденция к уменьшению величины  $m$  при увеличении напряжений  $\sigma_1^0$  может быть объяснена увеличением в этих случаях роли пластических деформаций грунта и качественно согласуется с выводами [11]. Оценка  $\Delta_+$  согласно (4.1) при величине  $m = (b_0 / a_0)^2 = 1/3$ , которая является характерной для рассматриваемого грунта в упругой стадии его работы, будет являться тогда верхней оценкой для погрешности, связанной с концентрацией напряжений вокруг корпуса датчика. При  $h / D > 1.0$  по-

грешности измерений  $\Delta_+$  резко возрастают. В опытах, в частности, было получено, что при  $h/D = 2.5$  показания датчиков  $\sigma_{1*}$  почти в 2 раза превышали значения  $\sigma_{1*}$  при  $h/D = 1.0$ .

Ниже приведены значения погрешностей  $\Delta_+$ , определенные для рассмотренных выше датчиков цилиндрической формы при различных  $h/D$  по формуле (4.1) при  $m = 1/3$

$h/D$	0.166	0.33	0.50	1.0
$\Delta_+$	0.055	0.110	0.165	0.330

Полученные оценки достаточно хорошо совпадают с результатами статических опытов [3, 12]. В [3], в частности, при  $d/D = 0.75$  для плотного песчаного грунта  $m = 0.6 \div 0.65$ , для глин влажностью  $w = 13 - 16\%$   $m = 0.39 \div 0.45$ , для глин с  $w = 18\%$   $m = 0.15$ . Одновременно из опытов [3] следует, что при уменьшении отношения  $d/D$  до  $1/3$  величины  $m$  уменьшаются в 1.5—2 раза. В [12] для жестких датчиков стержневого типа при  $h/D = 1.35$  величина «перегрузки» для статических опытов в плотных песчаных грунтах с  $\gamma_0 = 1.68 \text{ г/см}^3$  равнялась  $\sigma_{1*} / \sigma_1^\circ = 1.54 \div 1.66$ . Отсюда  $m = 0.40 \div 0.49$ . Для случаев действия динамической нагрузки данные, полученные в [12] для стержневых и мембранных датчиков, противоречивы и свидетельствуют, по-видимому, о значительном разбросе результатов измерений.

Проведенные исследования свидетельствуют, таким образом, о том, что при соблюдении некоторых, достаточно простых требований к геометрическим характеристикам датчиков цилиндрической формы ( $h/D \leq 1/5 \div 1/6$ ,  $d/D \leq 0.3 \div 0.5$ ) и жесткости их чувствительных элементов ( $J_1/E_* > 1/8$ ) систематические погрешности измерений напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках не будут превышать  $\Delta = \pm (3 \div 7\%)$  и оказываются значительно (до  $2 \div 3$  раз) меньше случайных погрешностей.

В связи с этим нельзя согласиться с предложением [5, 12] о необходимости градуировки датчиков в грунте. Следует ожидать, что в этом случае случайные погрешности, связанные с неравномерностью укладки грунта в градуировочной камере, окажутся значительно больше систематических погрешностей самих датчиков, и, таким образом, будут уменьшать точность всего эксперимента.

В заключение авторы благодарят Н. В. Зволинского и А. М. Скобеева за полезные советы и обсуждение результатов работы, А. И. Котова, В. П. Сутырина и Л. Г. Романову за участие в проведении опытов и обработке их результатов.

Поступила 9 II 1972

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Скобеев А. М. Взаимодействие упругой волны с пластинкой. ПМТФ, 1972, № 2.
2. Скобеев А. М. Дифракция упругой волны на диске. ПМТФ, 1972, № 3.
3. Peattie K. R., Sparrow R. W. The fundamental action of earth. Pressure cells. J. Mech. and Phys. Solids, 1954, vol. 2, No. 3, pp. 141—155.
4. Askergaard V. Measurement of pressure between a rigid wall and a compressible medium by means of pressure cells. Acta Politechn. Scand. Civ. Eng. and Build. Constr. Ser., 1961, No. 11.
5. Баранов Д. С. Выбор основных параметров грунтовых месдоз из условий наименьшего искажения измеряемых давлений. Тр. ЦНИИСК, 1962, вып. 14.
6. Askergaard V. Measurement of pressure in solids by means of pressure cells. Acta Polytechn. Scand. Civ. Eng. and Build. Constr. Ser., 1963, No. 17.



7. Алексеев В. Д., Григорян С. С., Кошелев Л. И., Новгородов А. Ф., Рыков Г. В. Измерение волн напряжений в мягких грунтах. ПМТФ, 1963, № 2.
8. Рыков Г. В. Экспериментальное исследование поля напряжений при взрыве в песчаном грунте. ПМТФ, 1964, № 1.
9. Новгородов А. Ф. Оценка погрешностей измерения максимальных напряжений в грунте при взрыве. Прикл. механ., 1968, т. 4, вып. 12.
10. Рыков Г. В. Влияние скорости деформирования на сжимаемость и сдвиг песчаных и глинистых грунтов при кратковременных нагрузках. ПМТФ, 1969, № 3.
11. Скобеев А. М. О влиянии измерительного прибора на напряжения в грунте. Изв. АН СССР, МТТ, 1970, № 4.
12. Simmons K. B. Dynamic evaluation of soil stress gages. Advances Test Measurement., vo. 5, Pittsburgh, Pa, Instrument. Soc. Amer., 1968, pp. 579/1—579/10. (Рус. перев.: Динамические характеристики датчиков напряжения в грунте. Экспр.-информ. ВИНТИ, Испытат. приборы и стенды, 1970, № 8.)