

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ  
НАПРЯЖЕНИЙ И СКОРОСТЕЙ ЧАСТИЦ ПРИ ВЗРЫВЕ  
В МЕРЗЛОМ ГРУНТЕ**

Ю. Я. Труханов  
(Москва)

В работах [1—6] описан метод измерения полей напряжения и скоростей частиц при действии взрыва в мягких грунтах и приведены соответствующие данные по песчаным и глинистым грунтам. Для мерзлых грунтов подобные систематические данные до настоящего времени отсутствовали. Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований полей напряжений и скоростей частиц при взрывах тротильных зарядов в мерзлом грунте. Эксперименты проведены и обработаны в соответствии с описанной ранее методикой [1—6].

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТА  
И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Экспериментальные исследования проводились в 1964 г. в полевых условиях в мерзлых суглинистых грунтах ненарушенной структуры с объемным весом  $\Delta = 1,87 \text{ г/см}^3$  при суммарной влажности  $W_{\text{сум}} = 15,8\%$ .

Данные о гранулометрическом составе приведены в табл. 1.

Поле напряжений исследовалось мембранными тензометрическими датчиками с частотой собственных колебаний мембраны до 30000 гц.

Поле скоростей и смещений измерялось электромагнитными датчи-

Таблица 1

Наименование грунта	Гранулометрический состав, %										
	>10,0	10,0—5,0	5,0—2,0	2,0—1,0	1,0—0,5	0,5—0,25	0,25—0,10	0,10—0,05	0,05—0,025	0,025—0,005	<0,005
Мерзлый легкий суглинок	1,65	0,91	2,10	3,95	6,89	18,0	7,43	8,75	30,04	7,53	12,75

ками, представлявшими собой соленоид в металлическом корпусе со свободно перемещающимся внутри соленоида намагниченным сердечником. Регистрация сигналов тензодатчиков производилась на шлейфных осциллографах через усилитель. Сигналы от датчиков скоростей записывались на осциллографе без усиления.

Волны в грунте создавались при взрывах сосредоточенных зарядов прессованного тротила весом 25, 50, 75 г. Глубина заложения зарядов и глубина установки датчиков определялась исходя из глубины про-

мерзания грунта. При глубине промерзания 0,5—0,6 м для уменьшения влияния волны разрежения от дневной поверхности и границы промерзшего слоя заглубление принималось равным 0,25—0,30 м, т. е.  $16 - 20 r_3$ ,  $13 - 16 r_3$ ,  $10 - 13 r_3$  при  $C$  (вес заряда), соответственно равным 25, 50, 75 г тротила, где  $r_3 = 0,054 \sqrt[3]{C}$  — радиус заряда.

В опытах измерялись радиальные ( $\sigma_r$ ) и тангенциальные ( $\sigma_\alpha$ ) главные нормальные напряжения, а также радиальные скорости ( $V_r$ ) и смещения ( $U_r$ ) частиц грунта.

Датчики устанавливались в скважины, высверленные ручным буром  $\varnothing 100$  мм. Перед окончательной установкой датчики выверялись, а затем трамбовались грунтом, ранее взятым из скважины и побывшим некоторое время в помещении с температурой, близкой к  $0^\circ\text{C}$ . Толщина первоначального слоя трамбования принималась равной удвоенному диаметру тензометрического датчика или датчика скорости и 7—10 см для заряда. После замерзания грунта вокруг датчиков и заряда скважины затрамбовывались до поверхности земли.

Измерение полей напряжений и скоростей проводилось в диапазоне расстояний от 10 до  $40 r_3$ . Были получены также единичные точки на расстояниях 8,9 : 51 и  $80 r_3$  при взрыве заряда  $C = 1,8$  г (взрыв детонатора).

Градуировка датчиков проводилась на открытом воздухе при температуре, примерно соответствующей температуре грунта ( $-3, -5^\circ\text{C}$ ). Замер температуры грунта и воздуха производился спиртовым термометром.

На рис. 1, а представлена осциллограмма записи напряжений, полученных при взрыве  $C = 0,025$  кг при температуре грунта  $\theta = -0,3^\circ\text{C}$ . Первый и шестой лучи осциллограммы соответствуют радиальным и тангенциальным напряжениям на расстоянии  $35 r_3$ ; второй и третий —  $\sigma_r$  и  $\sigma_\alpha$  на расстоянии  $22 r_3$ ; четвертый и пятый —  $\sigma_r$  и  $\sigma_\alpha$  на расстоянии  $9,5 r_3$ .

Второй, третий и четвертый лучи осциллограммы, представленной на рис. 1, б, соответствуют скоростям частиц грунта на расстояниях 8,9; 22,9 и  $35 r_3$  от центра взрыва. Отметка времени дается через 0,002 сек. Обрыв нижних лучей осциллограмм рис. 1 соответствует моменту взрыва.

Полученные экспериментальные данные показывают, что в мерзлом грунте, как и в обычных мягких грунтах [3—6] на близких расстояниях от центра взрыва ( $11-12 r_3$ ), что соответствует давлению 45—60 кг/см<sup>2</sup>, существуют ударные волны.

На расстояниях  $r > 20 \div 25 r_3$  ударные волны переходят в волны сжатия с постепенным нарастанием напряжения до максимального значения. В исследованном диапазоне ( $10 \leq R_0 \leq 40$ ) напряжения изменялись от 93 до 0,9 кг/см<sup>2</sup>.

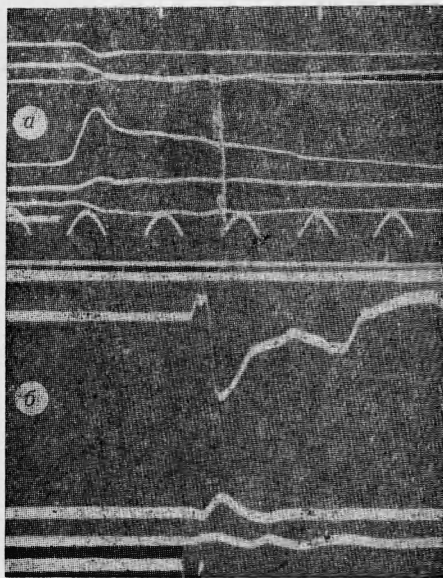


Рис. 1. Осциллограммы записи напряжений (а) и скоростей частиц (б) в мерзлом легком суглинке.

## ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ

Ниже приводятся опытные данные о поле напряжений и его изменении с удалением от центра взрыва и во времени.

На рис. 2 приведены данные об изменении максимальных радиальных и тангенциальных напряжений в зависимости от безразмерного расстояния  $R_0 = r/r_3$ , где  $r$  — абсолютное расстояние.

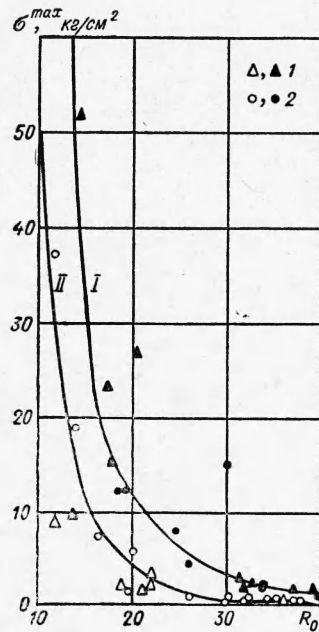


Рис. 2. График измерения максимальных радиальных  $\sigma_r^{\max}$  (I) и тангенциальных  $\sigma_a^{\max}$  (II) напряжений в зависимости от  $R_0 = r/r_3$ .  
1 —  $c=0,05$  кг; 2 —  $c=0,025$  кг.

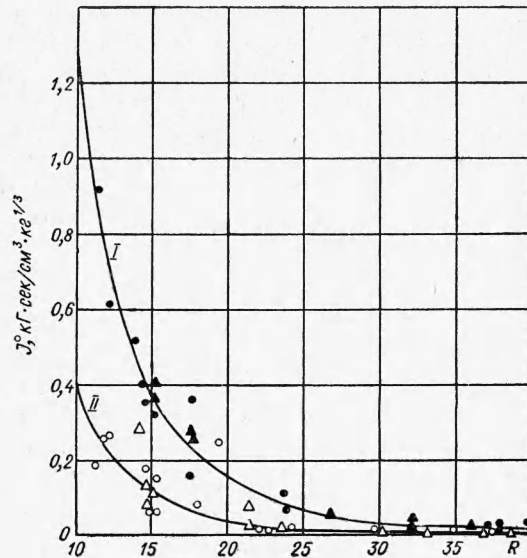


Рис. 3. График изменения полных удельных импульсов радиальных  $I_r^0$  (I) и тангенциальных  $I_a^0$  (II) напряжений в зависимости от  $R_0$ .

Обработка опытных данных методом наименьших квадратов показала, что изменение максимальных радиальных и тангенциальных напряжений в зависимости от  $R_0$  может быть представлено, как в [3—6] в виде

$$\sigma_r^{\max} = K_1 R_0^{-\mu_1}, \quad (1)$$

$$\sigma_a^{\max} = K_1' R_0^{-\mu_1},$$

где  $K_1$ ,  $K_1'$  и  $\mu_1$  — эмпирические коэффициенты, характеризующие грунт (табл. 2).

$K_1$	$K_1'$	$K_2$	$K_2'$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_5'$	$\lambda$	$\lambda_1$	$m$	$\mu_1$
$11,11 \cdot 10^5$	$3,35 \cdot 10^5$	1382	413	$11,38 \cdot 10^{-4}$	323	4730	1419	0,0548	0,1857	$12,87 \cdot 10^7$	3,82

Данные об изменении полных удельных импульсов радиальных и тангенциальных напряжений в зависимости от  $R_0$  представлены на рис. 3. Соответствующие эмпирические формулы имеют вид:

$$\begin{aligned} I_r^0 &= K_2 \cdot R_0^{-\mu_2}, \\ I_\alpha^0 &= K_2' \cdot R_0^{-\mu_2}, \end{aligned}$$

где  $K_2$ ,  $K_2'$  и  $\mu_2$  — опытные коэффициенты (табл. 2); верхний индекс «0» обозначает, что данная величина разделена на масштаб явления, т. е. на  $\sqrt[3]{C}$ .

По имеющимся опытным точкам выведены зависимости для удельных импульсов за максимумом напряжения в волне, формулы которых имеют вид:

$$\begin{aligned} I_{2r}^0 &= K_5 R_0^{-\mu_5}, \\ I_{2\alpha}^0 &= K_5' R_0^{-\mu_5} \end{aligned} \tag{2}$$

где  $K_5$ ,  $K_5'$  и  $\mu_5$  — опытные коэффициенты (см. табл. 2). Обработка опытных данных, характеризующих закон распространения максимальных напряжений (рис. 4) показала, что последний может быть представлен в исследованном диапазоне  $10 \leq R_0 \leq 40$  в виде

$$t_m^0 = K_3 (R_0^{\mu_3} - 1) 10^{-3} \text{ сек/кг}^{1/3}, \tag{3}$$

где  $t_m^0$  — время прихода фронта волны или максимального напряжения в данную точку;  $K_3$  и  $\mu_3$  — эмпирические коэффициенты (см. табл. 2).

Траектория упругих волн выражается прямой линией и аппроксимируется при  $10 \leq R_0 \leq 40$  формулой [6]:

$$t_1^0 = (a + \lambda R_0) 10^{-3}, \tag{4}$$

где  $t_1^0$  — время прихода упругой волны в данную точку;  $a$  и  $\lambda$  — эмпирические коэффициенты (см. табл. 2).

Дифференцируя выражения (3) и (4) по времени  $t$  при  $r_s = 0,054 \sqrt[3]{C}$ , получим, как в [6], формулу для определения скорости распространения ударной волны или максимальных напряжений:

$$D = \frac{54}{\mu_3 K_3 R_0^{\mu_3 - 1}} \text{ м/сек} \tag{5}$$

и упругой волны

$$a_0 = 54/\lambda \text{ м/сек},$$

где  $K_3$ ,  $\lambda$ ,  $\mu_3$  — эмпирические коэффициенты (см. табл. 2).

Таблица 2

$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$	$\mu_5$	$\mu_6$	$a$	$a_1$	$K_6$	$z$	$\nu$	$\xi$	$\theta$	$K$	$b$
3,025	2,245	1,58	3,56	2,91	0,290	17,9	$6,1 \cdot 10^3$	-0,133	2,87	0,30	0,154	2,25	1,45

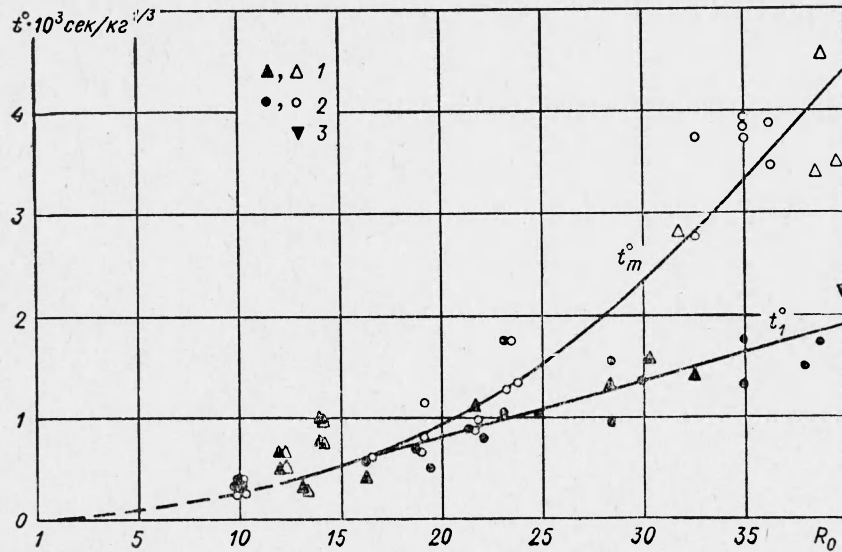


Рис. 4. Годографы фронта ударной ( $t_m^0$ ) и упругой ( $t_1^0$ ) волн.

1 —  $C=0,05$  кг; 2 —  $C=0,025$  кг; 3 —  $C=0,0018$  кг.

На рис. 5 представлен график зависимости  $D(R_0)$ , соответствующий выражению (5). Величина скорости распространения упругих волн  $a_0$  по опытным данным для мерзлого легкого сутлинка равна 985 м/сек.

Полученные результаты, характеризующие изменение полного времени действия волны  $\tau^0$  в зависимости от  $R_0$ , показаны на рис. 6 и аппроксимируются формулой вида [6]:

$$\tau^0 = (a_1 + \lambda R_0) 10^{-3},$$

где коэффициенты  $a_1$  и  $\lambda$  приведены в табл. 2. Для получения аналитического выражения закона изменения времени действия волны за фрон-

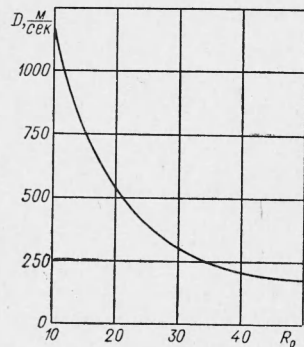


Рис. 5. Зависимость скорости распространения ударной волны (максимальных напряжений)  $D$  от  $R_0$ .

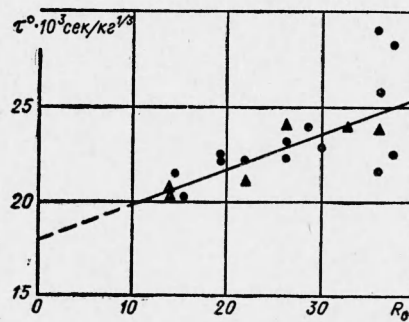


Рис. 6. График зависимости полного времени действия волны  $\tau^0$  от  $R_0$ .

том максимальных напряжений  $\tau_2^0$ , необходимо найти время нарастания напряжений до максимального значения  $\tau_1^0$  в зависимости от  $R_0$ . Последнее может быть определено разностью выражений (3) и (4):

$$\tau_1^0 = t_m^0 - t_1^0 = (K_2 R_0^{1/2} - \lambda R_0 + c) 10^{-3},$$

где  $c = K_3 - a$ . Время действия волны за максимумом напряжений  $\tau_2^0$  определится теперь по формуле

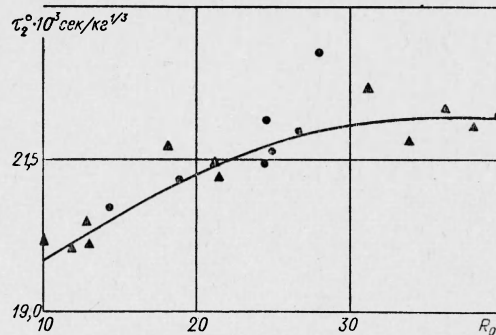
$$\tau_2^0 = \tau^0 - \tau_1^0 = (\lambda_2 R_0 - K_3 R_0^{\mu_3} + c), \quad (6)$$

где  $\lambda_2^0 = \lambda_1 + \lambda$ ;  $c_1 = a_1 - c$ .

Анализ кривой рис. 7 показывает, что до расстояний  $R_0 \leq 30$  величины  $\tau_2^0(R_0)$  довольно быстро нарастают, а затем наблюдается некоторая тенденция к спаду. Последнее объясняется, по-видимому, влиянием волны разрежения с поверхности земли.

Зная закономерности изменения максимальных напряжений

Рис. 7. Изменение времени действия волны за фронтом максимальных напряжений  $\tau_2^0$  в зависимости от  $R_0$ .



на фронте  $\sigma_r^{\max}(R_0)$ , удельных импульсов за фронтом  $I_{2r}^0(R_0)$  и времени действия за фронтом  $\tau_2^0(R_0)$ , можно найти закон изменения давления за фронтом в виде [6]:

$$\sigma(t) = \sigma_r^{\max} (1 - t/\tau_2^0)^n \text{ кг/см}^2,$$

где  $\sigma(t)$  — напряжение в данной точке за фронтом волны в момент  $t$ ;  $n$  — показатель степени бинома. Величина показателя степени бинома определится из соотношения

$$I_{2r}^0 = \int_0^{\tau_2^0} \sigma_r^{\max} (1 - t/\tau_2^0)^n dt = \frac{\sigma_r^{\max} \tau_2^0}{n + 1};$$

$$n = \frac{\sigma_r^{\max} \tau_2^0}{I_{2r}^0} - 1. \quad (7)$$

Подставляя в (7) значения  $\sigma_r^{\max}$ ,  $I_{2r}^0$  и  $\tau_2^0$ , выраженные соответственно формулами (1), (2) и (6), найдем

$$n = \frac{K_1 R_0^{-\mu_1}}{K_5 R_0^{-\mu_5}} (\lambda R_0 - K_3 R_0^{\mu_3} + c_1) 10^{-3} - 1.$$

#### ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ И СМЕЩЕНИЙ ЧАСТИЦ ГРУНТА

На рис. 8 и 9 приводятся опытные данные о зависимости максимальных скоростей частиц  $V_{\max}^0$  и максимальных радиальных смещений  $U_{\max}^0$  от безразмерного расстояния  $R_0$  от центра взрыва, полученные по записям датчиков скоростей и смещений. Соответствующие

эмпирические формулы, полученные при обработке этих данных методом наименьших квадратов, имеют вид:

$$V_{\max}^0 = K_4 R_0^{-\mu_4}; \quad (8)$$

$$U_{\max}^0 = K_6 R_0^{-\mu_6},$$

где  $K_4$ ,  $\mu_4$ ,  $K_6$  и  $\mu_6$  — опытные коэффициенты, приведенные в табл. 2.

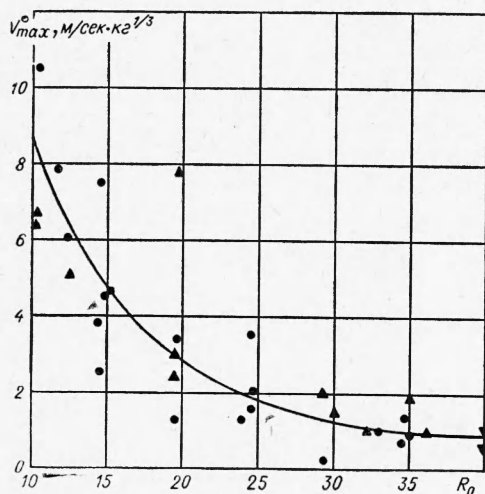


Рис. 8. График зависимости максимальных скоростей частиц грунта  $V_{\max}^0$  от  $R_0$ .

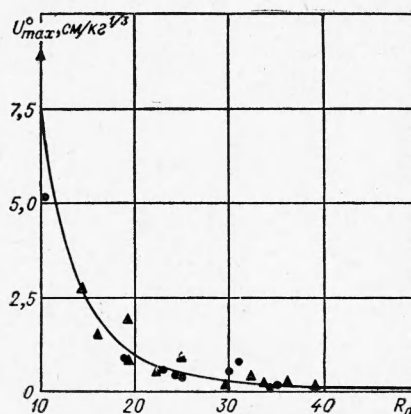


Рис. 9. График зависимости максимальных радиальных смещений  $U_{\max}^0$  от  $R_0$ .

Непосредственное измерение массовых скоростей частиц грунта позволяет проверить выполнение законов сохранения массы и количества движения на фронте ударной волны и тем самым подтвердить факт существования ударных волн в мерзлом грунте, как это было сделано ранее для песчаных и глинистых грунтов [5, 7].

В табл. 3 приведены данные о величинах максимальных напряжений, подсчитанных по формуле

$$\sigma_r^* = \rho_0 V_{\max}^0 D,$$

$V_{\max}^0$  и  $D$  определены по формулам (5) и (8), а также о величинах напряжений  $\sigma_r^{\max}$ , полученных путем непосредственных измерений на различных расстояниях  $R_0$  от центра взрыва.

Таблица 3

$R_0$	$\sigma_r^{\max}$ , кг/см <sup>2</sup>	$\sigma_r^*$ , кг/см <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_r^{\max} - \sigma_r^*}{\sigma_r^{\max}}$ , %
10	168,0	193,0	14,9
11	116,5	142,0	21,9
12	85,5	110,0	28,7
15	35,2	64,8	84,2
20	11,9	27,6	132,0
30	2,55	6,64	160,1
40	0,863	2,92	233,0

Анализ данных табл. 3 показывает, что при  $R_0 < 13$  величины  $\sigma_r^*$  и  $\sigma_r^{\max}$  отличаются не более чем на 30%, а при  $R_0 > 13$  расхождение этих величин быстро нарастает. Это и свидетельствует о том, что при  $R_0 < 13$  в данном грунте имеют место ударные волны со скачком напряжения на фронте.

**ОБЪЕМНАЯ СЖИМАЕМОСТЬ И УСЛОВИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ**

Опытные данные о  $\sigma_r^{\max}(R_0)$ ,  $\sigma_a^{\max}(R_0)$  и  $D(R_0)$  позволяют получить сведения об объемной сжимаемости и условия пластичности для мерзлого грунта.

Используя законы сохранения на фронте ударной волны, получим диаграмму объемного сжатия [6]

$$P_* = m \Theta_*^v, \tag{9}$$

где

$$m = \frac{1 + 2\xi}{3} \cdot \frac{\rho_0 54^2}{\mu_3^2 K_3^2} \Theta_1^{-\frac{\mu_3 - 1}{z}}; \quad \Theta_1 = \frac{K_1}{\rho_0} \left( \frac{\mu_3 K_3}{54} \right)^2;$$

$$v = \left[ 1 - \frac{2(\mu_3 - 1)}{\mu_1} \right]^{-1}; \quad z = \mu_1 - 2(\mu_3 - 1).$$

Соответствующие значения величин  $m$ ,  $z$ ,  $\Theta_1$ ,  $v$  и  $\xi$  приведены в табл. 2.

На рис. 10 приведена кривая  $p(\Theta)$  (1), построенная по формуле (9) для мерзлого грунта, приведены для сравнения данные о сжимаемости песчаного грунта, показанные в работе [6] (кривая 3), и глин с объемным весом  $\lambda = 2,1 \text{ г/см}^3$  при влажности  $W = 20 \div 23\%$ , по данным опытов С. С. Григоряна, Г. В. Рыкова и др., проведенных в 1963 г. в районе ст. Гжель (кривая 2). Сопоставление этих данных показывает, что сжимаемость мерзлого грунта в значительной степени меньше сжимаемости грунта, имеющего положительную температуру. Это можно объяснить влиянием на сжимаемость мерзлого грунта цементирующих свойств льда.

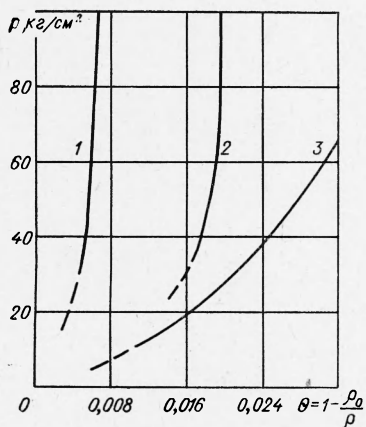


Рис. 10. Диаграмма объемного сжатия мерзлого легкого суглинка при воздействии динамической нагрузки —  $p(\Theta)$ .

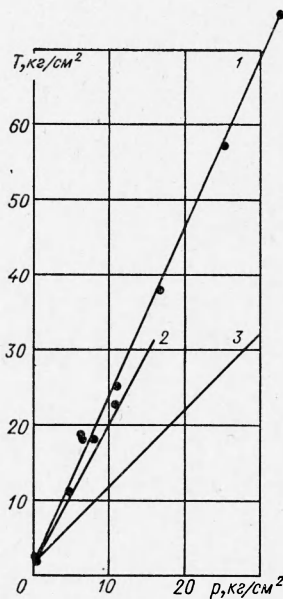


Рис. 11. График условия пластичности мерзлого легкого суглинка  $T = \sqrt{6 I_2}$ .



По данным о поле напряжений для мерзлых грунтов может быть получено условие пластичности, как и для мягких грунтов [1—7] в виде

$$I_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{6} F^2(p),$$

где  $I_2$  — второй инвариант девиатора тензора напряжений;  $S_{ij} = \sigma_{ij} + p\delta_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  — компоненты тензора напряжений;  $F(p)$  — некоторая функция, определяемая экспериментально;  $p = \frac{1}{3} \sigma_{ii}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) — среднее гидростатическое давление. В условиях данных опытов  $\sigma_{11} = \sigma_r$ ;  $\sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma_a$ ;  $\sigma_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ .

Как видно из рис. 11, зависимость  $T = \sqrt{6I_2}$  от  $p$  может быть представлена в виде

$$T = Kp + b,$$

где  $K$  и  $b$  коэффициенты, характеризующие внутреннее трение и сцепление в грунте (см. табл. 2).

Из сопоставления величин  $K$  и  $b$  для исследуемого мерзлого грунта (кривая 1, рис. 10) с данными для песчаного (кривая 2) и упомянутых выше глин (кривая 3) видно, что величины сцепления в мерзлом суглинистом грунте заметно больше, чем в песках (мерзлый суглинок — 1,45, песок — 0,5 и глина 2,0 кг/см<sup>2</sup>). Значительная величина сцепления суглинистого грунта в мерзлом состоянии объясняется наличием в нем льда, обладающего значительными цементирующими свойствами. Этим, по-видимому, можно объяснить и некоторый рост значений  $K$ , свидетельствующих об увеличении сил внутреннего трения с понижением температуры за счет повышения суммарной льдистости грунта.

Поступила в редакцию  
8/VIII 1966

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Григорян. Докл. АН СССР, 1959, 124, 2.
2. С. С. Григорян. ПММ, 1960, 24, 6.
3. В. Д. Алексеенко, С. С. Григорян и др. Докл. АН СССР, 1960, 133, 6.
4. В. Д. Алексеенко, С. С. Григорян и др. ПМТФ, 1963, 2.
5. С. С. Григорян, Г. М. Ляхов и др. ПМТФ, 1963, 4.
6. Г. В. Рыков. ПМТФ, 1964, 1.
7. В. В. Мельников, Г. В. Рыков. ПМТФ, 1966, 1.