

С. Р. Месчян

## Экспериментальное изучение закономерностей деформаций ползучести глинистого грунта

Для решения задач теории уплотнения земляных масс с учетом ползучести скелета грунта [1], а также определения напряженного состояния и деформаций маловлажных грунтов с учетом фактора времени необходимо знать закономерности деформирования и характеристики ползучести, определяемые из опыта.

Имея в виду сложность явления ползучести, его зависимость от таких факторов как напряжение, скорость и продолжительность его действия, а также состояние (плотность, влажность, структурная прочность и т. д.) в момент загрузки, при изучении закономерностей деформирования и математической интерпретации полученных результатов необходимо возможно полнее учесть влияние указанных факторов.

Нашими работами показано [2,3], что для описания закономерностей деформирования во времени глинистых грунтов как при сжатии в условиях отсутствия бокового расширения, так и при сдвиге наиболее удобными являются физические уравнения наследственной теории старения (теория упруго-ползучего тела) Г. Н. Маслова—Н. Х. Арутюняна [4,5]. Отличительной чертой указанной теории является то, что она позволяет учесть изменяемость механических свойств материала под влиянием различных факторов.

Исходя из того, что глинистый грунт является именно таким материалом, который в зависимости от различных факторов (плотность, влажность и т. д.) изменяет свои физико-механические свойства, мы нашли целесообразным при изучении закономерностей ползучести глинистых грунтов, при сжатии в условиях отсутствия бокового расширения, пользоваться указанной теорией.

В целях изучения закономерностей деформации глинистых грунтов при сжатии во времени в условиях отсутствия бокового расширения (условие одномерной задачи уплотнения) и определения характеристик ползучести их скелета были исследованы суглинки и глина, отобранные в Разданском районе Армянской ССР, а также новошвейцарская глина при четырех различных состояниях их плотности и влажности к началу испытания.

Испытания образцов грунта проводились в приборах нашей конструкции [2] при следующих размерах образцов: диаметр—70 мм, высота—20 мм. Структура грунта нарушенная. Влажность грунтовой пасты в момент заполнения колец соответствовала его влажности при пределе текучести. Повторность опытов двукратная.

Ввиду небольшой толщины испытываемых образцов стало возможным пренебречь влиянием фактора фильтрации на величину скорости деформации грунта и все полученные результаты отнести к его скелету. Вопрос выделения деформации ползучести скелета из общего процесса уплотнения водонасыщенного грунта подробно рассмотрен в работе [6].

Настоящая работа посвящена изучению закономерностей деформации и описанию семейств кривых ползучести суглинка, выполненного в соответствии с основными положениями теории упруго-ползучего тела [4,5]. Основные сведения о физических свойствах грунта приведены в табл. 1. Результаты исследования разданской глины приведены в [7], испытания новошвейцарской глины продолжаются.

Таблица 1

Лабораторный № грунта	Наименование грунта	Удельный вес в $г/см^3$	Влажность пасты до опыта в %	Степень влажности $G$	Пределы пластичности		
					предел текучести	граница пластичности	число пластичности
2-57	Суглинок	2,66	33,3	0,97	31,3	18,6	12,7

Было проведено 4 серии испытаний грунта при различных значениях его плотности. Подготовка образцов указанных серий выполнялась предварительным уплотнением их нагрузками различной величины. Предварительно уплотняющие нагрузки  $P_n$  были равны 0,25, 1,25, 2,25 и 4,25  $кг/см^2$ . Было испытано 36 образцов. Причем в первой и второй сериях были испытаны по восемь образцов при четырех значениях нагрузок: 0,25, 0,5, 0,75 и 1,0  $кг/см^2$ , а в двух остальных сериях по десять образцов при пяти значениях нагрузок: 0,25, 0,5, 0,75, 1,0 и 1,5  $кг/см^2$ . Указанные нагрузки прикладывались к образцам на полную величину, за предельно короткое время, без ударов. Отсчеты по индикаторам часового типа ценою деления 0,010 и 0,002 мм брались сейчас же после приложения нагрузки ( $t \approx 0$ ) и далее через 5, 10, 20, 30, 60 сек, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 30, 60 мин и через каждые сутки. Опыты продолжались 14 месяцев, с декабря 1960 г. по февраль 1962 г. При этом продолжительность предварительного уплотнения была равна двум месяцам.

Использование отдельных образцов для определения ползучести от заданной постоянной нагрузки диктовалось необходимостью исключения влияния истории загрузки на их деформацию.

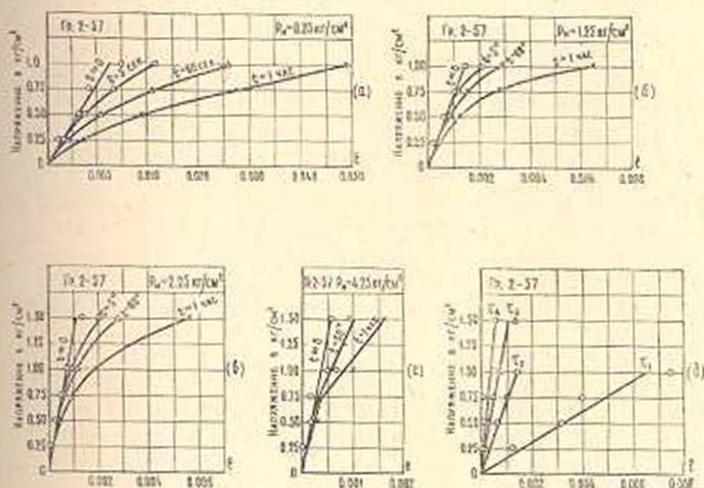
Порядок выполнения эксперимента соответствовал основным положениям и требованиям теории упруго-ползучего тела [4,5].

Рассмотрим результаты эксперимента в соответствии с теорией упруго-ползучего тела, согласно которой полная относительная деформация материала рассматривается как сумма мгновенных деформаций и деформации ползучести

$$l(t) = l_{\text{мгн}} + l_{\text{полз}}(t), \quad (1)$$

где  $l(t)$  — полная относительная деформация к моменту времени  $t$ .

На графиках а, б, в и г фиг. 1 приведены кривые зависимости между сжимающими напряжениями  $P$  и деформациями  $l$  для четырех



Фиг. 1.

фиксированных значений продолжительности действия нагрузок:  $t \approx 0$ ,  $t = 5$  сек,  $t = 60$  сек и  $t = 1$  час.

Из указанных графиков, в первую очередь, следует, что для всех рассмотренных серий образцов, которые отличаются друг от друга состоянием плотности-влажности в момент испытания (обусловленным величиной предварительно уплотняющей нагрузки  $P_0$ ), зависимость между напряжениями и деформациями при  $t \approx 0$  с достаточной точностью аппроксимируется прямой, т. е. зависимость между напряжениями и „мгновенными“ деформациями линейна и справедливо одно из основных положений теории упруго-ползучего тела для рассматриваемого случая.

На графике д (фиг. 1) приведены кривые зависимости  $l_{\text{мгн}} = f(P)$  для всех четырех серий образцов при  $t \approx 0$ . На этом графике буквами  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  и  $\tau_4$  обозначены кривые, определенные при  $P_0 = 0.25, 1.25, 2.25$  и  $4.25$  кг/см<sup>2</sup> соответственно. Как следует из указанного графика, по мере увеличения плотности образцов грунта к началу испытания увеличивается угол наклона их к оси абсцисс, увеличивается модуль мгновенной деформации.

Из приведенных на фиг. 1 графиков также следует, что по мере нарастания длительности загрузения существующая линейная зависимость между напряжениями и деформациями, благодаря проявлению

деформации ползучести, постепенно нарушается. Причем характер этих кривых говорит о более быстром росте деформации материала по сравнению с ростом нагрузок, что свойственно грунтам, обладающим сравнительно прочным структурным каркасом, структурной прочностью. При этом нетрудно также заметить, что при нагрузках порядка  $0.5-0.75 \text{ кг/см}^2$ , в зависимости от величины предварительно уплотняющей нагрузки  $P_n$ , в небольших интервалах времени после начала загрузки деформации ползучести практически не проявляются. В частности, для  $P_n = 0.25 \text{ кг/см}^2$  деформация ползучести не проявляется при  $t = 5 \text{ сек}$ , а для  $P_n = 4.25 \text{ кг/см}^2$  —  $t = 1 \text{ мин}$ . В отличие от этого при  $P > 0.5-0.75 \text{ кг/см}^2$  имеет место интенсивный рост деформации по мере увеличения нагрузок.

Изложенное поведение грунта еще раз говорит о том [7], что при малых нагрузках и небольших интервалах их действия деформации протекают без разрушения каркаса. Следует к этому добавить, что, как показывают эксперименты, указанные деформации обратимы, т. е. имеют упругую природу.

Рассмотрим результаты опытов и описание кривых ползучести, определенных путем исключения „мгновенных“ деформаций из общих.

На графиках фиг. 2 и 3 сплошными линиями показаны четыре семейства кривых ползучести, соответствующих испытаниям указанной выше серии образцов-близнецов, после их предварительного уплотнения нагрузками  $P_n = 0.25, 1.25, 2.25$  и  $4.25 \text{ кг/см}^2$ . На указанных фигурах, помимо кривых ползучести, приведены также кривые зависимости между напряжениями и деформациями ползучести, соответствующие различным фиксированным значениям продолжительности действия нагрузок.

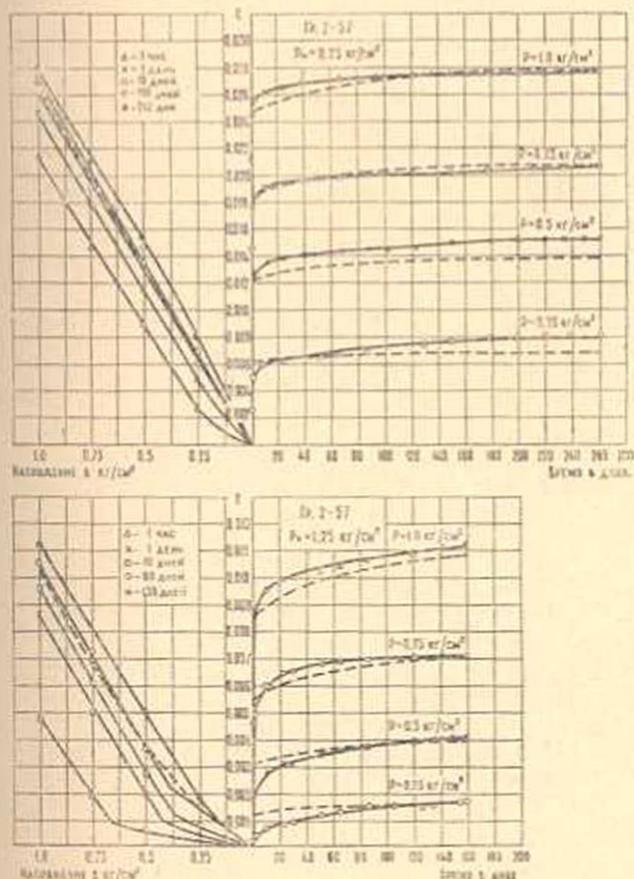
Из графиков фиг. 2 и 3 следует, что: 1) с увеличением нагрузки  $P$  (во всех состояниях грунта, определяемых  $P_n$ ) изменяется характер кривых ползучести. Как правило, при малых нагрузках кривые ползучести более пологие, тогда как при сравнительно больших нагрузках до 80% деформации протекают в течение первых суток; 2) имеет место существенное изменение вида кривых ползучести при переходе от одного состояния грунта к другому вследствие увеличения начальной плотности испытываемого грунта. Это говорит о неподобии кривых ползучести, определенных как при различных состояниях грунта, так и при различных значениях сжимающих (уплотняющих) нагрузок. Все отмеченные выше изменения вида кривых ползучести грунта обусловлены прочностью структурного каркаса и величиной приложенной нагрузки [7].

За изменением деформации ползучести в зависимости от напряжения удобнее всего проследить по кривым, отображающим эту связь для различных фиксированных значений продолжительности деформирования  $t$ , приведенных на левых частях графиков фиг. 2 и 3.

По характеру кривых, приведенных на фиг. 2 и 3, кривые  $l_{\text{полз}} = f(P)$  можно разбить на две группы. К первой группе можно отнести семейство кривых, соответствующих  $P_n = 0.25 \text{ кг/см}^2$ , а все остальные ( $P_n = 1.25, 2.25$  и  $4.25 \text{ кг/см}^2$ ) — ко второй группе.

Проследим за ходом изменения кривых  $l_{\text{полз}} = f(P)$  указанных групп в отдельности.

Отличительной особенностью семейства кривых  $l_{\text{полз}} = f(P)$  для  $P_n = 0.25 \text{ кг/см}^2$  является то, что в зависимости от увеличения длительности испытания указанные кривые три раза изменяют свою фор-

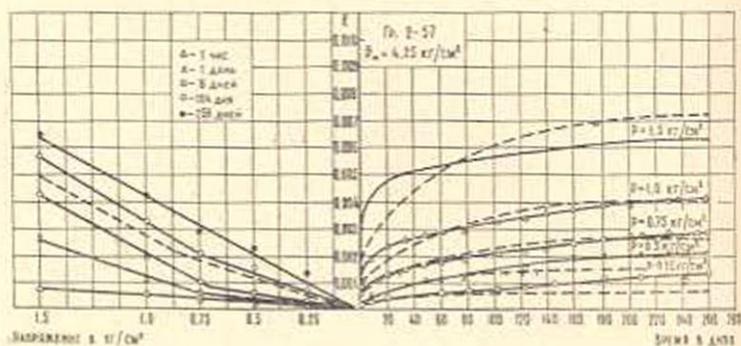
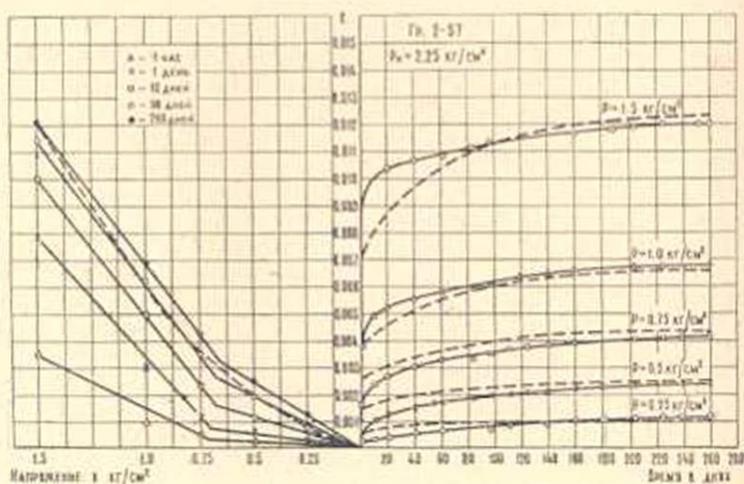


Фиг. 2.

му. В начале эксперимента (при  $t < 1$  дню) указанные кривые характеризуют разупрочнение грунта, а в конце эксперимента (при  $t = 262$  дням) — уплотнение и упрочнение грунта по мере увеличения сжимающих (уплотняющих) нагрузок [8]. В промежутке между началом и концом испытания зависимость между напряжениями и деформациями переходит через стадию, где она определяется линейным законом. Причиной формоизменения кривых  $l_{\text{полз}} = f(P)$  являются структурная прочность грунта, величина и длительность воздействия приложенной нагрузки. Подробный анализ причин формоизменения

кривых  $l_{полз} = f(P)$  глинистого грунта в зависимости от указанных факторов приведен в работе [7].

Рассмотрим поведение  $l_{полз} = f(P)$  второй группы кривых при различных значениях длительности загрузки  $t$ , соответствующих более высоким значениям начальных уплотняющих нагрузок.



Фиг. 3.

В указанном случае кривые  $l_{полз} = f(P)$  аппроксимируются двумя прямыми, характеризующими две области деформирования. Как в первой, так и во второй областях зависимость между напряжениями и деформациями выражается линейным законом. Однако, указанные прямые имеют различные углы наклона к оси ординат. В первой области угол наклона, а следовательно, модуль деформации  $E$ , больше, чем во второй. Иначе говоря, при переходе от одной области деформирования в другую имеет место разупрочнение грунта, а по виду кривой мы здесь формально имеем дело с законом деформирования упруго-пластического тела, обладающего линейным упрочнением [9].

В первой области деформирования мы имеем дело со структурно-адсорбционными деформациями, а во второй—структурными деформациями [10]. Причем переход из одной области в другую является результатом разрушения структурного каркаса, частичного или полного устранения сцепления упрочнения нагрузками, превышающими структурную прочность грунта. При этом показателем структурной прочности может служить величина напряжения, которая соответствует точке перелома кривой  $l_{\text{полз}} = f(P)$ . По аналогии с пределом пропорциональности (упругости), она может быть названа *пределом структурной прочности*.

Чем выше плотность, меньше влажность, а следовательно, больше прочность структурных связей, тем выше значение предела структурной прочности. Одновременно, предел структурной прочности зависит от длительности испытания. Чем больше длительность испытания, тем меньше величина предела структурной прочности. Уменьшение предела структурной прочности по причине увеличения длительности испытания обусловлено длительностью процесса разрушения структурного каркаса.

Рассмотрим результаты описания семейств кривых ползучести в зависимости от напряжения, длительности деформирования и состояния грунта к началу испытания.

В основу описания семейств кривых ползучести положены реологические уравнения состояния теории упруго-ползучего тела [4,5], полученные для случаев линейного (2) и нелинейного (3) закона деформации ползучести

$$l(t) = \frac{P(t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^t P(\tau) \frac{1}{\partial \tau} \left[ \frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \right] d\tau; \quad (2)$$

$$l(t) = \frac{P(t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^t P(\tau) \frac{1}{\partial \tau} \left[ \frac{1}{E(\tau)} \right] d\tau - \int_{\tau_2}^t F[P(\tau)] \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau; \quad (3)$$

где  $l(t)$ —полная относительная деформация к моменту времени  $t$ ,  $P(t)$  и  $E(t)$ —напряжение и модуль мгновенной деформации к моменту времени  $t$ ,  $P(\tau)$ —изменяющееся во времени напряжение, а  $\frac{\partial}{\partial \tau} \left[ \frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \right]$ —ядро интегрального уравнения, которое представляет собою скорость деформации ползучести от единичной нагрузки  $P=1 \text{ кг/см}^2$  [9].

В выражение ядра интегрального уравнения входят: 1) изменяющийся во времени модуль мгновенной деформации и 2) мера ползучести  $C(t, \tau)$ .

Вид функции  $E = E(\tau)$  определяется кривой, построенной по значениям величин модулей мгновенных деформаций в зависимости

от возраста материала.  $C(t, \tau)$  определяется экспериментальной кривой ползучести, соответствующей  $P = 1 \text{ кг/см}^2$ .

Для описания кривых ползучести бетона в теории упруго-ползучего тела пользуются выражением [2] меры ползучести следующего вида

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}], \quad (4)$$

где  $\varphi(\tau)$  — некоторая функция старения, характеризующая изменчивость предельного значения меры ползучести  $C$  в зависимости от возраста грунта,  $e$  — основание натуральных логарифмов,  $\gamma$  — параметр  $\left(\frac{1}{\text{время}}\right)$ ,  $t$  — время, относительно которого определяется деформация, а  $\tau$  — момент приложения нагрузки, который одновременно характеризует возраст бетона.

Функция старения  $\varphi(\tau)$  в общем случае представляется в виде ряда [5]

$$\varphi(\tau) = C_0 + \sum_{k=1}^m \frac{A_k}{\tau^k}. \quad (5)$$

В большинстве случаев оказывается возможным ограничиваться двумя членами ряда [5], тогда

$$C(t, \tau) = \left(C_0 + \frac{A_1}{\tau}\right) [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}], \quad (6)$$

где  $C_0$  и  $A_1$  — параметры,  $\tau$  — возраст материала (момент приложения нагрузки).

На фиг. 4 приведены кривые ползучести, соответствующие напряжению  $P = 1 \text{ кг/см}^2$ , определенные при четырех различных состояниях серии образцов ( $P_n = 0.25, 1.25, 2.25$  и  $4.25 \text{ кг/см}^2$ ), на основании которых определены параметры, входящие в выражение меры ползучести.

Учитывая то положение, что под „возрастом“ грунта мы понимаем его состояние, которое в рассматриваемом случае определяется плотностью, приобретенной грунтом в результате предварительного уплотнения (фиг. 4), для описания кривых ползучести пользовались двумя шкалами абсцисс. В соответствии с изложенным, в выражении функции старения  $\varphi(\tau)$  индекс  $\tau$  заменили на  $P_n$ .

В отличие от [5], при описании кривых ползучести мы пользовались выражением несколько иного вида [7]:

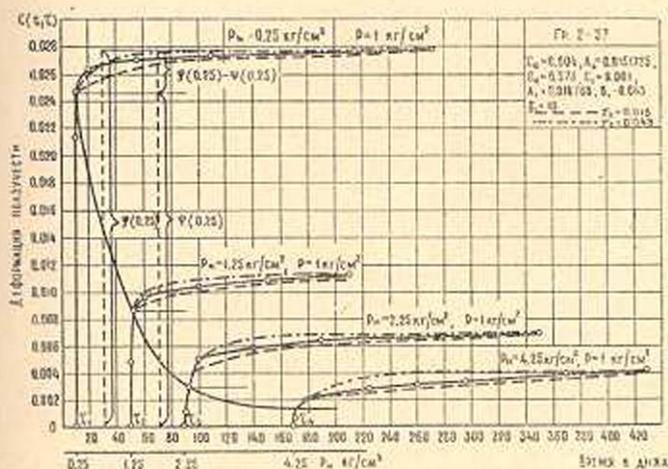
$$C(t, P_n) = \psi(P_n) + [\varphi(P_n) - \psi(P_n)] [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}], \quad (7)$$

где  $\psi(P_n)$  — некоторая зависящая от состояния грунта функция, представляющая собою деформацию образца к некоторому небольшому отрезку времени (один час или один день).

Согласно выражению (7), деформация ползучести разбивается: 1) на деформацию, протекающую практически мгновенно по сравне-

нию с большой продолжительностью испытания, исчисляющейся месяцами и годами, и 2) на деформацию, протекающую довольно медленно в течение всего эксперимента. Продолжительность времени, в течение которого скорости ползучести очень высокие, ограничивается одними сутками. Следует также отметить, что чем выше прочность грунта, тем меньше величина деформации, протекающей за указанный интервал времени.

Функция  $\psi(P_n)$  характеризует влияние состояния материала на величину деформации ползучести для рассматриваемого небольшого отрезка времени, поэтому ее вид совпадает с выражением функции старения (5).



Фиг. 4.

Введение дополнительной функции  $\psi(P_n)$  в выражение (4) диктовалось необходимостью сгладить имеющее место отличие в видах кривых ползучести (неподобие), определенных в различных состояниях грунта [2]. Было бы правильнее для указанной цели применение переменной величины параметра  $\gamma$  [ $\gamma = \gamma(P_n)$ ], однако, это привело бы к значительному усложнению рассматриваемого выражения. Ясно, что при испытании достаточно плотных и прочных грунтов необходимость в использовании выражения (7) отпадает.

Учитывая, что зависимость (7) не удовлетворяет начальному условию, т. е. при  $t=0$   $C(t, P_n) \neq 0$ , эта зависимость была записана в следующем виде

$$C(t, P_n) = \psi(P_n) [1 - e^{-\gamma_1(t-\tau)}] + [\varphi(P_n) - \psi(P_n)] [1 - e^{-\gamma_2(t-\tau)}]. \quad (8)$$

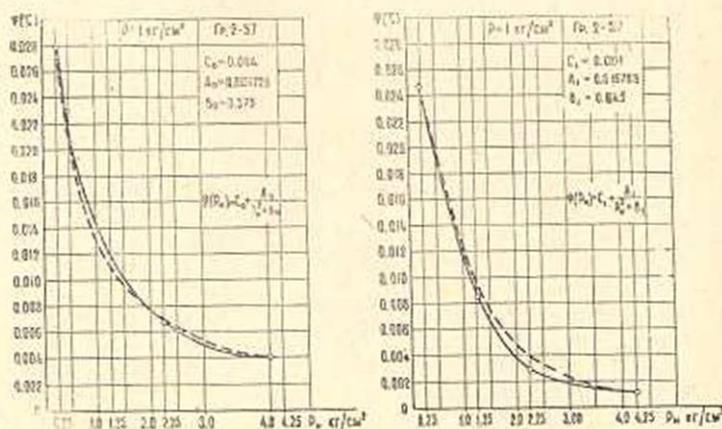
Исходя из изложенного, параметр  $\gamma_1$  подбирается так, чтобы при интервале времени, равном одному часу или одному дню (в зависимости от характера кривых ползучести и продолжительности испытания),  $e^{-\gamma_1(t-\tau)} = 0$ .

Для описания семейства кривых ползучести можно пользоваться также выражением вида (9), которое в ряде случаев приводит к хорошей аппроксимации экспериментальных кривых [19]

$$C(t, P_n) = \varphi(P_n) [1 - k(e^{-\gamma_1(t-\tau)} + e^{-\gamma_2(t-\tau)})], \quad (9)$$

где  $k$ —некоторый постоянный коэффициент.

При описании приведенных на фиг. 4 кривых за интервал времени  $(t-\tau)$ , при котором в выражении (8)  $e^{-\gamma_1(t-\tau)} = 0$ , принят один день и в соответствии с этим определены параметры, входящие в выражение  $\varphi(P_n)$ . Параметры функции  $\varphi(P_n)$  определены по кривой, построенной по конечным значениям деформации ползучести рассматриваемых четырех состояний (фиг. 5). Здесь под  $\tau$  подразумевается момент времени приложения нагрузки, определяемый по шкале времени фиг. 4.



Фиг. 5.

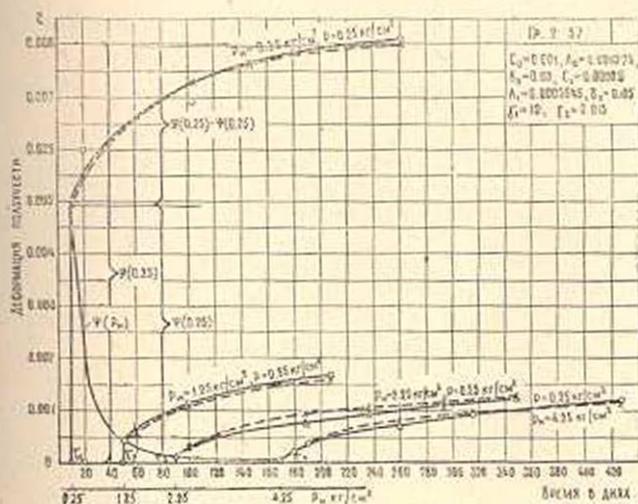
Вид кривых ползучести изменяется не только в связи с увеличением плотности и прочности (изменением состояния), но и в зависимости от величины ступени нагрузки. Поэтому для подбора параметра  $\gamma_2$  мы пользовались не только семейством кривых ползучести от единичной нагрузки (фиг. 4), но и кривыми, определенными при  $P = 0.25 \text{ кг/см}^2$  (фиг. 6). Кривые функций  $\psi(P_n)$  и  $\varphi(P_n)$ , соответствующие семейству кривых ползучести, приведенному на фиг. 6, показаны на фиг. 7.

На графиках фиг. 4 и 6 пунктирными линиями показаны кривые ползучести, построенные по выражению (8) при соответствующем подборе параметров и двух значениях  $\gamma_2$  ( $\gamma_2 = 0.015 \frac{1}{\text{день}}$  и  $0.049 \frac{1}{\text{день}}$ ).

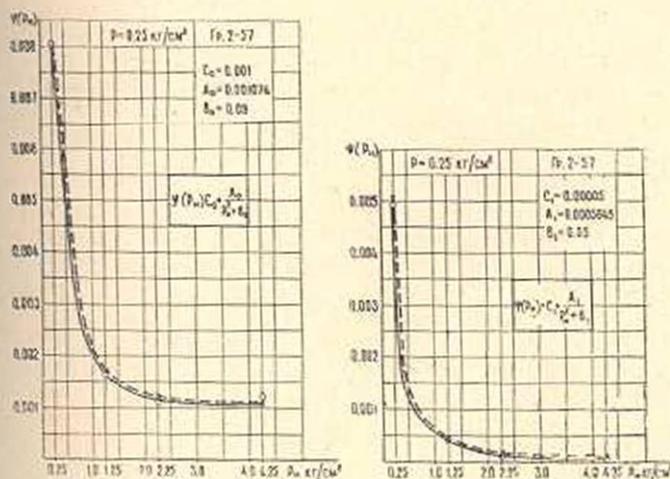
Использование параметра  $\gamma_2 = 0.015$  дает очень хорошее совпадение экспериментальных кривых с кривыми, построенными по выражению (8); что же касается другого значения параметра  $\gamma_2 = 0.049$ , то его использование приводит к хорошему совпадению указанных

кривых при  $P = 1 \text{ кг/см}^2$  и  $P_n = 0.25 \text{ кг/см}^2$ , т. е. в случае небольшой плотности и структурной прочности образцов грунта.

Таким образом, с помощью выражения (8) и соответствующего подбора параметров мы описали семейство кривых ползучести от единичных нагрузок с учетом влияния начальной уплотняющей нагрузки  $P_n$ .



Фиг. 6.



Фиг. 7.

Чтобы полученные результаты распространить на все четыре семейства кривых ползучести, приведенные на фиг. 2 и 3, необходимо в выражение меры ползучести ввести напряжение. Если бы зависимость между напряжениями и деформациями ползучести для всех фиксированных моментов времени определялась линейным законом, то для определения деформации от любой нагрузки было бы достаточно правую часть выражения (8) умножить на  $P$ . Однако, учиты-

вая наличие нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести, для перехода от кривых ползучести, соответствующих единичным нагрузкам (фиг. 4), к другим кривым ползучести необходимо правую часть (8) умножить на некоторую зависящую от  $P$  функцию (функция напряжения), которая позволит учесть нелинейность деформации ползучести [5].

Деформация ползучести к некоторому моменту времени в нашем случае будет определяться следующей зависимостью

$$l_{\text{полз}}(P, P_n, t) = [\psi(P_n) [1 - e^{-\gamma(t-t^*)}] + [\varphi(P_n) - \psi(P_n)] [1 - e^{-\gamma(t-t^*)}]] \times \\ \times F(P, P_n, t) = C(t, P_n) \cdot F(P, P_n, t), \quad (10)$$

где  $F(P, P_n, t)$ —функция напряжения, которая при  $P = 1 \text{ кг/см}^2$  должна удовлетворять условию  $F(1) = 1$ .

Вид функции напряжений зависит от состояния грунта в момент испытания и величин нагрузок. В частности, для свежих паст она определяется зависимостью вида (11) [2]

$$F(P, P_n, t) = d_0(t, P_n) [1 - e^{-\gamma(t, P_n)P}]. \quad (11)$$

В рассматриваемом в этой работе случае мы воспользовались зависимостью вида (12), заимствованной из теории ползучести бетона [11]

$$F(P, P_n, t) = \alpha(t, P_n)P + \beta(t, P_n)P^n, \quad (12)$$

где  $d_0(t, P_n)$ ,  $\gamma(t, P_n)$ ,  $\alpha(t, P_n)$  и  $\beta(t, P_n)$ —некоторые функции, зависящие от длительности испытания  $t$  и состояния материала в момент испытания;  $n$ —параметр, величина которого для грунтов равна  $n = 2$ .

В соответствии с условием  $P(1) = 1$  зависимость (12) должна удовлетворять условию

$$\alpha(t, P_n) + \beta(t, P_n) = 1. \quad (13)$$

Допуская наличие подобия между кривыми ползучести, в качестве первого приближения были описаны семейства кривых ползучести (фиг. 2 и 3) при помощи выражений (10) и (12). Из указанного допущения следует, что

$$F(P, P_n) = \alpha(P_n)P + \beta(P_n)P^2, \quad (14)$$

т. е. функция напряжения не зависит от продолжительности испытания  $t$ , а зависимости между напряжениями и деформациями ползучести выражены некоторыми усредненными кривыми, показанными пунктирами на левых частях графиков фиг. 2 и 3.

Определение параметров  $\alpha(P_n)$  и  $\beta(P_n)$  было выполнено графически в следующем порядке.

Вначале, согласно (14), записывалось уравнение кривой  $l_{\text{полз}} = f(P)$  в виде

$$l_{\text{полз}} = \alpha_1 P + \beta_1 P^2, \quad (15)$$

а затем [12];

$$\frac{l_{\text{полз}}}{P} = \alpha_1 + \beta_1 P. \quad (16)$$

Параметры  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  определялись из графика  $\frac{l_{\text{полз}}}{P} = f(P)$ , а параметры, входящие в зависимость (14), — делением  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  на величину деформации ползучести, соответствующую  $P = 1 \text{ кг/см}^2$ .

В табл. 2 приведены величины параметров  $\alpha$  и  $\beta$  четырех значений начальных уплотняющих нагрузок, а на фиг. 8 приведены графики.

Таблица 2

Начальная уплотняющая нагрузка в $\text{кг/см}^2$	0,25	1,25	2,25	4,25
$\alpha$	1	0,46	0,322	0,566
$\beta = 1 - \alpha$	0	0,54	0,678	0,434

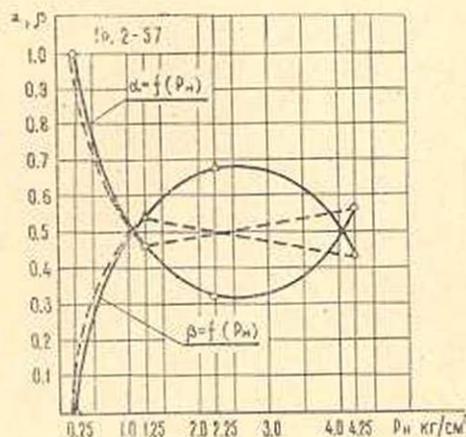
Связь между параметром  $\alpha$  и величиной начальной уплотняющей нагрузки  $\alpha = \alpha(P_n)$  определялась выражением (17)

$$\alpha(P_n) = 0,6279 - 0,2855 \frac{1}{P_n} + 0,0946 \frac{1}{P_n^2}. \quad (17)$$

Кривая, построенная по (17) и показанная пунктирами на фиг. 8, не совпадает с экспериментальной кривой при  $P_n = 2,25 \text{ кг/см}^2$ . Это расхождение можно будет устранить некоторым усложнением выражения (17) путем введения еще одного дополнительного члена.

На правых частях фиг. 2 и 3 пунктирными линиями показаны кривые ползучести, построенные по зависимостям (10), (14) и (17).

Функция напряжения  $F(P, P_n)$ , определенная по усредненным кривым зависимостей между напряжениями и деформациями ползучести (исходя из допущения о подобии кривых ползучести), хотя и приводит к приемлемым для практики результатам, все же расхождение между кривыми ползучести, полученными из эксперимента, и кривыми, построенными на основании (10), (14) и (17), в их начальных участках довольно большое. Это говорит о том, что при описании неподобных кривых ползучести (в основном на начальных участках деформирования) необходимо учесть продолжительность деформирования  $t$ .



Фиг. 8.

Рассмотрим результаты описания указанных выше семейств кривых ползучести с учетом продолжительности деформирования.

Для определения параметров  $\alpha(t, P_n)$  и  $\beta(t, P_n)$ , входящих в выражения функции напряжения, в отличие от рассмотренного выше случая, определялись значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  для нескольких фиксированных значений продолжительности деформирования  $t$ , а связь между  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $t$  (для некоторого фиксированного состояния  $P_n$ ) выражалась некоторой функцией  $\alpha = \alpha(t)$ ,  $\beta = \beta(t)$ . Определение  $\alpha$  и  $\beta$  для каждого значения  $t$  выполнялось по изложенной выше методике.

В табл. 3 приведены значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , определенные графически для различных  $t$  и  $P_n$ , а также вычисленные по выражениям (18) и (13) величины этих параметров. На фиг. 11 приведены графики кривых  $\alpha = \alpha(t)$  и  $\beta = \beta(t)$ , определенных из эксперимента (сплошные линии) и построенных по выражениям (18) и (19) (пунктирные линии)

$$\beta(t) = b_0 + \frac{b_1}{t^2 + b_2} \quad (18)$$

$$\alpha(t) = 1 - \beta(t), \quad (19)$$

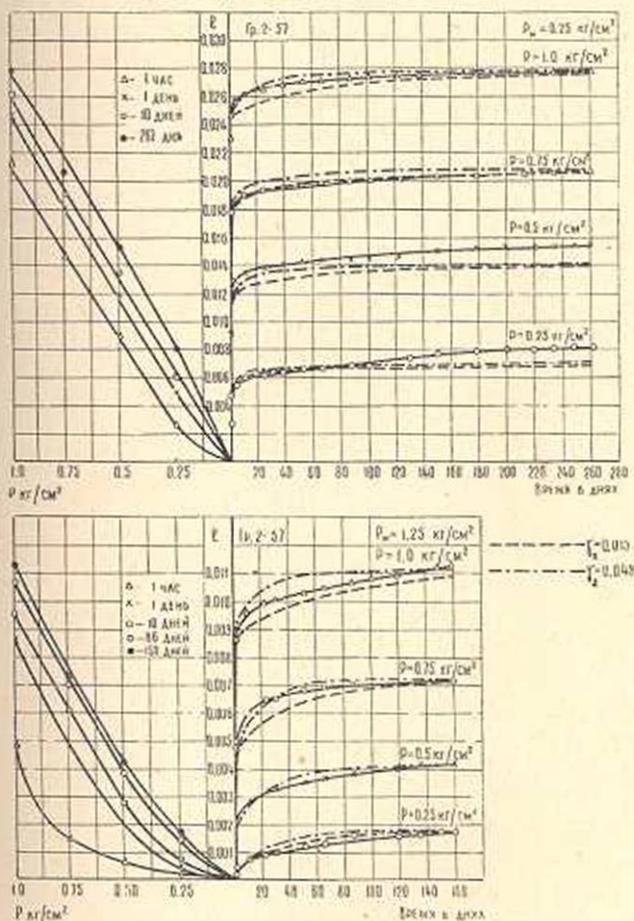
где  $b_0$ ,  $b_1$ , и  $b_2$ —параметры.

Таблица 3

Время в днях	$P_n = 1,25 \text{ кг/см}^2$		$P_n = 2,25 \text{ кг/см}^2$		$P_n = 4,25 \text{ кг/см}^2$	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
1	$\frac{1,07}{1,07}$	$\frac{-0,07}{-0,07}$	$\frac{1,166}{1,166}$	$\frac{-0,166}{-0,166}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0}{0}$
8	—	—	—	—	$\frac{1}{0,999}$	$\frac{0}{0,001}$
10	$\frac{0,96}{0,96}$	$\frac{0,039}{0,04}$	$\frac{0,86}{1,148}$	$\frac{0,079}{-1,148}$	—	—
55	—	—	—	—	$\frac{0,434}{0,434}$	$\frac{0,566}{0,566}$
98	—	—	$\frac{0,678}{0,678}$	$\frac{0,322}{0,322}$	—	—
120	$\frac{0,54}{0,54}$	$\frac{0,46}{0,46}$	—	—	—	—
124	—	—	—	—	$\frac{0,152}{0,131}$	$\frac{0,848}{0,869}$
159	$\frac{0,547}{0,548}$	$\frac{0,453}{0,452}$	—	—	—	—
204	—	—	$\frac{0,517}{0,547}$	$\frac{0,483}{0,453}$	—	—
258	—	—	—	—	$\frac{0}{0}$	$\frac{1}{1}$
260	—	—	$\frac{0,493}{0,493}$	$\frac{0,507}{0,507}$	—	—

Примечание: в числителях приведены значения  $\alpha$  и  $\beta$ , определенные графически, а в знаменателях—их значения, определенные по (18) и (19).

Здесь, как и в предыдущем случае, было принято, что при  $P_n = 0,25 \text{ кг/см}^2$  связь между напряжением и деформацией (при всех значениях  $t$ ) определяется линейным законом.



Фиг. 9.

На графиках фиг. 9 и 10 приведены семейства экспериментальных кривых ползучести грунта (сплошные линии) и кривые, определенные по выражениям (10), (12), (18) и (19) для каждого состояния ( $P_n$ ) в отдельности [без учета  $P_n$  в (12)]. Как показывает сопоставление указанных кривых, учет продолжительности деформирования приводит к очень хорошему их совпадению.

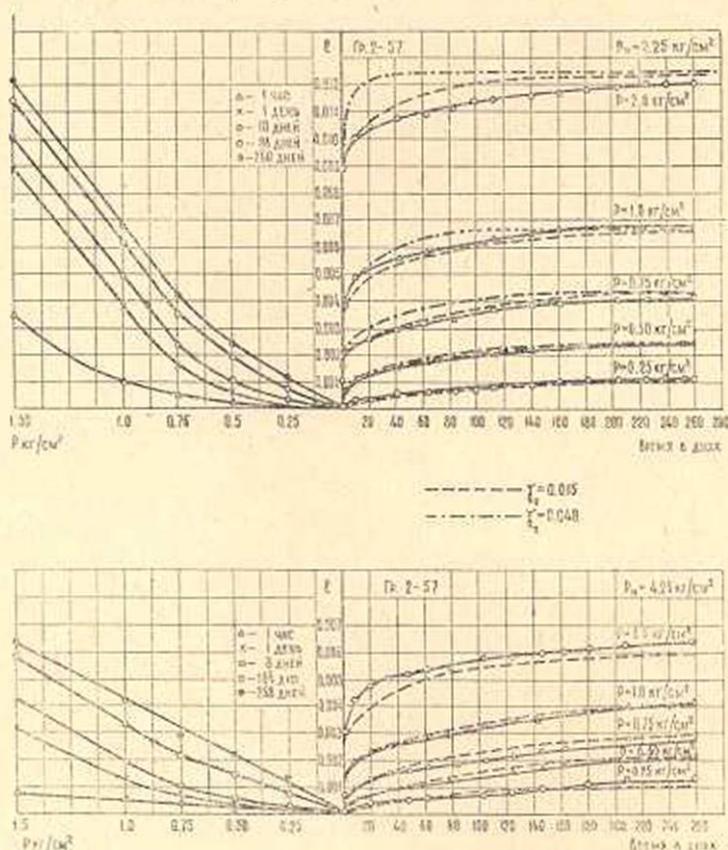
Чтобы в выражениях (10), (12), (18) и (19) учесть влияние состояния грунта ( $P_n$ ), зависимость (18) записывается в следующем виде

$$\beta(t, P_n) = b_0(P_n) + \frac{b_1(P_n)}{t^2 + b_2(P_n)}, \quad (20)$$

где  $b_0(P_n)$ ,  $b_1(P_n)$  и  $b_2(P_n)$  — некоторые функции, связывающие между собой параметры  $b_0$ ,  $b_1$  и  $b_2$  всех четырех состояний грунта. Ясно, что введение в (20) функций  $b_0(P_n)$ ,  $b_1(P_n)$  и  $b_2(P_n)$  сильно ослож-

няет выражение. На фиг. 12 приведены кривые указанных функций.

Изложенное выше описание кривых ползучести показывает, что, несмотря на сложность выражений, использование зависимостей теории упруго-ползучего тела [4,5] для указанной цели приводит к вполне удовлетворительным результатам.

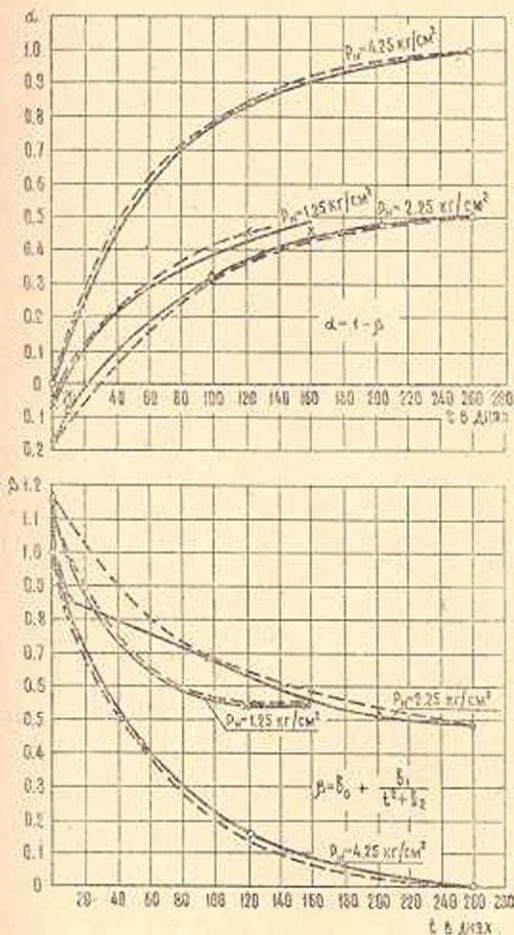


Фиг. 10.

Мы рассмотрели описание семейств кривых ползучести в зависимости от ряда факторов, в том числе от величины предварительно уплотняющей нагрузки  $P_n$ , которая в данном случае определяет состояние грунта. Это дало нам возможность показать применимость экспоненциальных функций для описания кривых ползучести и гибкость аппарата теории упруго-ползучего тела. Использование этой теории позволило учесть изменимость механических свойств грунта.

Следует однако отметить, что для использования рассмотренных зависимостей в интегральных уравнениях (2) и (3) необходимо исходить из таких выражений, где состояние материала определяется моментом приложения нагрузок  $\tau$ . В частности, в теории ползучести бетона состояние материала определяется возрастом, который соответствует промежутку времени от момента изготовления до момента приложения нагрузки  $\tau$ .

В отличие от бетона, механические свойства грунта (состояние) определяются его плотностью, влажностью и структурной прочностью, приобретенной им в течение времени и под влиянием различных уплотняющих нагрузок. Поэтому, если начало загрузки принять за некоторое состояние грунта, а в дальнейшем его подвергнуть уплотнению, то в каждый момент времени приложения нагрузки грунт



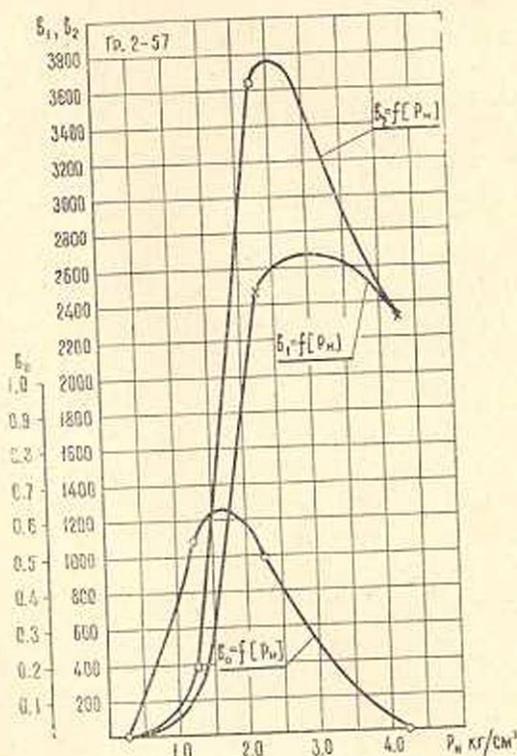
Фиг. 11.

будет находиться в состоянии, отличном от предыдущего момента загрузки [2], так как под влиянием предыдущей ступени нагрузки и фактора времени имело место уплотнение и упрочнение грунта (упрочнение во времени обусловлено протекающими в грунте физико-химическими процессами).

Следовательно, если задаться некоторой скоростью нарастания предварительно уплотняющей нагрузки  $P_n$  и представить ее в виде некоторой шкалы, расположенной под осью времени  $t$  (фиг. 4, 10), то можно будет от этой шкалы перейти к шкале времени  $t$ , а момент времени  $\tau$ , который будет соответствовать моменту приложения единичной нагрузки, принять за состояние материала. В отличие от ( $P_n$ ),

состояние грунта, выраженное через время приложения нагрузки, будем называть „возрастом“, а его изменение в сторону упрочнения — „старением“.

Точно так же мы можем задаться скоростью изменчивости пористости (вместо  $P_n$ ), влажности, температуры (для мерзлых грунтов) и от шкал, характеризующих скорости их изменения, перейти к шкале времени  $t$ .



Фиг. 12.

В соответствии с изложенным, в рассматриваемом нами случае, если принять, что скорость нарастания предварительно уплотняющей нагрузки соответствует той, которая показана на фиг. 4, то состояние грунта при  $P_n = 0,25 \text{ кг/см}^2$  будет соответствовать моменту приложения нагрузки („возрасту“)  $\tau_1 = 10$  дней, при  $P_n = 1,25 \text{ кг/см}^2$  —  $\tau_2 = 50$  дней, при  $P_n = 2,25 \text{ кг/см}^2$  —  $\tau_3 = 90$  дней и при  $P_n = 4,25 \text{ кг/см}^2$  —  $\tau_4 = 170$  дней. Отсюда следует, что для определения параметров, входящих в зависимости теории ползучести [5],  $P_n$  необходимо заменить на соответствующее значение  $\tau$ .

Необходимо отметить, что нанесение экспериментальных данных на полулогарифмический (фиг. 13) и логарифмический (фиг. 14) графики показывает, что в обоих случаях кривые ползучести спрямляются, т. е. это значит, что кривые ползучести могут быть описаны как логарифмическими функциями Г. И. Покровского [14] (21) и К. Бюисмана [15] (22), так и степенной зависимостью Штрауба [16]

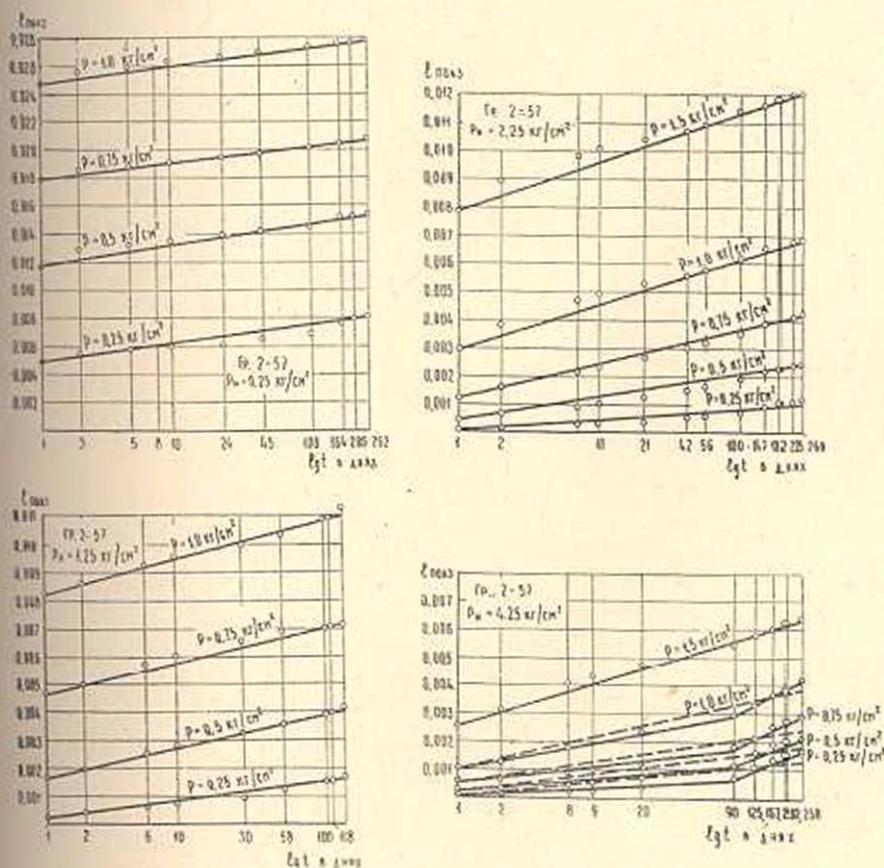
(23), которая для описания кривых ползучести грунтов была использована Н. М. Гольдштейном [17].

$$l_{\text{полз}} = L \cdot \ln(t + 1), \quad (21)$$

$$l_{\text{полз}} = a + b \lg t, \quad (22)$$

$$l_{\text{полз}} = At^m \cdot P^n, \quad (23)$$

где  $L, a, b, A, m,$  и  $n$ —параметры, определяемые из опыта.



Фиг. 13.

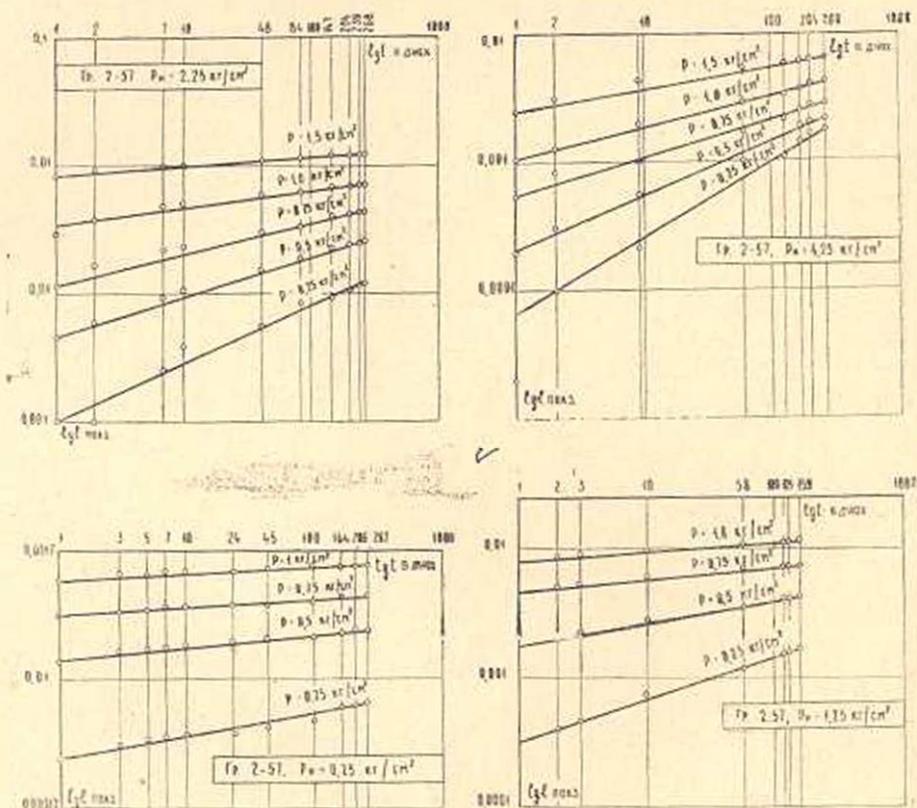
При описании семейств кривых ползучести по логарифмическим зависимостям для учета нелинейной ползучести необходимо пользоваться функцией напряжения  $F(P)$ , которая в рассматриваемом выше случае выражалась зависимостью (12), а в (23)—степенной зависимостью вида (24)

$$F(P) = P^n. \quad (24)$$

Для каждого семейства кривых показатель  $n$ —постоянная величина, а  $m$ —переменная величина, зависящая от величины напряжения.

Зависимости (21), (22) и (23) не учитывают изменяемость деформативных свойств материала („старение“) и поэтому менее пригодны для описания кривых ползучести стареющих материалов.

В работе [5] показано, что зависимость (23), на которой базируется теория „старения“ [18], является частным случаем выражения (10). Следует также отметить, что выражение (23) может быть использовано только для постоянных нагрузок. При изменяющихся во времени нагрузках ее использование может привести к ложным результатам [5].



Фиг. 14.

В заключение считаем необходимым отметить, что для описания отдельных кривых ползучести можно подобрать довольно много функций, однако, в целесообразности их применения можно убедиться только тогда, когда они будут подвергнуты детальной экспериментальной проверке. При этом очень важно, чтобы предлагаемые зависимости позволили бы довольно просто учесть нелинейный характер деформации ползучести, а также весьма важное для грунтов свойство — изменяемость их механических свойств под влиянием различных факторов.

Мы считаем, что сопоставление предлагаемых зависимостей для описания кривых ползучести с выражениями, полученными по данным

натурных наблюдений является необходимым условием для проверки этих функций. В этом отношении примечательно то, что осадки крупных гидротехнических сооружений, когда грунт сжимается в соответствии с условием одномерной задачи уплотнения, подчиняются экспоненциальному закону типа (4) [13]. Этим еще раз подтверждается справедливость принятого нами закона для описания кривых ползучести глинистого грунта.

Автор считает своим долгом выразить глубокую благодарность сотрудникам лаборатории ползучести и прочности материалов Института математики и механики АН АрмССР Н. Г. Ахназаряну и Э. М. Маркарян за оказанную ими помощь в деле проведения и обработки экспериментов.

Институт математики и механики  
АН Армянской ССР

Поступила 26 V 1962

Ս. Ռ. ՄԵՏՅԱՆ

## ԿԱՎԱՅԻՆ ԲՆԱՇՈՂԻ ՍՈՂՔԱՅԻՆ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՆԵՐԻ ՕՐԻՆԱԶՄՓՈԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԷՔՍՊՈՆԵՆՑԻԱԼ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում բերված են ավազակավային բնահողի դեֆորմացիոն հատկությունների ուսումնասիրության արդյունքները սեղմման դեպքում, երբ բացակայում է կողային ընդարձակման հնարավորությունը:

Ուսումնասիրված են չորս տարբեր խտություն ունեցող նմուշների խմբեր, որոնք նախնական խտացման են ենթարկվել  $P_{II} = 0,25, 1,25, 2,25, և 4,25$  կգ/սմ<sup>2</sup> բեռնվածքներով երկու ամսվա ընթացքում: Նմուշների ամեն մի խումբը իր հերթին (նախնական խտացումից հետո) փորձարկման է ենթարկվել չորս կամ հինգ տարբեր ( $0,25, 0,5, 0,75, 1,0$  և  $1,5$  կգ/սմ<sup>2</sup>) հաստատուն մեծություն ունեցող բեռնվածքներով:

Ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ, անկախ նմուշների խտությունից, ակնթարթային դեֆորմացիաների և լարումների միջև կղամ կապը գծային է: Ըստ որում մեծ խտություն ունեցող նմուշների խմբին համապատասխանում է մեծ, իսկ փոքր խտություն ունեցող խմբին՝ փոքր ակնթարթային մոդուլ:

Պարզված է նաև, որ լարումների և սողքի դեֆորմացիաների միջև եղած առնչության կորեքը, կախված նմուշների խտություն մեծությունից, ըստ բնույթի բաժանվում են երկու խմբի:  $P_{II} = 0,25$  կգ/սմ<sup>2</sup> նախնական բեռնվածքով խտացված նմուշների խմբի համար հիշյալ առնչության կորը փորձարկման ընթացքում երեք անգամ փոխում է իր տեսքը: Փորձարկման սկզբնական շրջանում այն բնորոշում է նյութի ամրության թուլացումը բեռնվածքի մեծության ավելացմամբ, փորձարկման վերջում՝ նյութի ամ-

րապնդմամբ: Մնացած երեք զեպքերում (երբ նախապես խտացնող բեռների մեծությունը  $P_{II} = 1,25, 2,25$  և  $4,25$  կգ/սմ<sup>2</sup>) լարումների և սողքի զեֆորմացիաների միջև եղած առնչություններն ըստ իրենց տեսքի համապատասխանում են զծային ամրացում ունեցող ասաձգա-պլաստիկական մարմնի զեֆորմացիայի օրենքին:

Լարումների և զեֆորմացիաների միջև եղած առնչությունների կորերի տարրեր տեսքերը հեղինակը բացատրում է նմուշների խմբերի սարուկտուրային ամրությունների տարբերությամբ:

Սողքի կորերի ընտանիքների նկարագրումը կատարված է Գ. Ն. Մասլյի, Ն. Ն. Հարությունյանի սողքի ախտաթվան առնչություններով, երկու՝ 1) մոտավոր (եղնելով սողքի կորերի նմանություն ենթադրությունից) և 2) ճշգրիտ եղանակներով:

Յուրջ է տրված, որ առաջին զեպքում փորձնական և սողքի ախտաթվան առնչություններով կառուցված կորերի միջև եղած տարբերությունները փորձարկման սկզբնական շրջանում բավական մեծ են, իսկ երկրորդ զեպքում հիշյալ կորերը շատ լավ են համընկնում, թեև առնչությունների տեսքը ավելի բարդ է:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Флорин В. А. Одномерная задача уплотнения сжимаемой пористой ползучей среды. Изв. АН СССР, ОТН, № 6, 1953.
2. Месчян С. Р. О ползучести связанного грунта при сжатии в условиях невозможности бокового расширения. Изв. АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 11, № 4, 1958.
3. Месчян С. Р. Влияние уплотняющей нагрузки на деформативные свойства глинистых грунтов при сдвиге. ДАН АрмССР, 31, № 4, 1960.
4. Маслов Г. Н. Термонапряженное состояние в бетонных массивах с учетом ползучести бетона. Изв. ВНИИГ, 28, 1941.
5. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехиздат, М.—Л., 1952.
6. Месчян С. Р. Исследование влияния высоты образца на деформативные свойства водонасыщенных грунтов. Изв. АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 12, № 3, 1959.
7. Месчян С. Р. О влиянии плотности и структурной прочности на зависимость между напряжениями и деформациями. Изв. АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 14, № 5 1961.
8. Денисов Н. Я. Строительные свойства глинистых пород и их использование в гидротехническом строительстве. Госэнергоиздат, М.—Л., 1956.
9. Ржакицын А. Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов. Гос. изд. лит. по строительству и архитектуре, М., 1959.
10. Денисов Н. Я. О природе деформации глинистых пород. Изд. Минречфлота, М., 1951.
11. Васильев П. И. Пластические свойства бетона при сжатии и их влияние на работу некоторых элементов бетонных и железобетонных конструкций (автореферат), Л., 1951.
12. Уорсинг А., Гейффнер Дж. Методы обработки экспериментальных данных. ИЛ, М., 1953.
13. Ничипорович А. А. и Цыбульник Т. И. Прогноз осадок гидротехнических сооружений на связных грунтах. Госстройиздат, М., 1961.

14. *Покровский Г. И.* Применение принципа Больцмана к расчету осадки фундаментов. Сборник „Основания и фундаменты“ ВИОС, № 1, М.—Л., 1933.
15. *Buisman K.* Results on Long Duration Settlement Tests. Proc. Intern. Confer. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1, 1936, 100—106.
16. *Straub.* Proceedings of the Amer. Soc. of Civ. Eng., 1931.
17. *Гольдштейн М. Н. и Бабицкая С. С.* Методика определения длительной прочности грунтов. „Основания, фундаменты и механика грунтов“, № 4, 1959.
18. *Soderberg R.* The interpretation of creep tests for machine design. Trans. ASME, 58, 8, 1936.
19. *Карпетян К. С.* Ползучесть бетона при кручении. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 15, № 6, 1962.