

Р. Р. ГАЛСТЯН, С. Р. МЕСЧЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПРЕССИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

1. Известно [1, 2], что деформацию ползучести грунта с учетом температурных воздействий можно определить из следующего выражения:

$$L_{\sigma}(t - t_0, T) = C_{\sigma}(t - t_0, T) F(z_1, T) \quad (1)$$

где $C_{\sigma}(t - t_0, T)$ — зависящая от температуры T мера компрессионной ползучести; $F(z_1, T)$ — зависящая от температуры функция напряжений, учитывающая нелинейную зависимость между напряжениями σ_1 и деформациями ползучести L_{σ} при заданной постоянной температуре $T = \text{const}$.

Функцию напряжений $F(z_1, T)$ можно, в частности, представить в виде степенной зависимости

$$F(z_1, T) = z_1^n \quad (2)$$

а меру компрессионной термоползучести в виде следующего выражения:

$$C_{\sigma}(t - t_0, T) = C_{\sigma}(t - t_0, T = 1^{\circ}\text{C}) F_1(T, z_1 = 1) \quad (3)$$

где $n(T)$ — зависящая от температуры функция; $C_{\sigma}(t - t_0, T = 1^{\circ}\text{C})$ — мера компрессионной термоползучести при условной температуре $T = 1^{\circ}\text{C}$; $F_1(T, z_1 = 1)$ — функция температуры, учитывающая нелинейную зависимость между деформациями ползучести L_{σ} и температурой, удовлетворяющая условию: $F_1(T = 1^{\circ}\text{C}, z_1 = 1) = 1$; t — время; t_0 — текущая координата времени.

Меру компрессионной ползучести при $T = 1^{\circ}\text{C}$ и функцию температуры $F_1(T, z_1 = 1)$ можно, в частности, представить в виде следующих степенных функций:

$$C_{\sigma}(t - t_0, T = 1^{\circ}\text{C}) = A(t - t_0)^m \quad (4)$$

$$F_1(T, z_1 = 1) = T^n \quad (5)$$

где A, m, n — определяемые из опыта параметры.

Для определения выражения (4) из опыта надо получить функцию температуры (5) и меру ползучести $C_{\sigma}(t - t_0, T)$ при некоторой постоянной температуре, отличной от $T = 1^{\circ}\text{C}$:

$$C_x(t - t_0, T = \text{const}) = \frac{C_x(t - t_0, T)}{F_1(T, z_1 = 1)} \quad (6)$$

где $F_1(T, z_1 = 1)$ — функции температуры при рассматриваемой постоянной температуре T .

В силу выражений (4) и (5) или (6) зависимость (3) примет следующий вид:

$$C_x(t - t_0, T) = A(t - t_0)^n T^m \quad (7)$$

Таким образом, учет температурных эффектов при исследовании ползучести обычных глинистых грунтов сводится к определению меры термоползучести (3) или (7) и функции напряжений (2). Причем, функции напряжений $F_1(z_1, T)$ определяются из семейств кривых ползучести $\ln \sigma - z_1$ [2], построенных при различных значениях постоянной температуры, а $C_x(t - t_0, T)$ — из семейства кривых мер термоползучести, построенного по кривым $\dot{\epsilon}_1 = 1$, определенным при различных $T = \text{const}$.

Следует особо отметить, что приведенные выше выражения справедливы только для положительных температур (исключая $T = 0^\circ \text{C}$).

Семейства кривых ползучести (фиг. 1) можно получить непосредственным испытанием нескольких серий образцов-близнецов при различных постоянных температурах $T = \text{const}$. Для указанной цели можно воспользоваться также практическим методом, разработанным одним из авторов этой статьи [3], или же методом обоих авторов [2]. Поскольку практические методы существенно уменьшают количество испытываемых образцов (без существенного ущерба точности определения указанных выше соотношений) при выполнении изложенного ниже исследования нами использованы эти оба практических метода.

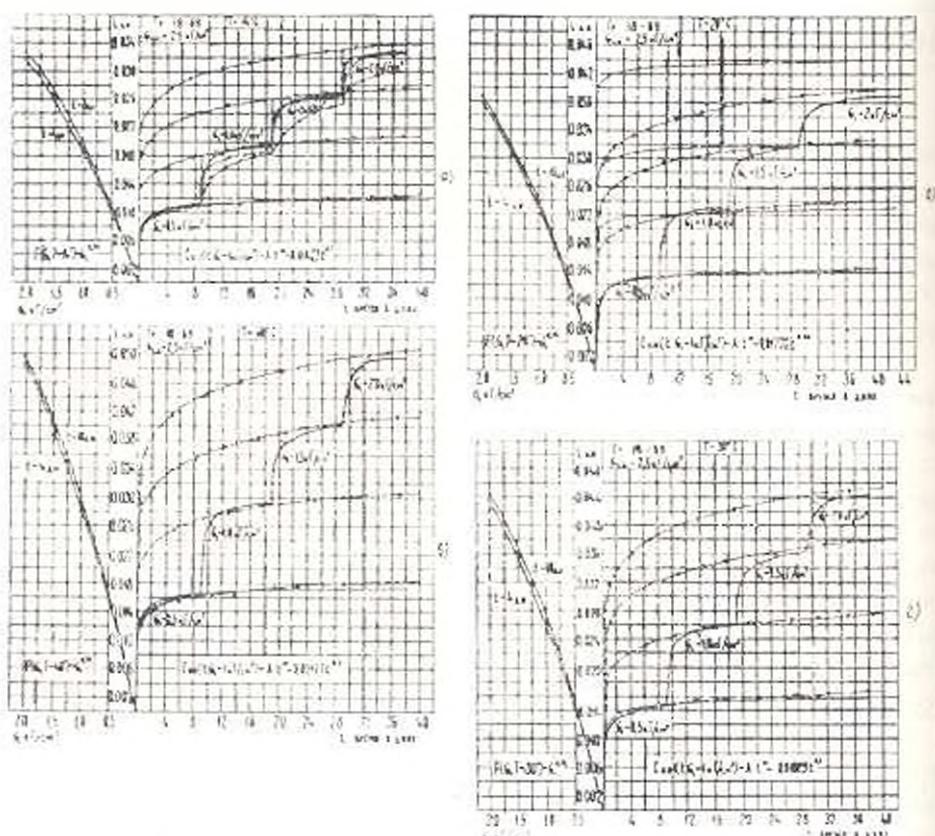
Не вдаваясь в подробности отмеченных выше практических методов, отметим только, что в первом случае [3] при каждой постоянной температуре испытываются две пары образцов-близнецов (двукратная повторность опыта), а во втором случае [2] — две пары образцов-близнецов при каждом заданном напряжении. Причем при каждой постоянной температуре пара образцов-близнецов испытывается при постоянном напряжении, а другая пара — при ступенчато возрастающем напряжении. Точно также во втором случае [2], при каждом постоянном напряжении, пара образцов-близнецов испытывается при постоянной, а другая пара — при ступенчато возрастающей температуре.

Как будет показано ниже использование обоих практических методов при решении одного и того же вопроса позволило нам проверить и оценить их правомочность для указанной цели.

В этой статье рассматриваются результаты комплексного исследования компрессионной термоползучести обычных (немерзлых) водонасыщенных глинистых грунтов естественного сложения.

Опыты проведены на компрессионных приборах модели М-2 [3] по методам, подробно изложенным в [3, 2]. Исследования два различных глинистых грунта естественного сложения после их полного водонасыщения и предварительного уплотнения бытовым давлением $\sigma_0 = 0,1$

Характеристики основных физических свойств исследованных грунтов приведены в табл. 1.



Фиг. 1.

Таблица 1

Лаб. № грунта	Наименование	Удельный вес ρ_{100}^0 (γ_{100}^0)	Объемный вес ρ_{100}^0 (γ_{100}^0)	Влажность W_p (%)	Пределы пластичности, %		Число пластичности ($W_p - W_L$)	Ковестонция (C)	Ковэф. притягости (σ)
					предел текучести (W_L)	предел раскатывания (W_p)			
18-69	Глина красноцветная	2,73	1,83	26,82	52,18	33,18	19	0,33	0,885
25-69	Глина промывная	2,64	1,76	33,08	52,63	23,34	29,29	0,33	1,00

Образцы грунта 18-69 предварительно уплотнены бытовым давлением $\varepsilon_{1,0} = 2.5 \text{ кг/см}^2$, а грунта 25-69 — давлением $\varepsilon_{1,0} = 1 \text{ кг/см}^2$ в течение 24 дней. Общее количество испытанных образцов-близнецов грунта 18-69 — 38, а грунта 25-69 — 40.

Рассмотрим результаты экспериментального определения выражений мер термползучести $C_\varepsilon(t - t_0, T)$ и функций $F(\varepsilon_1, T)$ исследованных грунтов в отдельности.

2. На фиг. 1 приведены результаты исследования ползучести грунта 18-69 (с учетом температурных аффектов), полученные по методу [3]. На правых частях графиков фиг. 1 сплошными линиями показаны экспериментальные кривые ползучести, полученные испытанием образцов-близнецов при четырех различных значениях постоянной температуры: $T = 14, 20, 30$ и 40°C . При указанных температурах по одной паре образцов-близнецов испытаны под действием постоянной ($\varepsilon_1 = 0.5 \text{ кг/см}^2$) и переменной, изменяющейся ступенями, нагрузках. При температуре 20°C под действием постоянных нагрузок $\varepsilon_1 = 0.5; 1.0; 1.5$ и 2 кг/см^2 испытаны восемь пар образцов-близнецов.

На левых частях графиков фиг. 1 приведены кривые $I_{\text{пол}} = f(\varepsilon_1)$, построенные по кривым ползучести ступенчато-возрастающих напряжений, показанным на правых частях тех же графиков [3]. Кривые описаны степенной функцией $I_{\text{пол}} = B\varepsilon_1^n$. В соответствии с этим функции напряжений представлены в виде выражения (2). Отметим, что при больших напряжениях кривая $I_{\text{пол}} = f(\varepsilon_1)$ примет вид буквы S [3].

Выражения функции напряжений для исследованных четырех различных значений температуры приведены на левых частях графиков фиг. 1.

Экспериментальные кривые ползучести при $\varepsilon_1 = 0.5 \text{ кг/см}^2$ описаны степенными функциями вида (4), приведенными на правых частях рассматриваемых графиков. Выражения меры ползучести $C_\varepsilon(t - t_0, T)$ для каждой постоянной температуры определены по известному соотношению [1]:

$$C_\varepsilon(t - t_0, T) = \frac{I_{\text{пол}}(t - t_0, T = \text{const}, \varepsilon_1 = 0.5 \text{ кг/см}^2)}{F(\varepsilon_1 = 0.5 \text{ кг/см}^2, T = \text{const})} \quad (8)$$

где $I_{\text{пол}}(\dots)$ — определяемое из эксперимента выражение кривой ползучести для $\varepsilon_1 = 0.5 \text{ кг/см}^2$ и заданного значения температуры; $F(\dots)$ — функция напряжений для тех же значений напряжения и температуры.

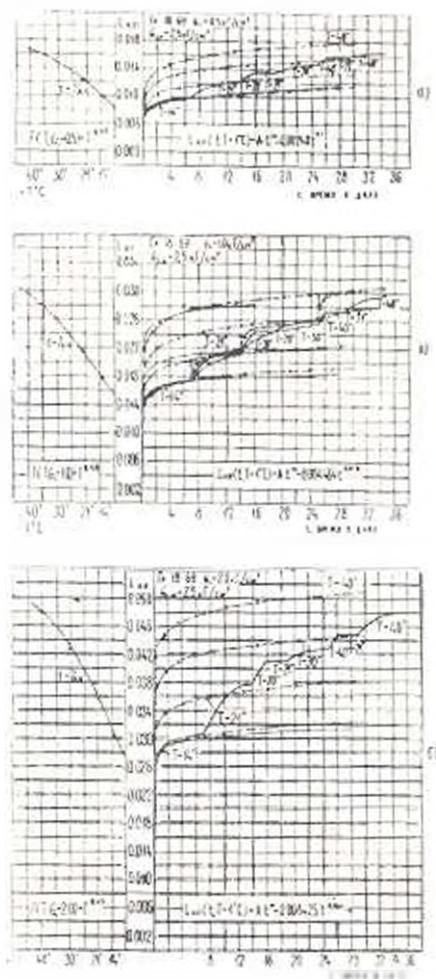
Например, для $T = 14^\circ \text{C}$ будем иметь (фиг. 2):

$$C_\varepsilon(t - t_0, T = 14^\circ \text{C}) = \frac{0.00854(t - t_0)^{0.1}}{0.5^{0.1}} = 0.01423(t - t_0)^{0.1} \quad (9)$$

На графиках фиг. 1 пунктирными линиями с треугольниками показаны кривые ползучести, построенные по выражению (1), для напря-

жений $\varepsilon_0 = 1.0; 1.5; \text{ и } 2.0 \text{ кГ/см}^2$ с учетом определенных из эксперимента выражений $F(\varepsilon_0)$ и $C_1(t - \tau, T)$ (9).

Теперь ознакомимся с результатами определения $C_1(t - \tau, T)$ и $F(\varepsilon_0, T)$ испытанием двух пар образцов-близнецов при каждом заданном постоянном напряжении (фиг. 2) [2].



Фиг. 2.

На правых частях графиков фиг. 2 сплошными линиями показаны экспериментальные кривые ползучести, определенные при различных заданных постоянных напряжениях $\varepsilon_0 = 0.5; 1.0 \text{ и } 2.0 \text{ кГ/см}^2$ при постоянной ($T = 14^\circ \text{C}$) и переменной температуре, возрастающей ступенями $T = 14, 21, 30 \text{ и } 40^\circ \text{C}$. На левых частях указанных графиков приведены кривые $\varepsilon_0 = f_2(T)$, построенные по экспериментальным кривым ползучести переменной температуры.

Кривые $\varepsilon_0 = f_2(T)$ описаны степенными функциями вида $\varepsilon_0 = B_1 T^{n_1}$. В соответствии с этим функции температуры $f_2(T)$, характеризующие нелинейную зависимость между деформациями ползучести

и температурой (при заданном $\varepsilon_1 = \text{const}$), представлены в виде степенных зависимостей

$$F_1(T) = T^n \quad (10)$$

приведенных на графиках фиг. 2.

Кривые ползучести при постоянной температуре $T = 14^\circ\text{C}$ описаны степенными зависимостями вида (4), которые также приведены на графиках фиг. 2. Выражения деформации ползучести при условной температуре $T = 1^\circ\text{C}$ для каждого заданного напряжения определены по выражению [2]:

$$l_{\text{кр}}(t - t_0, T = 1^\circ\text{C}) = \frac{l_{\text{кр}}(t - t_0, T = 14^\circ\text{C})}{F_1(T = 14^\circ\text{C})} \quad (11)$$

где $l_{\text{кр}}(t - t_0, T = 14^\circ\text{C})$ — определяемое из опыта выражение деформации ползучести для $T = 14^\circ\text{C}$ при заданном напряжении, $F_1(T = 14^\circ\text{C})$ — функции температуры при $T = 14^\circ\text{C}$ при том же напряжении ε_1 .

Например, при $\varepsilon_1 = 0.5 \text{ кГ/см}^2$ имеем:

$$l_{\text{кр}}(t - t_0, T = 1^\circ\text{C}; \varepsilon_1 = 0.5 \text{ кГ/см}^2) = \frac{0.00826 (t - t_0)^{0.11}}{14^{0.11}} = 0.0024 (t - t_0)^{0.11} \quad (12)$$

Используя полученные из опыта выражения (10) и (11) или (12), по соотношению

$$l_{\text{кр}}(t - t_0, T) = l_{\text{кр}}(t - t_0, T = 1^\circ\text{C}) F_1(T) \quad (13)$$

построены кривые ползучести для температур, отличных от $T = 14^\circ\text{C}$. Кривые термползучести, построенные по выражению (13) на правых частях графиков фиг. 2, показаны пунктирными линиями с крестиками.

На фиг. 3 приведены семейства кривых термползучести, полученные трансформацией семейств кривых, показанных на фиг. 2. На левых частях этих графиков построены кривые $l_{\text{кр}} = f_1(\varepsilon_1)$ для различных заданных значений постоянных температур $T = \text{const}$. По этим кривым определены функции напряжений $F(\varepsilon_1)$ для различных $T = \text{const}$. Затем, как и в рассмотренном выше случае, по зависимости (8) определены выражения меры ползучести при каждой заданной температуре.

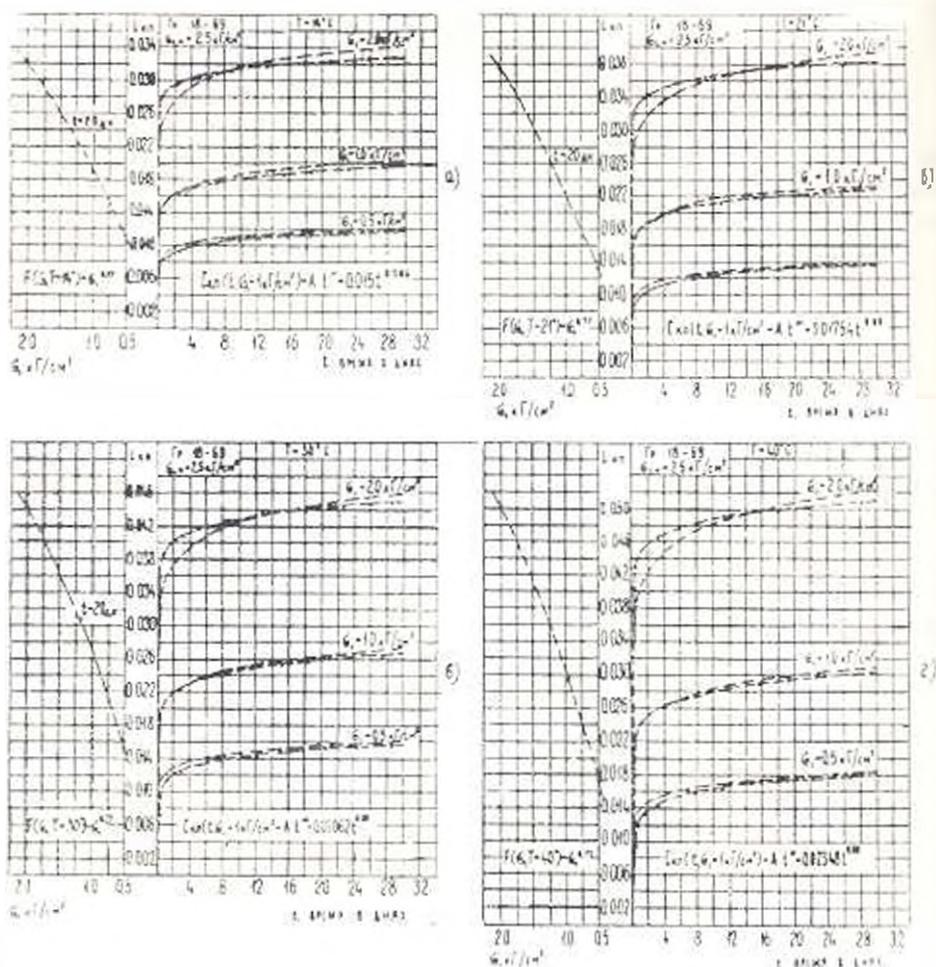
Из полученных экспериментальных данных следует (фиг. 1 и 3), что как в случае использования метода [3], так и метода [2] функции напряжений практически не зависят от температуры*. В одном случае $F(\varepsilon_1) = \varepsilon_1^{0.23}$, а в другом $F(\varepsilon_1) = \varepsilon_1^{0.27}$. Практически равны и показатели степеней напряжений, что свидетельствует о правомочности обоих использованных методов для определения как семейств кривых

* Аналогичный результат был получен авторами в [1]. Независимость ползучести мерзлых грунтов от температуры установлен ранее [4].

термоползуемости, так и функции напряжений. По результатам опытов можно принять, что средние значения функции напряжений для исследованного грунта равны

$$F(z_1) = \frac{b}{z_1} \quad (14)$$

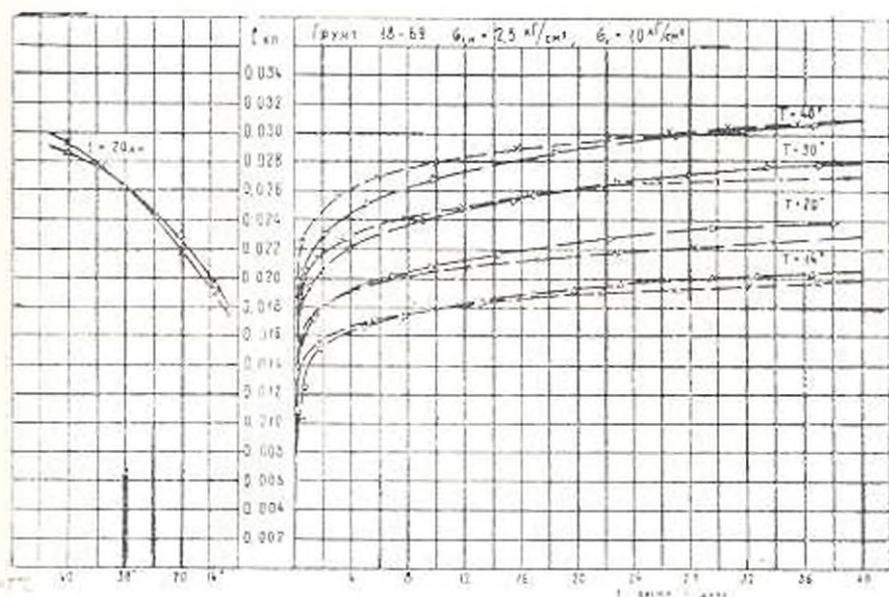
Как уже было отмечено выше, мера термоползуемости (3) или (7) определяется из семейства кривых мер термоползуемости. На фиг. 4 приведены семейства кривых мер термоползуемости, построенные по кривым $\varepsilon_1 = 1$, определенным при $T = \text{const}$. На правой



Фиг. 3.

части графика (фиг. 4) пунктирными линиями с треугольниками показаны кривые, определенные по методу [3] (фиг. 1), а пунктирными линиями с крестиками — семейства кривых, определенное по [2], которое и совпадает с соответствующим семейством фиг. 2. На левой части указанного графика приведены кривые $\dot{\varepsilon}_1 = \dot{\varepsilon}_1(T)$ для обоих семейств кривых мер термоползуемости при $\dot{\varepsilon}_1 = 20$ дий.

Сопоставление кривых мер термползучести обоих семейств показывает их достаточную близость. Это еще раз подтверждает правомочность указанных выше методов [3] и [2] для исследования термползучести грунтов.



Фиг. 4

Для получения выражения меры термползучести в виде (3) или (7) следует по кривой $U_{\text{теп}} = f_{\text{теп}}(T)$ определить функцию температуры (5) и описать указанные семейства кривых мер термползучести по выражению (7). Однако мы этого не будем делать, поскольку одно из этих семейств нами уже описано (фиг. 2) и результаты этого описания с полным основанием мы можем распространить на второе семейство.

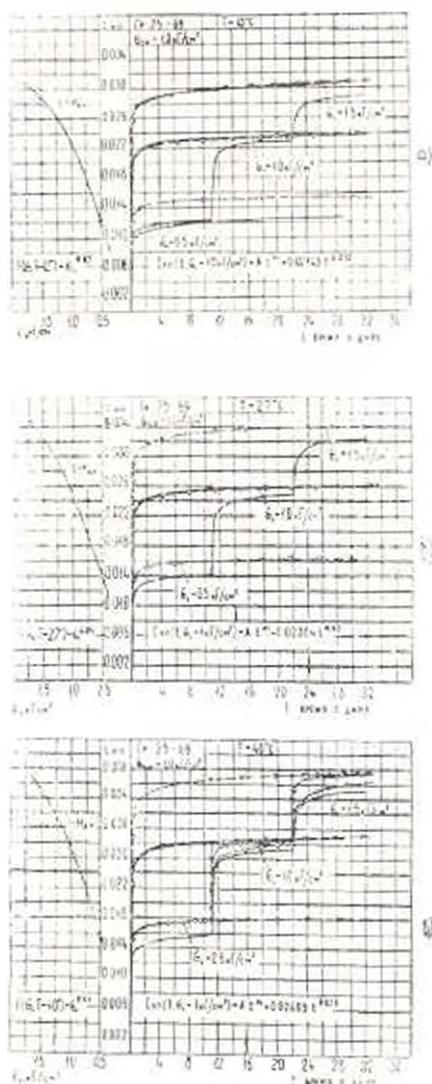
Из фиг. 2 имеем

$$C_{\text{теп}} U_{\text{теп}}(t, T) = 0.0045 (t - t_0)^{0.07} T^{0.07} \quad (15)$$

На фиг. 1а и 2б приведены результаты описания экспериментальных кривых ползучести, определенных при переменном напряжении (фиг. 1а) и переменной температуре (фиг. 2б), по физическим уравнениям теории «старения» (пунктирные линии с точками), «упрочнения» (пунктирные линии с кружочками) и «наследственной ползучести» (пунктирные линии с галочками) [5, 6].

Из указанных графиков видно, что все три теории описывают процессы ползучести грунта как при переменном напряжении, так и при переменной температуре вполне удовлетворительно. Следовательно, все эти теории могут быть использованы для решения конкретных задач ползучести и термползучести одномерного уплотнения водонасыщенных глинистых грунтов.

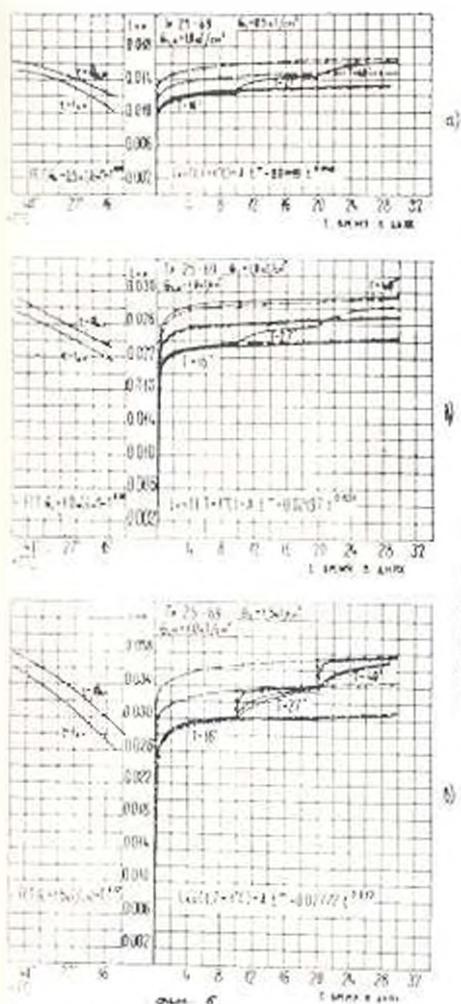
3. На фиг. 5 приведены результаты исследования полнучести грунта 25–69, полученные по методу [3]. Судя по полученным результатам, как и в рассмотренном выше случае (см. пункт 2), функция $f(\varepsilon_1)$ не зависит от температуры. Не зависит от температуры также показатель m .



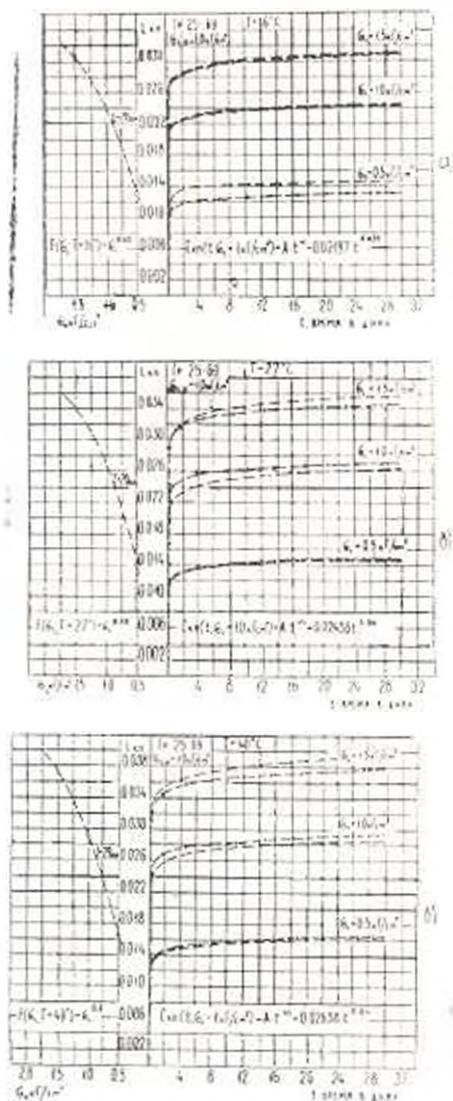
Фиг. 5.

На фиг. 6 приведены результаты исследования термополнучести грунта 25–69, полученные по методу [2], а на фиг. 7 — семейства кривых полнучести, полученные путем трансформации семейств кривых полнучести фиг. 6. Из фиг. 6 следует, что функция температуры (5) практически не зависит от напряжения ε_1 , а из фиг. 7 видна независимость показателя m и функции $f(\varepsilon_1)$ от температуры при $T = 27$ и

40 С. Параметр m и функция $F(\sigma_1)$, определенные при $T = 16$ С несколько отличаются от значений, определенных при $T = 27$ и 40 С.



Фиг. 6.



Фиг. 7.

Как и в рассмотренном выше случае (фиг. 4), из сопоставления кривых мер термоползучести обеих семейств (фиг. 5 и 7) следует, что они достаточно близки. Это значит, что для определения характеристик термоползучести водонасыщенного глинистого грунта при компрессии можно использовать как метод [3], так и метод [2].

В соответствии с приведенными выше данными среднее значение параметра n выражения (2) можно считать равным $n = 0,68$. Это зна-

чит, что функцию напряжений можно определить по следующему выражению (фиг. 6 и 8):

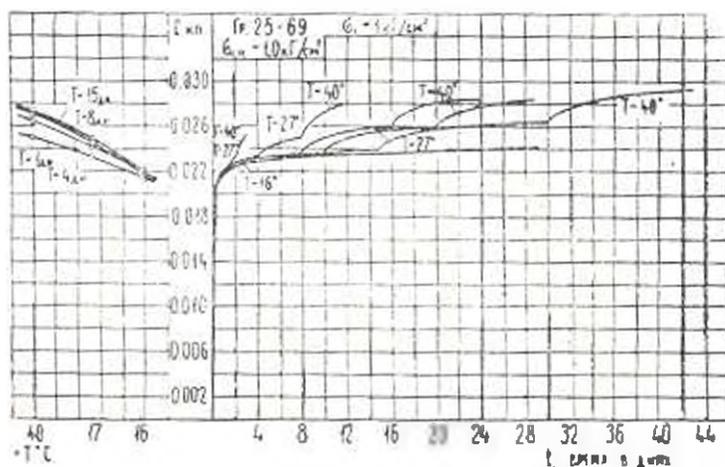
$$F(z_1) = \frac{0.1^4}{z_1^4} \quad (16)$$

Что же касается меры ползучести (7), то ее можно представить в следующем виде (фиг. 7):

$$C_1(t - t_0, T) = 0.02197(t - t_0)^{0.011} T^{0.2} \quad (17)$$

Следует здесь особо отметить важность независимости функции напряжений $F(z_1)$ от температуры. Если на основании приведенных нами экспериментов учесть это условие, то можно будет существенно сократить объем экспериментальных исследований — уменьшить количество испытанных образцов при определении показателей термоползучести грунта. В этом случае для определения $F(z_1)$ можно будет ограничиться определением только одного семейства кривых ползучести по методу [3] при каком-либо постоянном значении температуры $T = \text{const}$. Что же касается определения меры термоползучести $C_1(t - t_0, T)$, то это можно будет сделать на основании семейства кривых термоползучести при единичном напряжении, определенном по методу [2].

Таким образом, термоползучесть грунта можно будет исследовать испытанием четырех (или четырех пар при двукратном повторении опыта) образцов-близнецов.

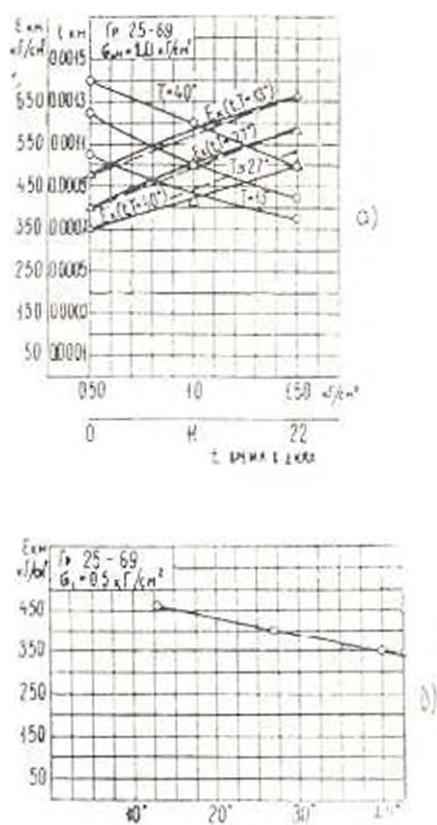


Фиг. 8

По аналогии с рассмотренным выше случаем (см. пункт 2) на фиг 5а и 5в приведены результаты описания экспериментальных кривых ползучести при переменных значениях напряжения σ_1 и температуры по теориям «старения» (пунктир с точками), «упрочнения» (пунктир с кружочками) и «наследственной ползучести» (пунктир с галочками). Результаты идентичны.

На фиг. 8 приведены результаты исследования термоползучести грунта 25-19 при различных скоростях возрастания температуры. Испытано шесть пар образцов-близнецов, температуры которых, начиная от $T = 16^\circ\text{C}$, возрастали ступенями $T = 27$ и 40°C через $t = 1, 4, 8, 10$ и 15 дней.

Исследованием установлено, что чем больше интервал возрастания температуры, тем больше величина ползучести при данном фиксированном значении времени. Вместе с тем, конечные значения деформаций ползучести не зависят от скорости возрастания температуры.



Фиг. 9.

4. Для теории ползучести имеет важное значение определение мгновенных компрессионных деформаций $I_{ин}$, их модулей $E_{ин}$ и установление зависимости $E_{ин}$ от T .

На фиг. 9а приведены кривые $I_{ин} - T$ и $E_{ин} - T$ для различных значений постоянной температуры. Мгновенные деформации фиксированы при приложении ступеней нагрузок $\tau_1 = 0.5 \text{ кг/см}^2$ (фиг. 1 и 5) и случае определения характеристик термоползучести по методу [3].

Результаты опытов показывают существенное влияние температуры как на начальные значения модуля мгновенной деформации, так

INVESTIGATION ON COMPRESSION CREEP OF CLAY
GROUNDS TAKING ACCOUNT OF THERMAL EFFECTS

R. R. GALSTIAN, S. R. MESCHIAN

S u m m a r y

The results of investigation on the creep of two different water-saturated clay grounds at unidimensional condensation are presented. The characteristics of thermocreeep of each ground are determined by two mutually monitoring methods (3) and (2).

Both methods are proved to be quite useful for investigation on thermocreeep of water-saturated clay grounds. An increase in temperature of the ground from 14 to 40°C is found to cause an increase in deformation of creep up to 70%. The function of stresses $F(\tau_1)$ is found to be independent of temperature.

The „consolidating“ and „hereditary creep“ theories are shown to describe the process of thermocreeep at alternating stresses and temperatures quite well, while the „aging“ theory-only satisfactorily.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Галстян Р. Р., Меликян Е. П., Месчян С. Р. Исследование термоползучести водонасыщенного глинистого грунта при одномерном сжатии. Изв. АН Арм. ССР, Механика, т. 24, №3, 1971.
2. Галстян Р. Р., Месчян С. Р. Метод определения кривых компрессионной термоползучести. Изв. АН Арм. ССР, Механика, в. 24, №1, 1971.
3. Месчян С. Р. Ползучесть глинистых грунтов. Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1967.
4. Вязов С. С., Гмошинский В. Г. и др. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледяных отражений. Изд. АН СССР М., 1962.
5. Наместников В. С., Хвостунков А. А. Ползучесть дюралюминия при постоянных и переменных нагрузках. ПМТ, № 4, 1960.
6. Ахмазарян Н. Г., Миркярян Э. М., Месчян С. Р. О применимости теории ползучести для описания деформации скелета глинистого грунта при одномерном уплотнении. Изв. АН Арм. ССР, Механика, т. 21, №3, 1968.