

С. Р. МЕСЧЯН, Р. Р. ГААСТЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ПРИ СДВИГЕ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Ползучесть обычного (немерзлого) грунта при сдвиге с учетом влияния изменяемости его температуры во времени рассмотрена в работе [1]. В этой статье приводятся результаты исследования ползучести глины при сдвиге, выполненного с целью установления влияния температуры на закономерности ползучести, на скорость течения и коэффициент вязкости в одном состоянии ее плотности-влажности.

Для решения поставленной задачи испытаны три серии образцов-близнецов третичной глины (лаб. № 19—69) естественного сложения (табл. 1), отобранной в приереванском районе, при $\sigma_z = 2.0 \text{ кг/см}^2$ и трех значениях ее температуры: $T = +14^\circ$, $+21^\circ$ и $+40^\circ \text{С}$.

Таблица 1

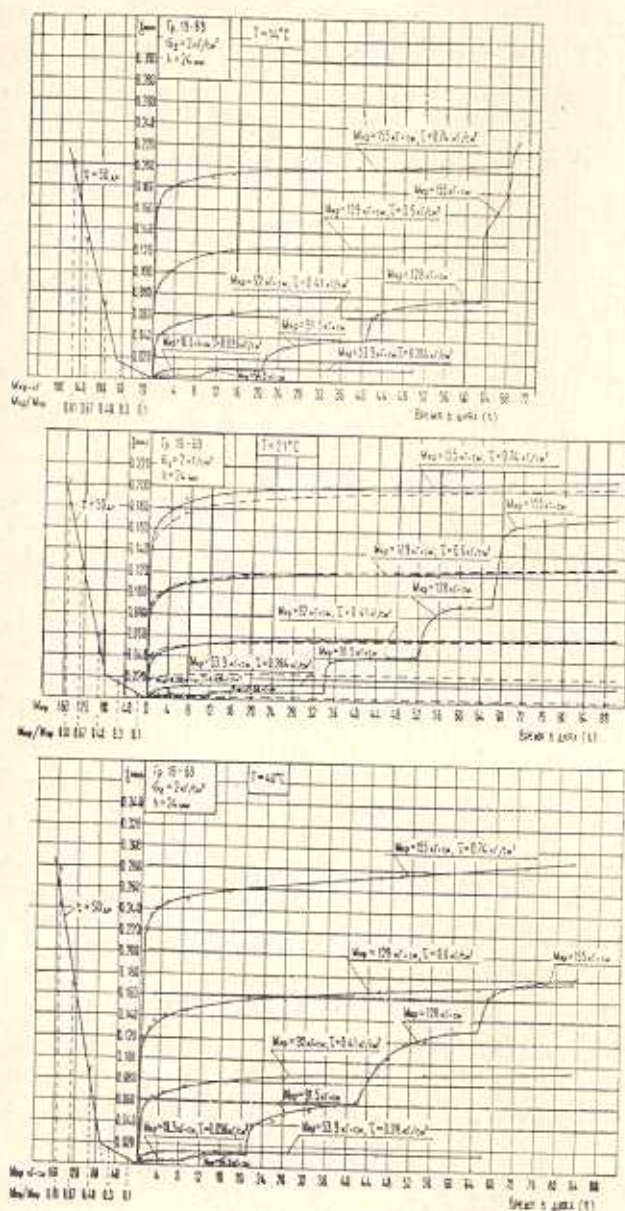
Лаб. № грунта	Температура ТС	Объемный вес (γ), т/см ³	Удельный вес ($\gamma_{уд}$), т/см ³	Естественная влажность (w) ¹ / _h	Пределы пластичности % _h			Консистенция (В)	Ковф. пористости (e_n)	Степень влажности (G_n)
					Предел текучести (w_p)	предел раскатывания (w_R)	число пластичности (w_{pl})			
19—69	14	1.93		26.41						
	21	1.92	2.62	26.18	46.84	25.71	21.13	0.1	0.736	0.969
	40	1.93		26.78						

Опыты проведены на приборах кручения [2]. Испытаны на кручение кольцевые образцы с наружным диаметром $d_2 = 101 \text{ мм}$, внутренним диаметром $d_1 = 50$ и высотой $h = 24 \text{ мм}$.

С целью достижения одинаковой начальной плотности-влажности и обеспечения неизменяемости состояния образцов всех серий в процессе кручения, они (до опыта) были подвергнуты предварительному уплотнению постоянным напряжением $\sigma_z = 2.0 \text{ кг/см}^2$ в течение 31—41 дней при температуре $T = 40^\circ \text{С}$. Это дало возможность достигнуть наибольшего уплотнения образцов, исключить влияние термоуплотнения и оценить влияние температуры на ползучесть грунта.

При каждой заданной постоянной температуре испытаны шесть пар водонасыщенных образцов-близнецов постоянными относительными крутящими моментами $M_{кр}/M_{кр} = 0.1, 0.3, 0.48, 0.67$ и 0.81 и ступенчато-возрастающими относительными моментами ($M_{кр}$ —крутящий мо-

мент; $M_{пр}$ —пределный крутящий момент, соответствующий предельному сопротивлению грунта сдвигу). Предельный крутящий момент ($M_{пр}$) определен испытанием образцов-близнецов по стандартной мето-

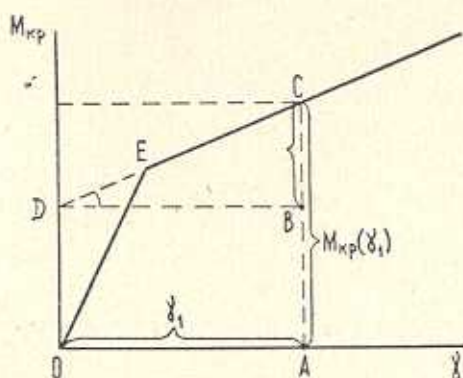


Фиг. 1

дике—методом медленного среза. Порядок приложения крутящих моментов до заданной величины был таким, каким он был при определении $M_{пр}$.

Заданная температура образца поддерживалась термостатом типа У8 (ГДР) и ультратермостатами Одесского завода медицинского оборудования с точностью $\pm 0.5^\circ\text{C}$. В процессе испытания на кручение замерялись как деформации уплотнения, так и сдвига. Деформации сдвига замерялись на наружной окружности кольцевых образцов прогибомерами Максимова с точностью 0.01 мм.

Следует здесь же отметить, что максимальная дополнительная деформация уплотнения (сжатия) образца в процессе сдвига (кручения), за исключением двух-трех случаев, не превышала 0.08 мм. Поэтому можно считать, что благодаря использованному методу предварительного уплотнения, состояние грунта в процессе кручения не подвергалось изменению.



Фиг. 2

На фиг. 1 приведены графики трех семейств кривых ползучести исследованного грунта, определенных при трех постоянных значениях температуры. На левых частях указанных графиков приведены кривые зависимости относительная деформация ползучести сдвига — крутящий и относительный крутящий момент для $t = 50$ дн.

Как и в ранее выполненных работах [2], в зависимости от уровня крутящего момента, кривые ползучести имеют как затухающий ($M_{кр}/M_{кр} \leq 0.3$), так и незатухающий характер ($M_{кр}/M_{кр} \geq 0.5$). Кривые зависимости $\gamma = f_1(M_{кр})$ аппроксимируются ломаной линией, характеризующей упруго-пластическое кручение грунта с линейным упрочнением.

Для описания семейств кривых ползучести и определения параметров ползучести грунта при сдвиге по приложенным к образцам крутящим моментам ($M_{кр}$) определены соответствующие им касательные напряжения (τ), действующие на расстоянии r_2 от центра кольца (r_2 — наружный радиус кольца). В пределах первого участка ломаной линии касательные напряжения определены из решения упругой задачи по выражению

$$\tau = \frac{2M_{кр}}{\pi(r_2^4 - r_1^4)} r_2 \quad (1)$$

где r_1 — внутренний радиус кольцевого образца.

Касательные напряжения, действующие во второй области деформирования, определены из решения задачи кручения нелинейной теории упругости [3]

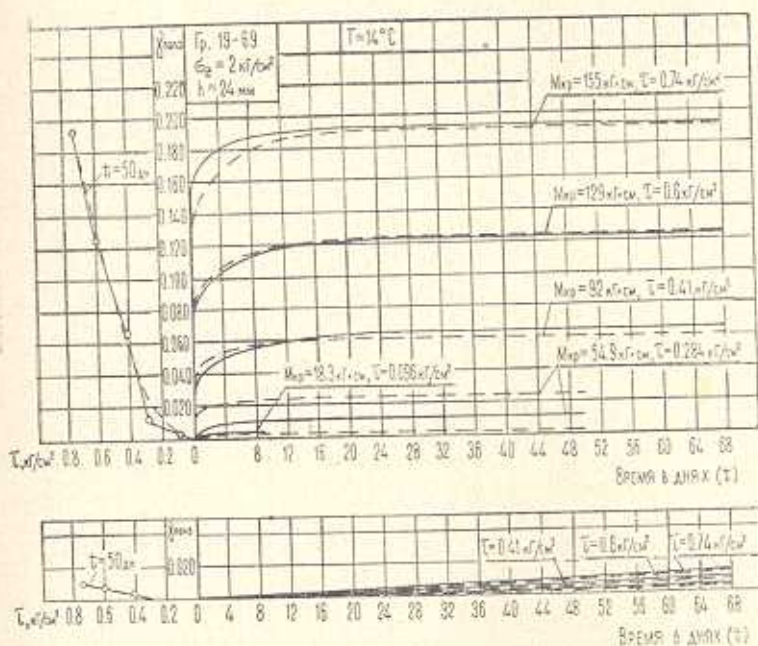
$$\gamma \frac{dM_{кр}}{d\gamma} + 3M_{кр} = 2\pi[r_2^3 \tau(r_2) - r_1^3 \tau(r_1)] \quad (2)$$

где $\frac{dM_{кр}}{d\gamma}$ — угол между касательной DC к кривой кручения и осью γ (фиг. 2), а $\gamma \frac{dM_{кр}}{d\gamma}$ — отрезок BC [4].

В случае кручения сплошного образца ($r_1 = 0$) из (2) получим

$$\tau = \frac{1}{2\pi r_2^3} \left[3M_{кр} + \gamma \frac{dM_{кр}}{d\gamma} \right] \quad (3)$$

В первой области деформирования OE выражение (2) принимает вид (1).



Фиг. 3

Из выражения (2) следует, что для определения $\tau(r_2)$ надо знать величину τ при $r = r_1$. Величину $\tau(r_1)$ можно, как первое приближение, определить по выражению (1), исходя из условия линейного деформирования грунта при сдвиге. Тогда из (2), учитывая (1), получим

$$\tau = \frac{1}{2r_2^3} \left[3M_{кр} + \gamma \frac{dM_{кр}}{d\gamma} + \frac{4M_{кр}r_1^4}{r_2^4 - r_1^4} \right] \quad (4)$$

Учитывая то, что в нашем случае r_1 по сравнению с r_2 мало и, вследствие этого r_1^3 более, чем в десять раз меньше r_2^3 , с достаточной для практики точностью $\tau(r_2)$ можно определить и по выражению (3).

Величины касательных напряжений, определенных по выражению (4), приведены на кривых ползучести фиг. 1.

В табл. 2 приведены определенные по выражениям (4) и (3) величины касательных напряжений, соответствующие приложенным к образцам крутящим моментам. Там же приведены их значения, определенные по выражению (1) при $r_1 \neq 0$ и $r_1 = 0$ в предположении линейной зависимости между касательными напряжениями и относительными деформациями сдвига.

Таблица 2

Относительный крутящий момент ($M_{кр}/M_{кр}$)	0.48	0.67	0.81	
Крутящий момент ($M_{кр}$), кг.см	92	129	155	
$\gamma dM_{кр}/d\gamma$, кг.см	28	65	91	
$\tau(r_2)$ в кг/см ² , определенные по решению нелинейной теории упругости	по выражению (4)	0.41	0.60	0.74
	по выражению (3)	0.38	0.56	0.69
$\tau(r_2)$ в кг/см ² , определенные по решению упругой задачи	по выражению (1)	0.48	0.68	0.81
	то же самое при $r_1=0$	0.46	0.64	0.77

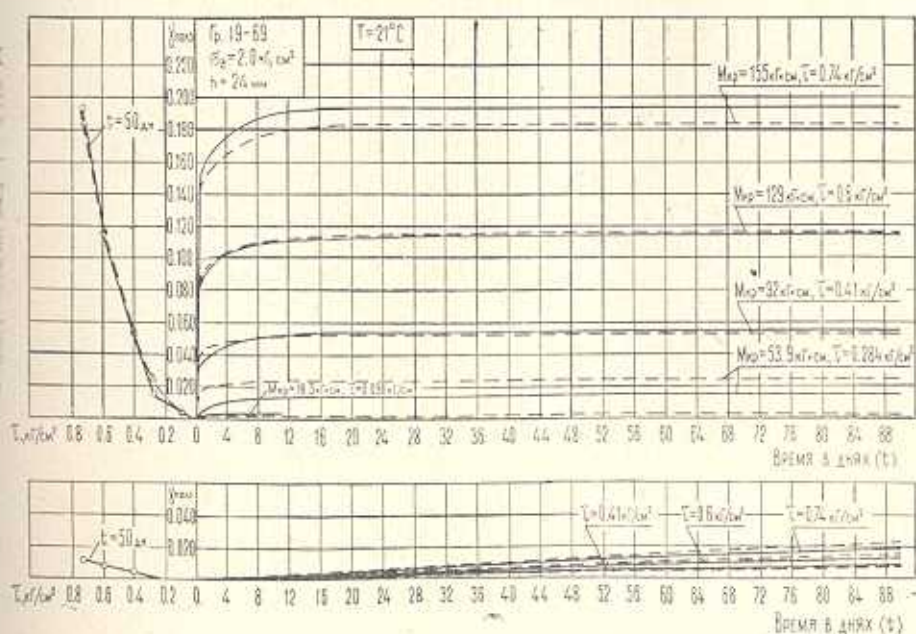
Судя по приведенным в табл. 2 данным, при использовании выражения (3) касательные напряжения, определенные по выражению (4), уменьшаются на 7%, а при использовании выражения (1) — увеличиваются до 15%. Поскольку разброс величин касательных напряжений находится в пределах точности эксперимента, можно, с достаточной для практики точностью, касательные напряжения $\tau(r_2)$ определить по одному из приведенных выше выражений (3), (4) или (1).

Для описания процесса деформирования грунтов во времени при сдвиге, следуя Авдраде [5], полная относительная деформация сдвига (γ) разложена на две составляющие — на затухающие деформации (γ_3) и деформации установившейся ползучести (течения) (γ_T)

$$\gamma(t) = \gamma_3(t) + \gamma_T(t) \quad (5)$$

Графики семейств кривых ползучести затухающих и незатухающих относительных деформаций сдвига приведены на фиг. 3, 4 и 5. На указанных графиках экспериментальные кривые показаны сплошными линиями. На левых частях тех же графиков приведены кривые зависимости касательное напряжение—относительная деформация сдвига. Кривые зависимости касательное напряжение—относительная скорость деформации течения $v = f_2(\tau)$ показаны на фиг. 6.

Как и в ранее выполненных работах [6, 7, 9, 2], зависимость $v = f_2(\tau)$ является линейной и может быть аппроксимирована известным уравнением Шведова-Бингама.



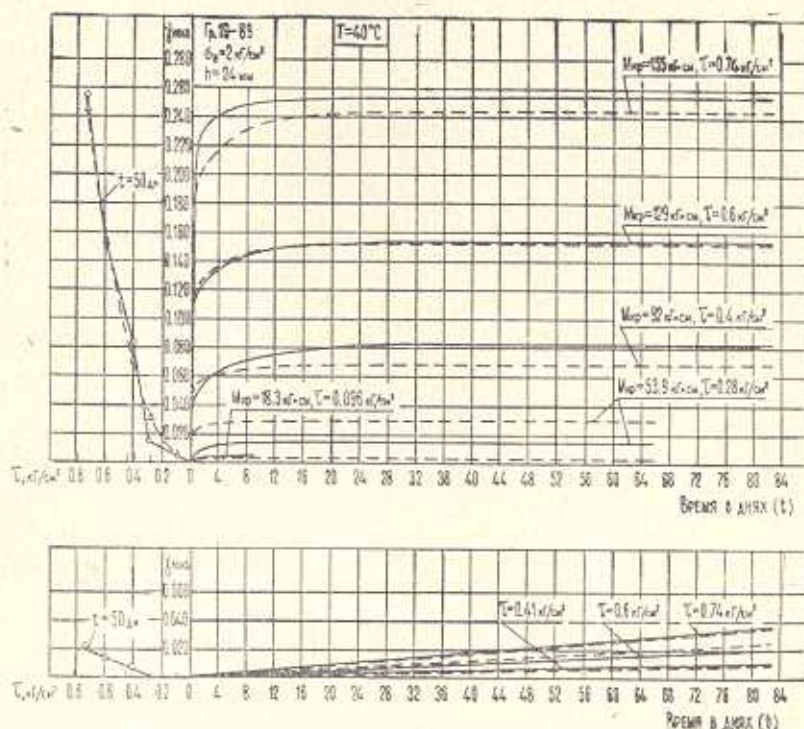
Фиг. 4

Сопоставление семейств кривых ползучести, определенных при трех различных значениях температуры грунта $T = 14, 21$ и 40°C (фиг. 3, 4, 5) показывает, что затухающие деформации ползучести мало отличаются друг от друга. Их максимальное расхождение не превышает 20%. Это обусловлено тем, что все испытанные образцы грунта обладали одинаковой начальной плотностью-влажностью и поэтому влияние температуры в основном отразилось на второй части деформации—деформации течения. Как будет показано ниже, изменение температуры в рассматриваемых нами пределах привело к изменению скорости течения более, чем в два раза.

Семейства кривых затухающих деформаций ползучести описаны выражением вида [8]

$$\gamma_s(t) = \omega_s(t - \theta, T) F(\tau, T) \quad (6)$$

где $\omega_3(t - \theta, T)$ — зависящая от температуры мера затухающей деформации ползучести; $F(\tau, T)$ — зависящая от температуры функция напряжения, учитывающая нелинейную зависимость между касательными напряжениями и относительными деформациями сдвига; t — время; θ — текущая координата времени (момент приложения касательного напряжения).



Фиг. 5

Мера ползучести $\omega_3(t - \theta, T)$ при $(t - \theta) \gg 1$ дн определена по следующему экспоненциальному выражению [2]:

$$\omega_3(t - \theta, T) = A(T) [1 - e^{-\gamma_1(T)(t - \theta)}] + [C(T) - A(T)] [1 - e^{-\gamma_2(T)(t - \theta) - 1}] \quad (7)$$

а функция напряжения — по степенной зависимости

$$F(\tau, T) = \tau^n(T) \quad (8)$$

где $C(T)$ — зависящая от температуры предельная мера ползучести, $A(T)$ — зависящая от температуры деформация при $t - \theta = 1$ дн; $\gamma_1(T)$ и $\gamma_2(T)$ — определяемые из опыта функции.

Определенные из описания семейств кривых затухающих деформаций ползучести параметры выражений (7) и (8) приведены в табл. 3, а результаты описания кривых на графиках фиг. 3а, 4а и 5а приведены пунктирными линиями.

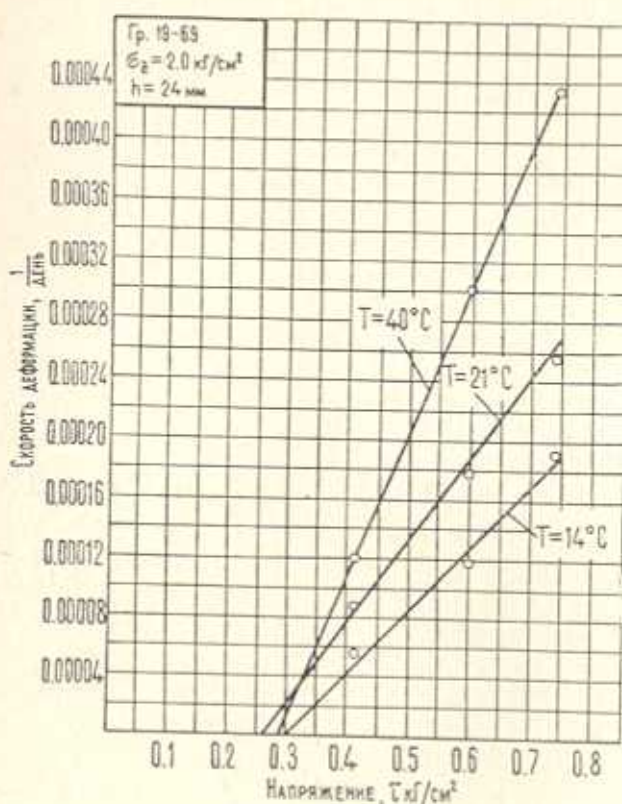
Таблица 3

Температура грунта (T), °C	A	C	γ_1	γ_2	n
14	0.28	0.37	10	0.19	2.12
21	0.23	0.34	10	0.19	2.10
40	0.38	0.47	10	0.18	2.20
Средние значения параметров	0.31	0.39	10	0.19	2.14

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что γ_1 , γ_2 и n практически не зависят от температуры. C достаточной для практики точностью ($\pm 15^\circ$) можно считать также, что A и C также не зависят от температуры. Тогда выражения (7) и (8) примут следующий вид:

$$\omega_s(t - \theta) = A[1 - e^{-\gamma_1(t-\theta)}] + (C - A)[1 - e^{-\gamma_2(t-\theta)} - 1] \quad (7a)$$

$$F(\tau) = \tau^n \quad (8a)$$



Фиг. 6

Семейства кривых установившейся ползучести (течения), приведенных на фиг. 3, 4 и 5, при линейной зависимости между касательными напряжениями и относительными деформациями течения в общем случае могут быть описаны следующими выражениями [2]:

$$\gamma_r(t) = q(T)(t - \theta)[\tau - \tau_0(T)] \quad (9)$$

$$\gamma_r(t) = \frac{\tau - \tau_0(T)}{\eta(T)}(t - \theta) \quad (10)$$

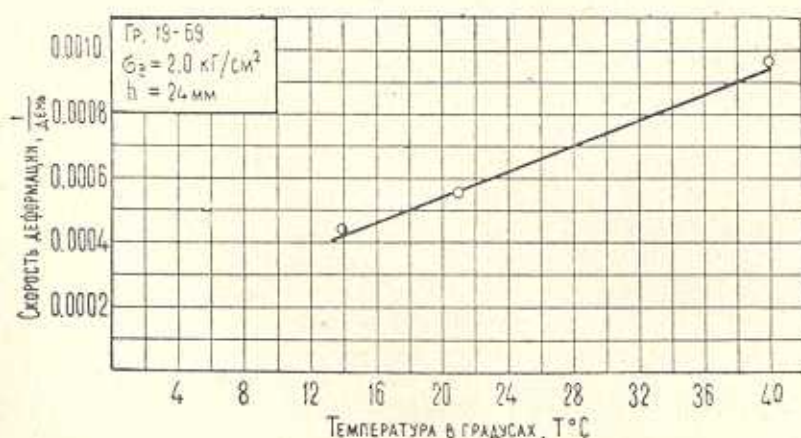
где $q(T)$ — зависящая от температуры относительная скорость течения при $\tau - \tau_0(T) = 1$; $\tau_0(T)$ — зависящее от температуры предельное напряжение сдвига; $\eta(T)$ — зависящий от температуры коэффициент вязкости $\left[\eta(T) = \frac{1}{q(T)} \right]$.

Величины относительной скорости течения (q) и предельного напряжения сдвига (τ_0), определенные описанием семейств кривых установившейся ползучести (фиг. 3б, 4б и 5б), приведены в табл. 4. В этой же таблице приведены значения коэффициента вязкости (η), определенные для трех различных значений температуры.

Таблица 4

Температура грунта (T), °C	q , 1/день	τ_0 , кг/см ²	η	
			кг/см ² день	пуаз
14	0.000441	0.3	2268	$1.95 \cdot 10^{14}$
21	0.000550	0.26	1818	$1.57 \cdot 10^{14}$
40	0.000963	0.28	1038	$0.9 \cdot 10^{14}$

Данные табл. 4 показывают, что относительная скорость течения и коэффициент вязкости в значительной степени зависят от температуры. При изменении температуры в пределах $+14^\circ\text{C} - +40^\circ\text{C}$ эти ве-



Фиг. 7

личины изменяются примерно в 2.2 раза. В то же время при обеспечении постоянства плотности-влажности грунта в процессе сдвига, с достаточной для практики точностью ($\pm 7\%$), можно принять, что τ_0 не зависит от температуры. Тогда выражение (6), учитывая (7а), (8а), (9) и (10), запишется в следующем виде:

$$\gamma(t) = \omega_1(t - \theta) \tau^n + q(T)(t - \theta)(\tau - \tau_0) \quad (11)$$

или

$$\gamma(t) = \omega_3(t - \theta) \tau^n + \frac{\tau - \tau_0}{\gamma(T)} (t - \theta) \quad (12)$$

На графике фиг. 16 в качестве примера пунктирными линиями показаны результаты описания семейства кривых ползучести по выражениям (11) и (12).

График кривой зависимости $q = f_3(T)$ приведен на фиг. 7.

В рассмотренном нами случае зависимость $q = f_3(T)$ с достаточной точностью подчиняется линейному закону и может быть представлена в следующем виде:

$$q(T) = q(T_0) + k(T - T_0) = 0.000425 + 0.00002(T - 14^\circ\text{C}) \quad (13)$$

где $q(T_0)$ — относительная скорость течения при минимальном значении температуры; k — коэффициент пропорциональности.

Изменяемость коэффициента вязкости определяется по аналогичному выражению

$$\eta(T) = \frac{1}{\eta(T_0) + k_1(T - T_0)} \quad (14)$$

Резюмируя изложенное выше, можно отметить, что в случае постоянства плотности-влажности грунта в процессе формоизменения (кручения) влияние температуры на ползучесть можно учесть при помощи температурных функций относительной скорости деформации течения $q(T)$ и вязкости $\eta(T)$ (13, 14).

В заключение следует отметить, что представляет большой интерес исследование влияния температуры на ползучесть водонасыщенных глинистых грунтов при различных постоянных и переменных значениях их плотности-влажности и выявление влияния термоуплотнения на процесс формоизменения при различных постоянных значениях температур.

Институт механики АН Армянской ССР
Ереванский государственный университет

Поступила 13 III 1972

Ս. Բ. ՄԵՍՁՅԱՆ, Բ. Թ. ԳԱՍՏՅԱՆ

ԳԱՎԱՅԻՆ ԲՆԱՀԱՂԻ ՍՈՂԲԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅԱՆԸ ՍԱՀԲԻ ԳԵՊԳՈՒՄ
ԶԵՐԲԱՅԻՆ ԱԶԳԵՑՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՌՈՒՄՈՎ

Ա մ փ ն փ ու ռ մ

Շարադրվում են ուղրման պայմաններում, ջրահագեցված, բնական կազմվածքի, կավային բնահողի սահբի ձեւափոխութիւնն սողբի հետազոտութիւնն արդյունքները $T = +14^\circ, +21^\circ, +40^\circ\text{C}$ -ի ջերմաստիճանի դեպքում:

Պարզված է, որ (անկախ ջերմաստիճանի մեծությունից) շոշափող լարման (ոլորող մոմենտի) մակարդակից կախված սողքի ձևափոխություններն ունեն կամ մարող, կամ շմարող բնույթ: Սողքի շմարող ձևափոխություններն ընթանում են հաստատուն արագությամբ: Սահքի հարաբերական ձևափոխություն-շոշափող լարում առնչությունները բնորոշում են գծային ամրապնդմամբ օժտված առածգա-պլաստիկ մարմնի հատկությունները:

Սողքի ձևափոխությունները շարժվել են օղակաձև նմուշի արտաքին շրջանագծի վրա, իսկ դրանց համապատասխանող շոշափող լարումները որոշվել են ըստ ոչ գծային առածգականության տեսության ոլորման խնդրի լուծումից:

Սողքի մարող և շմարող ձևափոխությունները գրանցվել են իրարից առանձին սողքի ժառանգականության տեսության ֆիզիկական առնչություններով: Ապացուցված է, որ շոշափող լարում-հոսունության արագություն կապը ենթարկվում է Եվեղով-Քինգհամի օրենքին: Պարզված է, որ ջերմաստիճանը հիմնականում ազդում է հոսունության արագության՝ բնահողի մածուցիկության վրա, որը ջերմաստիճանի փոփոխման ավյալ սահմաններում փոփոխվում է ավելի քան 2.2 անգամ:

INVESTIGATION OF CREEP OF CLAY SOIL UNDER SHEAR, TAKING ACCOUNT OF TEMPERATURE EFFECTS

S. R. MESCHIAN, R. R. GALSTIAN

S u m m a r y

The results are presented of investigation on regularities of shear creep in water-saturated clay of natural structure at +14, +21 and +40°C under torsion.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Месчян С. Р. Длительное сопротивление переуплотненной глины сдвигу. Изв. АН АрмССР, Механика, т. 19, № 5, 1966.
2. Месчян С. Р. Ползучесть глинистых грунтов. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1967.
3. КAUDERER Г. Нелинейная механика, ИЛ, М., 1961.
4. НАДАН А. Пластичность и разрушение твердых тел. ИЛ, М., 1954.
5. КАЧАЛОВ А. М. Теория ползучести. Физматгиз, М., 1960.
6. HAEFELT R. Creep problems in soils, snow and ice. Proc 3-rd JCOSOMEF, vol. III, Zürich, 1953.
7. ШАХУНЯНГ Г. М. Земляное полотно железных дорог. Трансжелдориздат, М., 1953.
8. АРУТЮНЯН Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехиздат, М., 1952.