

А. А. ГОЛЬДИН

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ЛАНГАРСКОГО СУГЛИНКА

Современный этап гидротехнического строительства характеризуется возведением высоких плотин из местных материалов с водопорными элементами в виде ядер или экранов из связного грунта. Выбор надежных и в то же время экономичных конструкций этих плотин требует при расчетах их уплотнения наиболее полного учета физико-механических свойств связных грунтов, в частности, учета вязких свойств их скелета. В ряде случаев оказывается необходимым учет реологических свойств связных грунтов при расчетах осадок и горизонтальных смещений подпорных бетонных гидросооружений.

Как известно, учет ползучести скелета грунта в процессе его уплотнения с использованием основных зависимостей теории упруго-ползучего тела [1] был проведен В. А. Флориным [2, 3, 4], который показал, что связь между коэффициентом пористости и напряжениями в скелете грунта в случае одномерной задачи уплотнения и при учете линейной ползучести может быть записана в виде

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 - \sigma(\tau) \delta(t, \tau) - \int_0^t \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \delta(t, \tau) d\tau, \quad (1)$$

где

$$\delta(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau). \quad (2)$$

В выражении (2) величина  $\frac{1}{E(\tau)}$  представляет собой упруго-мгновенную деформацию от единичного напряжения, а  $C(t, \tau)$  — так называемую меру ползучести при осевом сжатии, которая соответствует деформации ползучести к моменту  $t$  от единичного сжимающего напряжения, приложенного в момент  $\tau$ .

В случае расчета горизонтальных смещений возникает необходимость в определении изменения во времени деформаций сдвига, определяемого свойствами ползучести грунта, которое в этом случае характеризуется некоторой функцией вида

$$\gamma(t, \tau) = \frac{1}{G(\tau)} + \omega(t, \tau). \quad (3)$$

В выражении (3)  $\frac{1}{G(\tau)}$  — упруго-мгновенная деформация сдвига,

соответствующая модулю сдвига  $G(\tau)$ ,  $\omega(t, \tau)$  — так называемая мера ползучести при сдвиге.

Применимость к описанию ползучести связанных грунтов основных зависимостей теории упруго-ползучего тела установлена С. Р. Месчаном [5—11].

Таким образом, при расчетах уплотнения связанных грунтов или при расчетах длительных деформаций сдвига возникает необходимость в экспериментальном определении мер ползучести при осевом сжатии  $S(t, \sigma)$  и чистом сдвиге  $\omega(t, \tau)$ .

В [12] автором были приведены некоторые результаты лабораторных исследований ползучести суглинка Лангарского месторождения, служащего материалом ядра Нурекской плотины. В дальнейшем методика исследований и обработка результатов была уточнена, результаты этих опытов приводятся в настоящей работе. Описание конструкций двух типов приборов, используемых в опытах, аналогичных приборам Геза и Тан Тьонг-ки [13, 14], приведено в [12]. В приборах первого типа цилиндр из связного грунта диаметром 40 мм и высотой 85 мм подвергался действию постоянной сжимающей осевой нагрузки; в приборах второго типа полый цилиндр из связного грунта наружным диаметром 38 мм, внутренним диаметром 26 мм и высотой 80 мм подвергался кручению при действии постоянного крутящего момента.

Опыты проводились на образцах лангарского суглинка нарушенной структуры оптимальной плотности и влажности (влажность 16,7%, средний объемный вес 1,76  $\text{Г/см}^3$ ). Удельный вес суглинка 2,69  $\text{Г/см}^3$ . Лангарский суглинок — лессовидный, карбонатный. Содержание карбонатов достигает 25%. Пределы пластичности суглинка имеют средние значения:

$$\begin{aligned} \text{предел текучести } W_L &= 28^0_{\text{н.}} \\ \text{предел пластичности } W_p &= 20^0_{\text{н.}} \\ \text{число пластичности } W_n &= 8^0_{\text{н.}} \end{aligned}$$

Гранулометрический состав суглинка

Удельный вес, $\text{Г/см}^3$	Содержание частиц диаметром в мм в %					
	0,25—0,1	0,1—0,05	0,05—0,02	0,02—0,01	0,01—0,005	0,005
2,74	следы	—	30,0	25,6	18,3	26,1

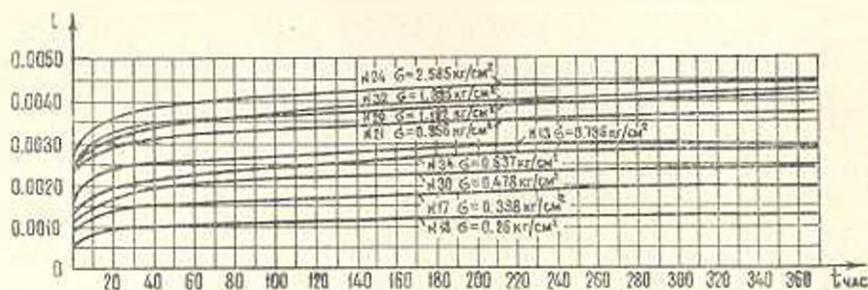
Опыты на осевое сжатие проводились при следующих, постоянных в течение опыта, сжимающих напряжениях в образце

$$\sigma = 0,26; 0,40; 0,48; 0,64; 0,80; 0,96; 1,20; 1,39 \text{ и } 1,58 \text{ кг/см}^2.$$

Деформации ползучести замерялись после истечения 5 сек после загрузки образца. Деформация, накапливаемая в образце за первые пять секунд после загрузки, принималась за упруго-мгновенную. На фиг. 1 представлены кривые ползучести лангарского суглинка при осевом сжатии образцов,  $\epsilon = f_1(t)$  при  $\sigma = \text{const}$ .

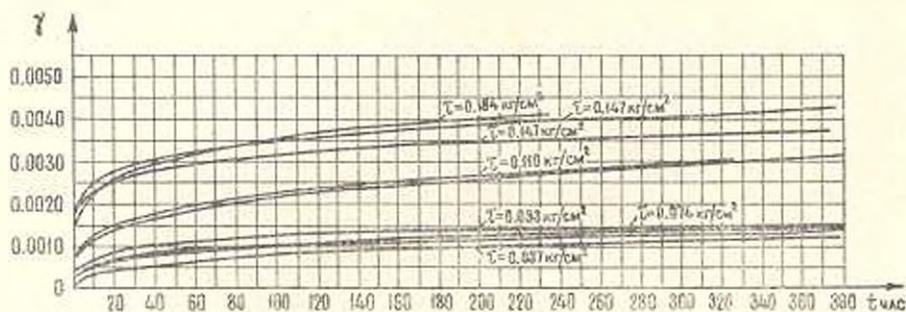
Опыты на кручение проводились при следующих, постоянных в течение опыта, касательных напряжениях в образце:

$$\tau = 0,037; 0,074; 0,093; 0,11; 0,147; 0,184 \text{ кг/см}^2.$$



Фиг. 1. Кривые ползучести при осевом сжатии.

Так же, как и в опытах на осевое сжатие, деформации ползучести при сдвиге фиксировались после 5 сек после загрузки образца. На фиг. 2 представлены кривые ползучести при сдвиге,  $\gamma = f_0(t)$  при  $\tau = \text{const}$ .



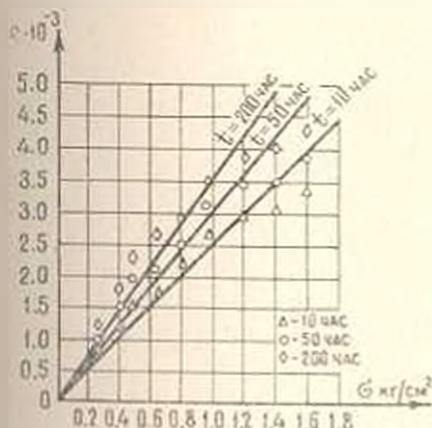
Фиг. 2. Кривые ползучести при сдвиге.

Повторяемость опытов для каждой ступени нагрузки была принята 2–4-кратной. Влажность испытываемых образцов колебалась в пределах от 16,6 до 16,8% (при  $W_{01} = 16,7\%$ ), а плотность — в пределах 1,74–1,78 г/см<sup>3</sup> (в среднем 1,76 г/см<sup>3</sup>). Изменения влажности образцов в процессе опыта на кручение практически не происходило (отклонение  $h_0$  влажности не превышало 0,2–0,3%).

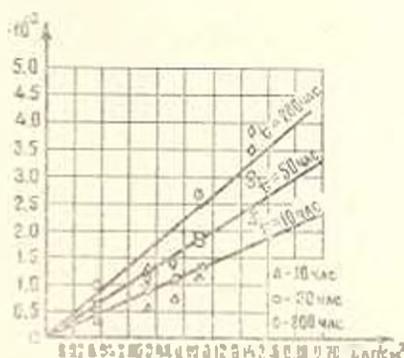
Как видно из приведенных кривых, деформации ползучести протекают неравномерно, имея наибольшую интенсивность в первые часы после загрузки. При этом для опытов на осевое сжатие наиболее характерным является участок неустановившейся ползучести, за которым практически следует затухание деформаций. В опытах на кручение характерным является наличие участка установившейся ползучести значительной протяженности. Это различие в кривых ползучести при сжатии и кручении, по-видимому, следует объяснить, с одной стороны, тем, что принятые в опытах значения действующих касательных напряжений близки к предельным напряжениям сдвига при отсутствии уплотняющей нагрузки, а в то время, как значения принятых

в опытах на осевое сжатие величин нормальных напряжений значительно меньше предела прочности на осевое сжатие для образцов суглинка заданной плотности и влажности, а с другой стороны, и различии структурных изменений материала в результате длительных деформаций при сжатии и кручении. Как отмечается рядом исследователей, при сдвиге происходит переориентация глинистых пластинчатых частиц.

Обработка экспериментальных кривых ползучести с целью установления выражений для мер ползучести  $C(t, \sigma)$  и  $\psi(t, \tau)$  проводилась в предположении, что с достаточной степенью точности связь между напряжениями и деформациями ползучести в заданном диапазоне напряжений может быть принята линейной. Это положение может быть проиллюстрировано графиками  $\epsilon - \sigma$  и  $\gamma - \tau$  для  $t = \text{const}$  на фиг. 3 и 4, которые, кроме того, указывают на значительный разброс опытных данных. Считая, что связь между напряжениями и деформациями ползучести линейна, экспериментальные кривые деформация—время пересчитывались к единичному напряжению ( $\sigma = 1 \text{ кг/см}^2$  для опытов на осевое сжатие,  $\tau = 1 \text{ кг/см}^2$  для опытов на кручение). Для семейства пересчитанных кривых строилась осредненная, так называемая приведенная кривая, для которой и определялись расчетные параметры мер ползучести.



Фиг. 3. Зависимости деформаций ползучести при сжатии от напряжений при  $t = \text{const}$ .



Фиг. 4. Зависимости деформаций ползучести при кручении от напряжений при  $t = \text{const}$ .

Для обработки результатов опытов, выражаемых приведенными кривыми деформация—время, были выбраны экспоненциальные зависимости Н. Х. Арутюняна [1], имеющие вид

$$\left. \begin{aligned} C(t, \sigma) &= \sum_{i=1}^n a_i [1 - e^{-b_i t^{\alpha_i}}], \\ \psi(t, \tau) &= \sum_{i=1}^n b_i [1 - e^{-c_i t^{\beta_i}}] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

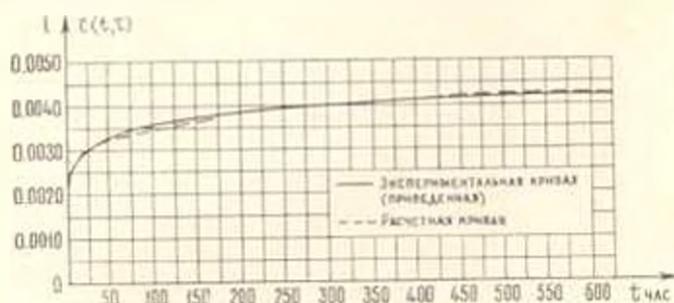
Для опытов на осевое сжатие выражение для меры ползучести получено в виде

$$C(t, \tau) = 0,00137[1 - e^{-0,00224(t-\tau)}] + 0,00114[1 - e^{-0,37(t-\tau)}] + 0,00177[1 - e^{-0,29(t-\tau)}] \quad (5)$$

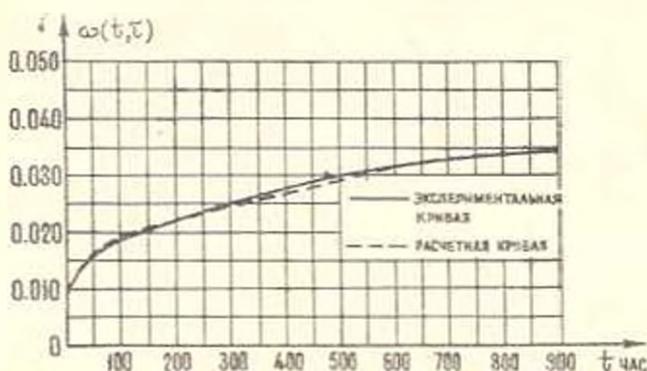
а для опытов на кручение

$$\omega(t, \tau) = 0,024[1 - e^{-0,00224(t-\tau)}] - 0,0122[1 - e^{-0,37(t-\tau)}]$$

Сопоставление расчетных кривых ползучести, построенных по зависимостям (5), с экспериментальными (приведенными) кривыми ползучести дано на фиг. 5, 6.



Фиг. 5. Сопоставление экспериментальных (приведенных) и расчетных кривых ползучести при сжатии.



Фиг. 6. Сопоставление экспериментальных (приведенных) и расчетных кривых ползучести при кручении.

Следует отметить, что сопоставление расчетных мер ползучести, выражаемых зависимостями (5), указывает на некоторое несоответствие известной в теории упруго-ползучего тела формуле

$$\omega(t, \tau) = 2(1 - \nu)C(t, \tau), \quad (6)$$

связывающей меру ползучести при осевом сжатии и меру ползучести при чистом сдвиге. Действительно, на вида формулы (6) следует, что

меры ползучести должны отличаться только множителем  $2(1 + \nu)$ , максимальная величина которого для  $\nu = 0,5$  равна трем.

Всесоюзный научно-исследовательский институт  
гидротехники им. Б. Е. Веденеева

Поступила 21 X 1965

Ա. Լ. ԳՈԼԴԻՆ

ԱՆԵՄՈՒՅՆ ԵՆԹԱԿԱԿԻ ՍՈՂԵԻ ՓՈՐՉՆԱԿԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Աշխատանքում բերվում են խտրաժամ ստրուկտուրայով լանդարյան լոս-  
տանման ենթակափի սողքի փորձնական ուսումնասիրությունների արդյունք-  
ները՝ մաքուր սաղքի և կոզային ընդլայնման նհարափորությամբ առանցքային  
սեղման պայմաններում:

Ցույց է տրված, որ շարունակի ոչ մեծ միջակայքում լարումների և սողքի  
քննարմացիաների կապը կարելի է ընդունել գծային. իսկ սողքի փորձնական  
կորերը կարող են նկարագրվել էքսպոնենցիալ բազմանդամ առնչություններով:

A. I. GOLDIN

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF CREEP IN THE LANGAR  
LOESS-LIKE LOAM

S u m m a r y

The paper contains the results of experimental investigations on  
the creep of Langar loess-like loam of disturbed structure under axial  
compression with possible lateral expansion and pure shear.

It is shown that within a small range of loads the relationship  
between stresses and creep deformations may be a linear one, and  
experimental creep curves may be described by polynomial exponential  
relationships.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехтеориздат, 1952.
  2. Флорин В. А. Одномерная задача уплотнения сжимаемой пористой ползучей  
земляной среды. Известия АН СССР, ОТН, № 6, 1953.
  3. Флорин В. А. Одномерная задача уплотнения земляной среды с учетом старе-  
ния, нелинейной ползучести и разрушения структуры. Известия АН СССР,  
ОТН, № 9, 1953.
  4. Флорин В. А. Основы механики грунтов, т. II. Госстройиздат, 1961.
  5. Месчан С. Р. К вопросу о ползучести связанных грунтов. Известия АН АрмССР,  
серия физ.-мат. наук, 7, № 6, 1954.
- 3 Известия АН АрмССР, Механика, № 4

6. Месчян С. Р. К вопросу об описании ползучести связанных грунтов нарушенной структуры. ДАН Арм.ССР, 21, № 2, 1955.
7. Месчян С. Р. К вопросу о законе плавления для деформаций ползучести связанных грунтов при сжатии. ДАН Арм.ССР, 25, № 4, 1957.
8. Месчян С. Р. Экспериментальное исследование зависимости между напряжениями и деформациями ползучести связанных грунтов. ДАН Арм.ССР, 24, № 2, 1957.
9. Месчян С. Р. О ползучести связанного грунта при сжатии и условиях невозможности бокового расширения. Известия АН Арм.ССР, серия физ.-мат. наук, 11, № 4, 1958.
10. Месчян С. Р. Влияние уплотняющей нагрузки на деформативные свойства глинистых грунтов при сдвиге. ДАН Арм.ССР, 31, № 4, 1960.
11. Месчян С. Р. Экспериментальное изучение закономерностей деформаций ползучести глинистого грунта. Известия АН Арм.ССР, серия физ.-мат. наук, 16, № 1, 1963.
12. Гольдин А. Л. Некоторые результаты лабораторных исследований ползучести глинистых грунтов. Сборник докладов по гидротехнике, вып. 5, 1963.
13. Geuse E. C. W. A., Tan Tjong-Kie. The mechanical behaviour of claus. Proc. of the Inter. Congr. on Rheology, 1953.
14. Tan Tjong-Kie. Structure mechanics of claus, Scientica Sinica, VIII, № 1, 1959.