

Н. Г. АХНАЗАРЯН, Э. М. МАРКАРЯН, С. Р. МЕСЧЯН

## О ПРИМЕНИМОСТИ ТЕОРИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ СКЕЛЕТА ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ОДНОМЕРНОМ УПЛОТНЕНИИ

Работ, посвященных экспериментальному исследованию применимости теорий ползучести для описания процесса деформации немерзлых грунтов во времени, очень мало. Имеется только несколько работ одного из авторов этой статьи [1], посвященных применимости наследственной теории старения (упруго-ползучего тела) Г. Н. Маслова—Н. Х. Арутюняна [2] для описания процесса ползучести скелета при уплотнении и сдвиге глинистых грунтов нарушенной структуры.

Надо отметить, что работ, посвященных исследованию поведения грунтов под постоянными нагрузками, описанию кривой ползучести, а также определению зависимости напряжения-деформации ползучести, имеется довольно много [3, 4, 5]. Однако, ни в одной из них не сделана попытка проверки теории в целом, путем сопоставления экспериментальных кривых ползучести при переменном во времени напряжении с кривой, построенной по физическим уравнениям рассматриваемой теории, на основании данных испытания образцов-близнецов на ползучесть при постоянных напряжениях.

Исследования вида кривой ползучести при постоянной нагрузке и кривой напряжение-деформация ползучести необходимы, но совершенно не достаточны для проверки теории ползучести.

В этой статье приводятся результаты проверки пригодности теорий старения и упрочнения для описания *ползучести скелета* глинистых грунтов при одномерном уплотнении. Для оценки этих теорий приводятся также результаты описания процесса ползучести по наследственной теории старения Г. Н. Маслова—Н. Х. Арутюняна. Как и ранее [1], принимается во внимание, что при испытаниях тонких предварительно уплотненных образцов влиянием фактора фильтрации на уплотнение водонасыщенных глинистых грунтов можно пренебречь и результаты испытания можно отнести только к ползучести скелета.

С целью проверки пригодности указанных теорий для описания процесса ползучести скелета глинистых грунтов в условиях одномерного уплотнения испытана глина неокома (Саратовская ГЭС) нарушенной структуры при двух ее начальных состояниях плотности-влажности и ленточная глина Синди (Эстония) ненарушенной структуры при двух различных направлениях действия сжимающих напряжений—вдоль и поперек слоистости.

1. Для получения двух различных начальных состояний плотности-влажности образцы-близнецы, изготовленные из пасты глины неокома, в течение 82 дней были подвергнуты предварительному уплотнению нагрузками  $\tau_{II} = 5.0$  и  $12.5 \text{ кг/см}^2$ . Образцы ( $d = 70 \text{ мм}$ ,  $h = 20 \text{ мм}$ ) изготовлялись из пасты, обладающей влажностью, близкой к влажности грунта при пределе текучести. Предварительно уплотняющая нагрузка прикладывалась ступенями по  $\tau_{ст} = 0.25$  и  $0.5 \text{ кг/см}^2$  с интервалом приложения 7—14 дней.

Показатели основных физических характеристик образцов-близнецов глины неокома приведены в табл. 1. Приведенные в этой таблице значения коэффициентов пористости ( $\varepsilon$ ) получены обратным пересчетом. Влажность после предварительного уплотнения определена по величине  $\varepsilon$ , исходя из условия полной водонасыщенности грунта ( $G = 1$ ).

Таблица 1

Наименование грунта	$\tau_{II} \text{ кг/см}^2$	Удельн. вес, $\gamma/\text{см}^3$	Влажность пасты, $\theta/\%$	Влажность (средняя) после предвар. уплотн., $\theta/\%$	Коэф. пористости (сред.) после пред. уплот.	Пределы пластичности		
						Предел текучести	Предел пластичности	Число пластичности
Глина неокома	5.0	2.75	65.4	40.7	1.12	67.9	34.8	33.1
	12.5		65.4	37.1	1.02			

Опыты проводились в компрессионных приборах модели М-2 и М-4 С. Р. Месчяна [1] при двух- и трехкратном повторении. Деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления  $0.002 \text{ мм}$ .

Общий вид батареи пружинных сжимающих приспособлений с приборами М-4 показан на фиг. 1.

После предварительного уплотнения образцы-близнецы первой серии ( $\tau_{II} = 5 \text{ кг/см}^2$ ) были испытаны на ползучесть в течение 114 дней при напряжениях  $\sigma = 0.5$ ;  $1.0$  и  $4.0 \text{ кг/см}^2$ . Кроме того, пара образцов-близнецов была испытана при возрастающей во времени ступенями нагрузке ( $\tau_{ст} = 0.5 \text{ кг/см}^2$ ). Образцы-близнецы второй серии были испытаны на ползучесть при  $\sigma = 2$  и  $10 \text{ кг/см}^2$ , а ступенчатое нагружение осуществлялось по  $\tau_{ст} = 2 \text{ кг/см}^2$ . Ступени нагрузок прикладывались к образцу грунта с интервалом 8 и 7 дней соответственно.

Экспериментальные кривые ползучести двух серий образцов-близнецов показаны сплошными линиями на правых половинах фиг. 2 и 3. На левых половинах этих же графиков приведены кривые напряжение-деформация ползучести, построенные для трех различных фиксированных моментов времени.

Экспериментальные кривые ползучести при постоянных напряжениях описаны степенной зависимостью вида

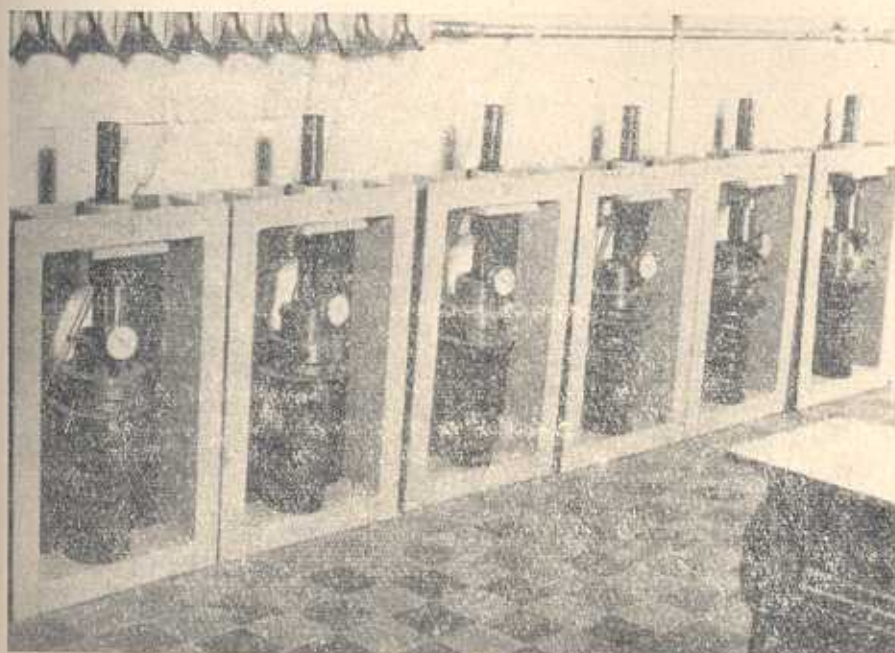
$$I_{\text{полз}}(t) = At^m \quad (1)$$

Как видно из графиков фиг. 4 и 5, степень точности описания экспериментальных данных принятой зависимости достаточно высока.

Для установления связи между напряжениями и деформациями ползучести также использована степенная зависимость вида

$$I_{\text{полз}} = B\sigma^n \quad (2)$$

где  $B$  и  $n$  — определяемые из опыта параметры.



Фиг. 1.

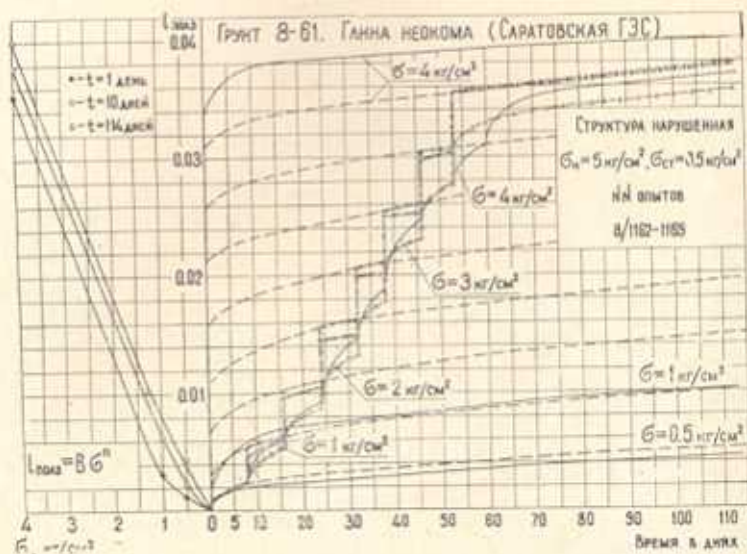
Описание семейств экспериментальных кривых ползучести, соответствующих различным значениям постоянных напряжений, на фиг. 2 и 3 показаны штриховыми линиями. На этих графиках штриховыми линиями показаны также полученные по расчету кривые ползучести, соответствующие промежуточным значениям ( $\sigma = 1.5; 2.0; 2.5; 3.0$  и  $3.5$  при  $\sigma_0 = 5 \text{ кг/см}^2$  и  $\sigma = 1.0; 4.0; 6.0$  и  $8.0 \text{ кг/см}^2$  при  $\sigma_0 = 12.5 \text{ кг/см}^2$ ) величины постоянного напряжения.

Известно, что при степенной зависимости между напряжениями и деформациями вида (2) в теориях старения и упрочнения связи между напряжениями, деформацией ползучести и временем записываются соответственно в следующем виде:

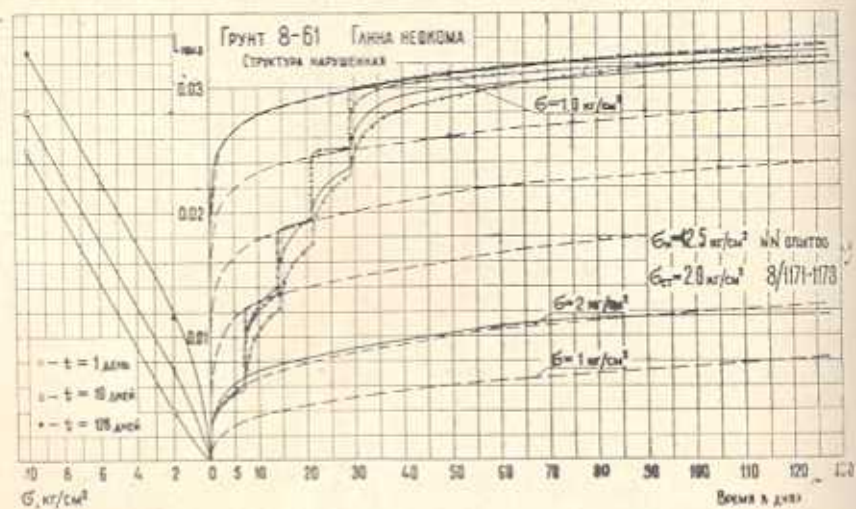
$$I_{\text{полз}}(t) = C(t)F(\sigma) = C(t)\sigma^n \quad (3)$$

$$\dot{I}_{\text{полз}} I_{\text{полз}}^n = x\sigma^2 \quad (4)$$

где  $C(t)$  — ползучесть материала при единичной нагрузке (по терминологии Н. Х. Арутюняна — мера ползучести),  $F(\sigma)$  — функция напряжений, учитывающая нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями ползучести (при линейной ползучести  $F(\sigma) = \sigma$ ),  $\dot{\epsilon}_{полз}$  — скорость ползучести,  $\alpha$ ,  $n$  и  $B$  — параметры.



Фиг. 2.

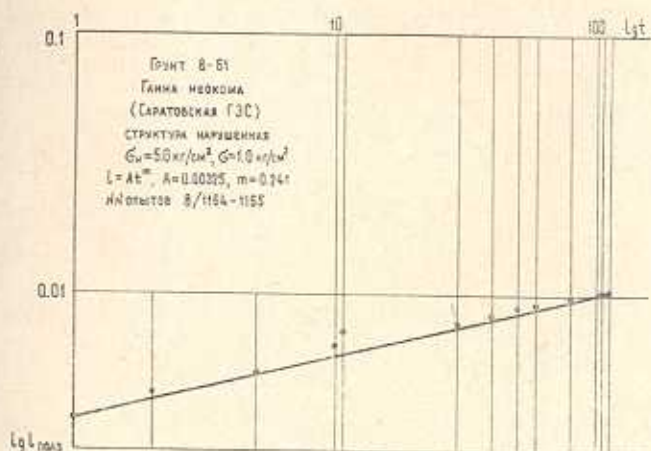


Фиг. 3.

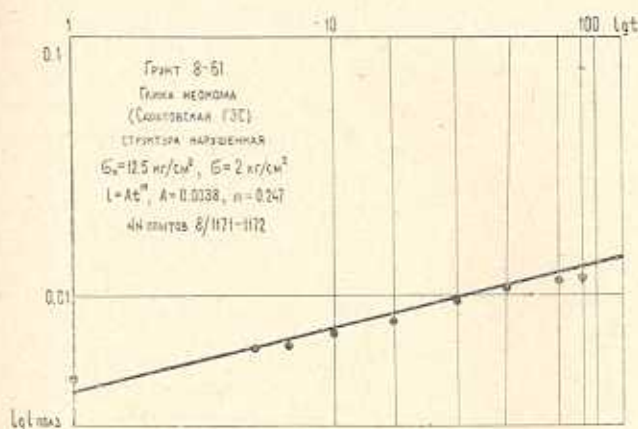
В теории упруго-ползучего тела, при отсутствии старения, зависимость  $\epsilon_{полз}(t) = f(\sigma, t)$  записывается в следующем виде:

$$l_{полз}(t) = - \int_{z_1}^z F(z) \frac{\partial C(t-z)}{\partial z} dz \quad (5)$$

где  $t$  — время, для которого определяется деформация,  $z$  — текущая координата времени, а остальные обозначения имеют прежние значения.



Фиг. 4.



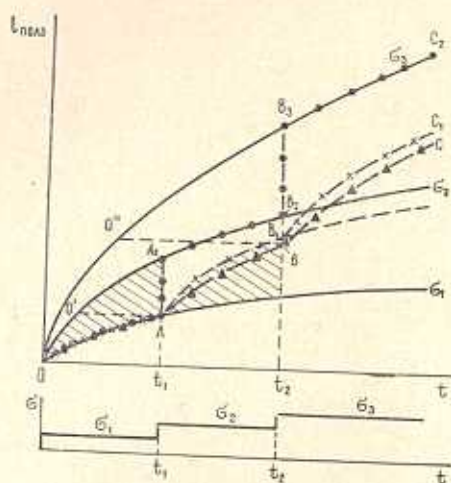
Фиг. 5.

Не останавливаясь на формулировке рассматриваемых теорий и изложении их положительных и отрицательных сторон, подробно изложенных в литературе [6], отметим, что при ступенчатом нагружении ( $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ ) в пределах ступени нагрузки  $\sigma_1$  их предсказания об изменении деформации во времени совпадают (отрезок кривой OA, фиг. 6).

При увеличении напряжения до  $\sigma_2$  теория старения предсказывает скачкообразное изменение деформации в момент времени  $t_1$  и дальнейшее увеличение ползучести по кривой  $A_2B_2$ . В теории уп-

рочнения принимается, что в процессе ползучести, вследствие накопления деформации, имеет место упрочнение материала (изменение состояния) и поэтому при увеличении напряжения до  $\sigma_2$  деформация ползучести будет обусловлена величиной  $\sigma_2$  и деформацией, накопленной материалом под  $\sigma_1$  до момента времени  $t$ . Тогда для построения кривой для  $\sigma_2$  кривую ползучести  $\sigma_2$  надо сдвинуть вправо так, чтобы точка  $O'$  совпала бы с точкой  $A$  (фиг. 6).

Для построения кривой ползучести для  $\sigma_2$  по наследственной теории ползучести (теории упруго-ползучего тела) надо, начиная с момента  $t_1$ , на кривой  $\sigma_1$  отложить вверх разность ординат кривых  $\sigma_2$  и  $\sigma_1$ , то есть надо заштрихованную фигуру наложить на кривую  $\sigma_1$ , как это показано на фиг. 6.



Фиг. 6.

Результаты описания процесса ползучести глины неокома при ступенчатом изменении нагрузок во времени приведены на правых половинах графиков фиг. 2 и 3.

Сопоставление экспериментальной кривой ползучести с кривыми, построенными по различным теориям ползучести, показывает, что кривые теорий старения и упруго-ползучего тела, как правило, располагаются выше экспериментальной кривой ползучести, а кривая теории упрочнения—ниже экспериментальной кривой ползучести, причем кривая теории упруго-ползучего тела располагается несколько ниже кривой теории старения, а кривая теории упрочнения гораздо лучше отражает характер изменения деформации ползучести.

Расположение кривой теории упруго-ползучего тела выше экспериментальной обусловлено уплотнением и упрочнением грунта в процессе деформации и некоторым нарушением закона наследственности деформации ползучести. В то же время полное игнорирование наследственностью деформации ползучести теорией упрочнения приводит к занижению деформации ползучести.

Очевидно, к наилучшему описанию процесса ползучести грунтов при уплотнении привела бы комбинация теорий упруго-ползучего тела и упрочнения. Однако, поскольку результаты описания эксперимента рассмотренными теориями можно считать удовлетворительными, не имеет смысла усложнять теорию.

2. Испытание ленточной глины (табл. 2) ненарушенной структуры Синди (Эстония), ввиду невозможности вырезки большого количества образцов-близнецов, выполнено по приближенной методике одного из авторов этой статьи [1].

Таблица 2

Наименование	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Естественная влажность, %
Ленточная глина Синди (Эстония)	2.69	1.75	42.0

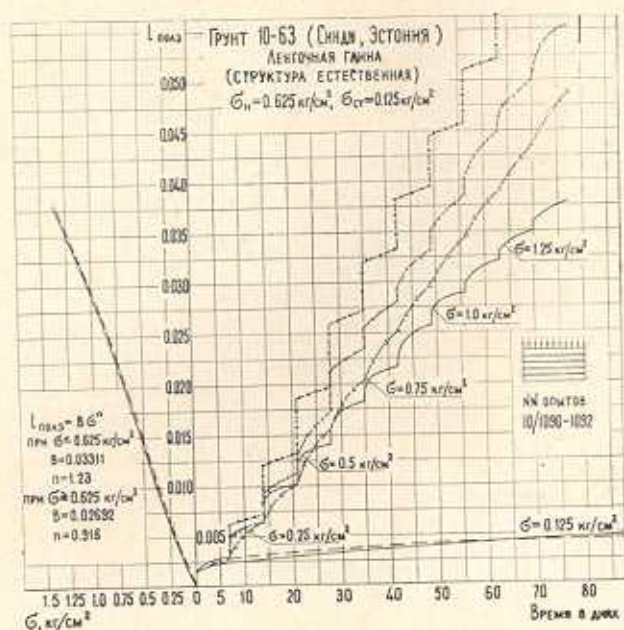
Принимая условие подобия кривых ползучести и отсутствия старения грунта, испытываются на ползучесть два или две пары образцов-близнецов. Один из образцов испытывается на ползучесть при постоянной нагрузке для определения параметров ползучести грунта, а второй—при возрастающей нагрузке ступенями с интервалом их приложения 7—14 дней.

На правых половинах фиг. 7 и 8 сплошными линиями показаны экспериментальные кривые ползучести, полученные при постоянном напряжении  $\sigma = 0.125 \text{ кг/см}^2$  и при его возрастании ступенями по  $\sigma_{ci} = 0.125 \text{ кг/см}^2$ . На левых половинах этих же графиков сплошной линией показана кривая зависимости  $l_{\text{полз}} = f(\sigma)$ , построенная по экспериментальной кривой ползучести переменных напряжений. Там же штриховыми линиями показано описание кривых ползучести  $l_{\text{полз}} = f(\sigma)$  и  $l_{\text{полз}} = F(t)$ . В целях осуществления описания процесса ползучести в наиболее невыгодных условиях методики эксперимента интервал приложения ступеней нагрузок принят равным 7 дням.

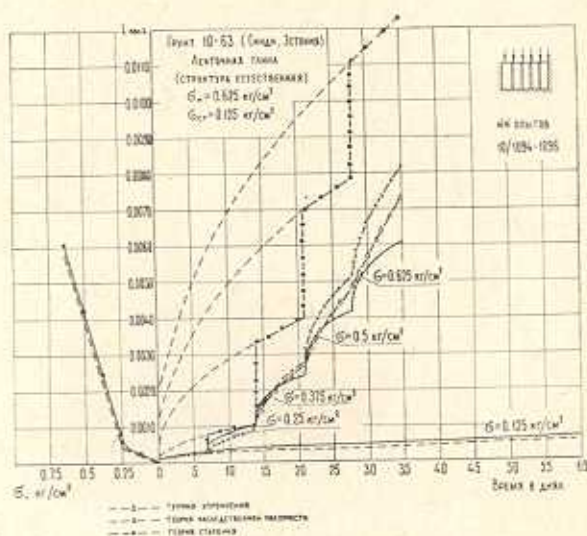
Кривые ползучести описаны выражением (1). Графики фиг. 9 и 10 показывают хорошую сходимость экспериментальных данных с принятой зависимостью. Для установления зависимости  $l_{\text{полз}} = f(\sigma)$  использовано выражение (2). Параметры  $B$  и  $n$  зависимости (2) определены по графику логарифм деформации ползучести—логарифм напряжения (фиг. 11).

Интересно обратить внимание на тот факт, что при испытании ленточной глины Синди поперек расположения слоев показатель степени  $n$  в зависимости  $l_{\text{полз}} = f(\sigma)$  больше единицы ( $n = 1, 2, 3$ ).

Это объясняется начальным разупрочнением грунта, вследствие постепенного разрушения структурных связей. Вопрос этот подробно рассмотрен одним из авторов статьи в монографии [1].



Фиг. 7.



Фиг. 8.

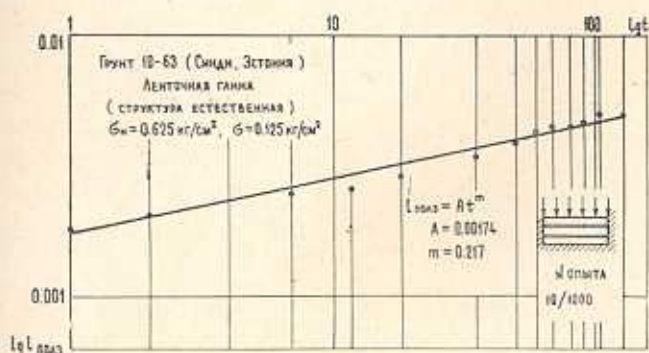
Результаты описания экспериментальной кривой ползучести при переменном во времени напряжении по теориям старения, упрочнения и упруго-ползучего тела приведены на правых частях графиков фиг. 7 и 8. Описание выполнено графическим методом (фиг. 6). Семейства кривых ползучести при различных постоянных напряжениях (фиг. 8), необходимые для выполнения графического построения, определены по выражению (3).



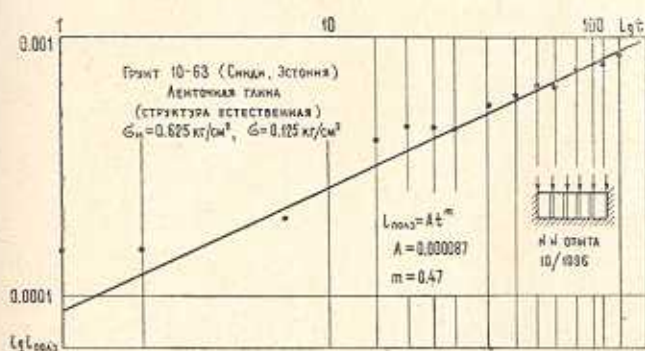
Входящая в выражение (3) мера ползучести  $C(t)$  определяется по соотношению

$$C(t) = \frac{l_{\text{полз}}(t)}{F(\sigma)} \quad (6)$$

где  $l_{\text{полз}}(t)$  — аналитическое выражение кривой ползучести при  $\sigma = 0.125 \text{ кг/см}^2$ ,  $F(\sigma)$  — функция напряжения вида  $F(\sigma) = \sigma^n$  при  $\sigma = 0.125 \text{ кг/см}^2$ .



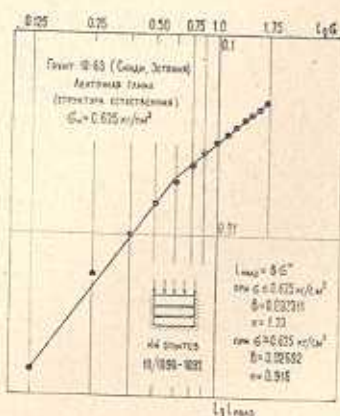
Фиг. 9.



Фиг. 10.

Рассмотрение графиков фиг. 7 и 8 показывает, что, как и в приведенных выше примерах, кривая теории упруго-ползучего тела располагается между кривыми теорий старения и упрочнения. В наиболее благоприятных условиях эксперимента расхождение между опытной кривой и кривыми теорий упрочнения и упруго-ползучего тела при  $\sigma = 1, 3, 75 \text{ кг/см}^2$  доходит до 20–30%, соответственно. Это, во-первых, говорит о том, что предложенная методика пригодна для определения параметров ползучести, а во-вторых, при испытании грунтов ненарушенной структуры для получения хороших результатов описания процесса ползучести интервал приложения ступеней нагрузок надо принять не менее 14 дней.

Опыты также показывают, что ленточная глина Синди обладает явной естественной анизотропией. Деформация поперек расположения слоев примерно в пять раз больше, чем вдоль расположения слоев.



Фиг. 11.

Очевидно, что при столь большой разнице деформаций вдоль и поперек расположения слоев учет анизотропии грунта является обязательным.

Институт математики и механики  
АН Армянской ССР

Поступила 16 VI 1967

Ն. Գ. ԱՅՆԱԶԱՐՅԱՆ, Է. Մ. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Ս. Ռ. ՄԵՍՉՅԱՆ

ՍՈՂՔԻ ՏԵՄՈՒՅՈՒՆՆԵՐԻ ԸՆԳՈՒՆԵԼԻՈՒԹՅԱՆ ԱՏՈՒԳՈՒՄԸ ԿԱՎԱՅԻՆ  
ԲՆԱՀՈՂԵՐԻ ԿՄԱԽԻ ԳԵՖՈՐՄԱՑԻԱՆՆԵՐԻ ՆԱԸՐԱԳՐՈՒԹՅԱՆ  
ՀԱՄԱՐ՝ ՄԻԱԶԱՓ ԽՏԱՅՄԱՆ ԳԵՊՔՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Հոդվածում բերված են խախտված և չխախտված կազմվածք ունեցող կավային բնահողերի կմախքի ժամանակի ընթացքում զեֆորմացիաների զրանցումը՝ միաշափ սեղման դեպքում, ժառանգականության, ձերացման և ամրացման տեսությունների միջոցով:

Պարզված է, որ ժառանգականության և ամրացման տեսությունները բավարար չափով են զրանցում փորձնական կորերը: Ծերացման տեսությամբ ստացված սողերի կորերը ավելի բարձր են դասավորվում, քան մյուս տեսություններով ստացված կորերը:

N. G. AKHNAZARIAN, E. M. MARKARIAN, S. R. MESCHIAN

THE APPLICATION OF CREEP THEORY FOR THE  
DESCRIPTION OF DEFORMATION OF THE SKELETON OF  
CLAY SOILS DURING ONE-DIMENSIONAL HARDENING

S u m m a r y

The results of the use of the theory of hereditary creep, ageing and hardening have been elucidated in the paper in order to describe creep of the skeleton of clay soil with disturbed and undisturbed structures.

It has been established that in the theories of heredity and hardening the curves are plotted satisfactorily.

The curves of creep obtained through the theory of ageing are above the ones received by means of other theories.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Месчян С. Р. Ползучесть глинистых грунтов. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1967.
2. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехиздат, М.—Л., 1952.
3. Вялов С. С. и Скибицкий А. М. Реологические процессы в мерзлых грунтах и плотных глинах. Материалы IV Межд. конгресса по мех. грунтов и фундаментостроению. Изд. АН СССР, М., 1957.
4. Гольдштейн М. Н., Бабицкая С. С., Мизюмский В. А. Методика испытания грунтов на ползучесть и длительную прочность. „Вопросы геотехники“, № 5, Днепропетровск, 1962.
5. Гольдин А. А. Экспериментальные исследования ползучести лангарского суглинка. Изв. АН АрмССР, Механика, т. 19, № 4, 1966.
6. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. Изд. „Наука“, М., 1966.
7. Наместников В. С. и Хвостунков А. А. Ползучесть дюралюминия при постоянных и переменных нагрузках. ПМТФ, № 4, 1960.