

УДК 622.02

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ КОМПРЕССИИ

Фалалеев Г.Н

Институт геомеханики и освоения недр НАН КР

Проверка любой теории ползучести сводится к сопоставлению семейства кривых ползучести, которые были определены экспериментально и построены по уравнениям выбранной теории. Для упрощения проверки предпочтительно рассматривать ступенчато-возрастающие с течением времени нагрузки. Здесь же на основе анализа литературных источников используется для описания кривых компрессионной ползучести теория наследственности в виде интегрального уравнения Больцмана–Вольтерра второго рода.

Исследование процессов ползучести и релаксации материала, процессов изменения во времени его свойств под действием различных нагрузок или деформаций вышло на качественно новый уровень. Одним из центральных вопросов является вопрос обоснованного выбора ядер интегральных уравнений наследственной ползучести.

Функция ползучести, представленная в аналитическом виде, должна удовлетворять следующим основным требованиям: иметь малые отклонения от экспериментальных данных; быть достаточно гладкой, т. е. иметь определенное количество производных;

обеспечивать возможность решения интегро-дифференциальных уравнений теории наследственной вязко-упругости.

Нами использована функция ползучести в виде абелева ядра с применением метода переменных модулей /1/. А.М.Линьков и Б.З.Амусин /1/ показали, что для решения задач линейно-наследственной ползучести операторные выражения для упругих постоянных можно заменить обычными алгебраическими выражениями, соответствующими ядру интегрального уравнения. Такой метод решения задач упругости с использованием временных функций вместо упругих постоянных получил название метода переменных модулей. Суть этого метода заключается в приближенном равенстве вида:

$$D\left(\frac{1}{E}\right)f = D\left(\frac{1}{E}f\right), \quad (1)$$

где $D\left(\frac{1}{E}\right)$ – функция временного оператора E , состоящего из упругой постоянной и интегрального оператора; f – произвольная функция координат и времени t ; $D\left(\frac{1}{E}f\right)$ – функция результата действия временного оператора на функцию f .

Впервые этот метод был применен Н.Н.Карелиным и Б.З.Амусиным /2/ при описании кривых ползучести разного типа горных пород с использованием функций ползучести для установления корреляционных связей между реологическими и упругими свойствами.

Из анализа литературных источников установлено, что для грунтов метод переменных модулей был применен при учете реологических свойств грунтов при расчете обделок тоннелей мелкого заложения, сооружаемых с применением укрепительной цементации /3/. Нами такой метод был использован при определении реологических характеристик глинистых грунтов при компрессионной ползучести.

Использование приближенного равенства позволяет при решении задач линейно-наследственной ползучести заменить временные операторы и функции от этих операторов функциями ползучести $D(t)$. Тогда для определения переменных модулей основных упругих констант применяют следующие формулы:

$$E_t = \frac{E}{1 + \Phi t}; \quad \nu_t = 0.5 - \frac{0.5 - \nu}{1 + \Phi t}; \quad G = \frac{E}{1 + \frac{2\Phi t}{2(1 + \nu)}} \quad (2)$$

На основании теории ползучести горных пород, предложенной Ж.С.Ержановым, функцию ползучести можно представить в виде

$$\Phi(t) = \frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha} \quad (3)$$

Полученные нами результаты испытаний глинистых грунтов при компрессионной ползучести были обработаны с применением этой функции ползучести.

Обоснованием применимости теории линейно наследственных сред явился линейный характер изохронных кривых глинистого грунта. Значения теоретических деформаций ползучести глинистых грунтов, обработанные по теории наследственной ползучести со степенным ядром Абеля, имели вид:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t^{1-\alpha} \right), \quad (4)$$

где ε_t - текущая деформация на момент времени;

ε_0 - мгновенная деформация при одномерном уплотнении;

δ и α - параметры ползучести.

Логарифмируя выражение (4), получим:

$$\ln \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = (1 - \alpha) \ln t + \ln \frac{\delta}{1 - \alpha} \quad (5)$$

Приведем это выражение к линейному виду:

$$Y = BX + C, \quad (6)$$

$$\text{где } Y = \ln \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_0}{\varepsilon_0}; \quad X = \ln t; \quad B = 1 - \alpha; \quad C = \ln \frac{\delta}{1 - \alpha};$$

Отсюда параметры ползучести α и δ определяются следующим образом:

$$\alpha = 1 - B; \delta = B e^C \quad (7)$$

Для удобства определения параметров ползучести α и δ кривые ползучести « ε -t» были перестроены в логарифмические зависимости

$$\ln \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} - \ln t$$

В качестве примера здесь приведена только одна таблица экспериментальных и теоретических значений деформаций компрессионной ползучести при нагрузках 0,05 МПа.

Таблица 1. Глинистый грунт, образец №1 суглинок Чон-Арык
компрессионная ползучесть. Нагрузка-0,05 МПа

№ п/п	t, сут	X _i	Y _i	ε (t) 10 ⁻³	ε теор (t) 10 ⁻³	П=(ε теор - ε (t))/ ε (t), %
1	2	3	4	5	6	7
1	0,041	-3,19418	-1,946	4	4,16	-3,94
2	0,083	-2,489	-1,253	4,5	4,35	3,34
3	0,125	-2,079	-1,253	4,5	4,49	0,32
4	0,167	-1,790	-1,253	4,5	4,60	-2,11
5	0,208	-1,570	-0,847	5	4,69	6,28
6	0,292	-1,232	-0,847	5	4,84	3,18
7	1	0,000	-0,560	5,5	5,60	-1,77
8	2	0,693	-0,336	6	6,20	-3,28
9	3	1,099	-0,154	6,5	6,62	-1,92
10	4	1,386	0,000	7	6,97	0,45
11	5	1,609	0,134	7,5	7,26	3,18
12	6	1,792	0,134	7,5	7,52	-0,25
13	7	1,946	0,134	7,5	7,75	-3,33

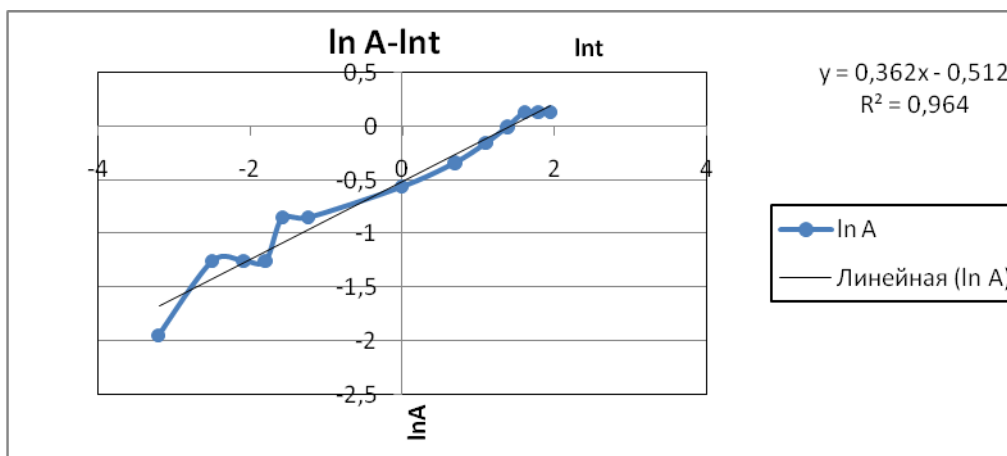


Рис. 1. Кривые ползучести глинистого грунта в логарифмических координатах при напряжении 0,05 МПа

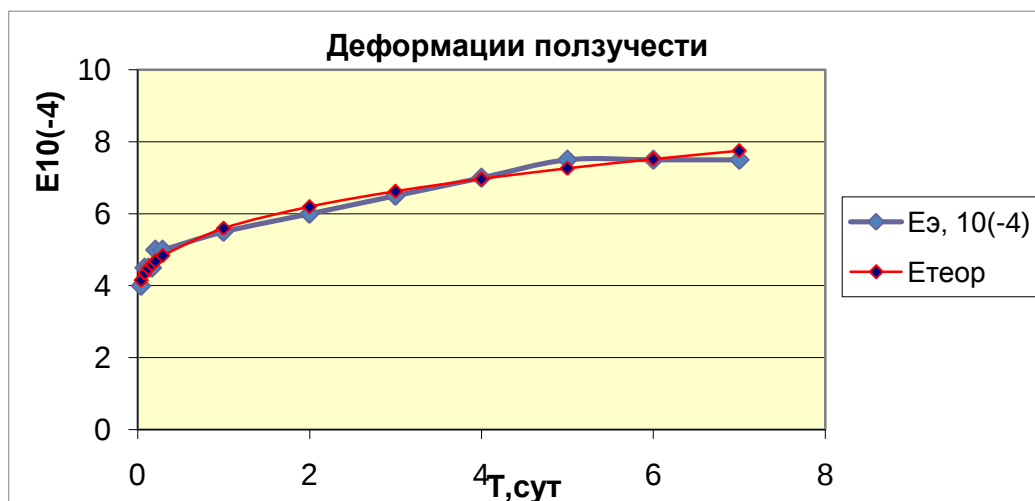


Рис.2. Экспериментальные и теоретические кривые ползучести глинистых грунтов при напряжении 0,05 МПа

Как видно из рисунка 1, экспериментальные точки зависимостей ложатся на прямые, при этом для каждого уровня приложенных нагрузок получены свои графики и следовательно собственные параметры α и δ . Вычисление этих параметров проводилось по методу наименьших квадратов. В таблице 1 приведены значения $X_i = \text{Int}_i$, $Y = \ln \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = \ln A$, а в таблице 3 также параметры линейной зависимости:

$$\ln \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = C + B \text{Int}, \quad (8)$$

где В и С вычислялись по методу наименьших квадратов:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n \ln \frac{\varepsilon_{ti} - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \sum_{i=1}^n \ln t_i \sum_{i=1}^n \left[\ln t_i \ln \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right]}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left[\sum_{i=1}^n (\ln t_i) \right]^2}, \quad (9)$$

$$B = \frac{n \sum_{i=1}^n \left[\ln t_i \ln \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \right] - \sum_{i=1}^n \ln t_i \sum_{i=1}^n \ln \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_0}{\varepsilon_0}}{n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left[\sum_{i=1}^n (\ln t_i) \right]^2}; \quad (10)$$

В таблице 2 приводятся значения параметров ядра ползучести и коэффициенты корреляции для всех 7 ступеней приложенных нагрузок, которые составили от 0,729 до 0,990. Таким образом, зависимости получились очень тесными, об этом же свидетельствует низкая погрешность определения расчетных показателей деформаций ползучести от их экспериментальных значений. Эта погрешность колеблется в пределах от 0,1% до 7%(таблица1).

Таблица 2.- Значения параметров уравнения связи и параметров ядра ползучести глинистых грунтов

№пп	σ,МПа	В	С	α	δ	R
1	2	3	4	5	6	7
1	0.025	0,233	0,3213	0,767	0,3213	0,729
2	0.05	0,363	-0,512	0,637	0,2175	0,982
3	0.10	0,427	-0,506	0,573	0,2574	0,978
4	0.15	0,396	-1,385	0,604	0,0991	0,990
5	0.20	0,486	-1,748	0,514	0,0846	0,990
6	0.25	0,617	-2,889	0,383	0,0343	0,965
7	0.30	0,513	-3,039	0,487	0,0246	0,949

Следовательно, для описания кривых ползучести глинистых грунтов при одномерном уплотнении при нагрузках, не превышающих

0,5-0,7 от разрушающих, можно применять теоретический аппарат ползучести линейно-наследственных сред со степенным ядром Абеля.

Зная параметры ядра ползучести, по формуле (3) легко вычислить функцию ползучести $\Phi(t)$, значения которой приведены в таблице 3.

Таблица 3.- Значения функций ползучести $\Phi(t)$ глинистых грунтов
при разных уровнях нагрузки

т, сут	0,025 МПа	0,05 МПа	0,1 МПа	0,15 МПа	0,2 МПа	0,25 МПа	0,3 МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
0,041	0,655	0,188	0,154	0,071	0,037	0,008	0,009
0,083	0,772	0,243	0,208	0,093	0,052	0,012	0,013
0,125	0,849	0,282	0,248	0,110	0,063	0,015	0,017
0,167	0,909	0,313	0,281	0,123	0,073	0,018	0,019
0,208	0,956	0,339	0,308	0,134	0,081	0,021	0,021
0,292	1,035	0,383	0,356	0,154	0,096	0,026	0,025
1	1,379	0,599	0,603	0,250	0,174	0,056	0,048
2	1,621	0,771	0,810	0,329	0,244	0,085	0,068
3	1,781	0,893	0,964	0,387	0,297	0,109	0,084
4	1,905	0,991	1,090	0,433	0,341	0,131	0,098
5	2,006	1,075	1,199	0,473	0,381	0,150	0,109
6	2,093	1,148	1,296	0,509	0,416	0,168	0,120
7	2,170	1,214	1,384	0,541	0,448	0,185	0,130

По данным таблицы 3 построен сводный график функций ползучести (рис.3).

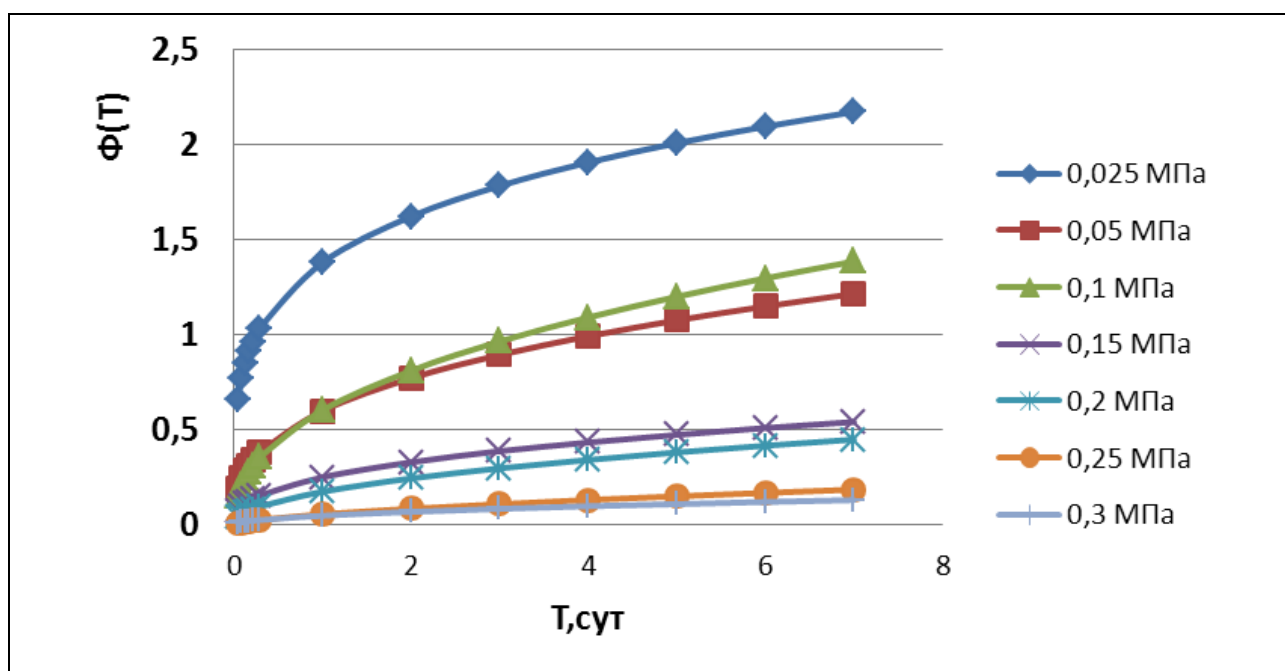


Рис. 3. Графики функций ползучести глинистого грунта при различных уровнях напряжений (0,05-0,3)МПа

Анализируя графики функций ползучести, можно отметить их плавный характер, при этом кривые располагаются одна под другой, не пересекаясь.

По мере роста уплотняющих нагрузок скорость деформаций ползучести замедляется, что наглядно видно из графика: чем меньше прикладываемая нагрузка, тем выше располагается соответствующая кривая.

Имея такое семейство кривых функции ползучести для другого типа грунта, можно определять временные операторы интегрального уравнения Вольтерра второго рода - длительный модуль деформации $E(t)$ и коэффициент Пуассона $\mu(t)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.М.Линьков и Б.З.Амусин. Об использовании переменных модулей для решения одного класса задач линейно-наследственной

ползучести. Известия АН СССР, Механика твердого тела, 1974, №6. с 162-166.

2. Н.Н.Карелин и Б.З.Амусин. Корреляционные зависимости реологических свойств основных углевмещающих пород и угля от модуля упругости. //Устойчивость и крепление горных выработок. Межвузовский сборник. Выпуск 3, 1978.-с 78-82.
3. С.В.Анциферов. Расчет обделок параллельных круговых тоннелей мелкого заложения, сооружаемых с применением укрепительной цементации.// Неделя горняка-2002,семинар №13.