

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДИССИПАТИВНЫЕ СВОЙСТВА
ГРУНТОВ**

Петросян Т. Л.

Ключевые слова: гистерезис, диссипация, ползучесть, периодическое нагружение

Influence of temperature on the dissipative properties of soils

Petrosjan T. L.

Keywords: hysteresis, dissipation, creep, periodic loading

In order to study the effect of temperature changes on the dissipative properties of soils, a certain temperature function is introduced under the integral sign in the equation of the theory of heredity and at the same time takes into account the dependence of the elastic modulus on temperature. As a result, on the basis of experimental data on the thermal creep of soils, an expression was obtained for determining the hysteresis energy losses with periodic voltage changes depending on the temperature change.

Ջերմաստիճանի ազդեցությունը գրունտների դիսիպատիվ հատկությունների վրա

Պետրոսյան Տ. Լ.

Նիւնարաւեր. հիստերեզիս, ցրում, սողք, պարբերական բեռնավորում

Գրունտների դիսիպատիվ հատկությունների ջերմաստիճանից կախվածության ուսումնասիրման նպատակով սողքի ժառանգականության փեսության հավասարման մեջ ինտեգրալի նշանի տակ ներգրված է որոշակի ջերմաստիճանային ֆունկցիա և միաժամանակ հաշվի է առնված առաձգականության մոդուլի կախվածությունը ջերմաստիճանից: Արդյունքում գրունտների ջերմաստիճանի փոփոխության փոփոխական փոփոխության հիման վրա ստացված է պարբերական բեռնավորման ժամանակ, կախված ջերմաստիճանից, հիստերեզիսային էներգետիկ կորուստների որոշման համար արտահայտություն:

В работе с целью исследования влияния изменений температуры на диссипативные свойства грунтов под знак интеграла в уравнении теории наследственности вводится некоторая функция температуры и одновременно учитывается зависимость модуля упругости от температуры. В результате чего на основе экспериментальных данных о термползучести грунтов получено выражение для определения гистерезисных энергетических потерь при периодических изменениях напряжения в зависимости от изменения температуры.

Введение

Во многих работах ([1 - 4] и др.) при исследовании рассеяния механической энергии и затухания собственных колебаний делается попытка найти связь между рассеянием энергии и параметрами характеристик материала. В работе [5] показано, что рассеяние энергии от цикла к циклу существенно изменяется, а параметры нагружения сильно влияют на величину коэффициента поглощения. В работе [6] на основе данных о ползучести грунта при использовании теории старения и теории наследственности построены петли гистерезиса в сравнении с экспериментальными данными при малоцикловой ползучести, и на примере грунтов показано, что теория наследственности, в общем, может быть рекомендована для описания поглощения энергии. В работе [7] дан анализ зависимости коэффициента поглощения от периода циклических нагружений, степени асимметрии цикла и от номера цикла для материала, деформирующегося согласно линейной теории наследственности. В рассмотренных работах не учитываются условия (температура, влажность, старение и др.), воздействие которых приводит к изменению деформационных и диссипативных свойств материалов.

При проектировании и расчёте конструкций, элементы которых представляют собой материалы с ярко выраженными реологическими свойствами (ползучесть, релаксация напряжений, диссипация), часто возникает необходимость знания о влиянии вышеуказанных условий на поведение материалов.

Можно отметить ряд работ [8, 9, 10], посвящённых экспериментальному исследованию влияния температуры на прочностные и диссипативные свойства металлов, сплавов и полимерных материалов. В них получено, что повышение температуры металлов и сплавов приводит к увеличению коэффициента поглощения, причём, при высоких температурах наблюдаются пики коэффициента Ψ , которые соответствуют различным температурам для разных металлов. В работе [10] исследовались втулки из полиуретана, выполненные из трёх химических систем, в диапазоне температур от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Из диаграмм $K = f(T)$ видно, что все исследуемые типы нестабильны по коэффициенту потерь во всем диапазоне температур.

Влияние изменения температуры на поведение материалов обычно исследуют с помощью температурно-временной аналогии [12, 13, 14, 15]. Принцип температурно-временной аналогии состоит в том, что в уравнение состояния вводится приведённое время, которое приводит лишь к изменению масштаба времени, вследствие чего можно рассматривать термореологические тождественные процессы. Анализ вышеприведённых работ показывает, что при исследовании влияния температуры на деформационные свойства материалов с помощью наследственной теории вязкоупругой среды, подобный подход часто оказывается неудобным, поскольку для неизотермических процессов вычисления весьма затруднительны, а для нелинейных процессов фактор температурного сдвига зависит как от температуры, так и от напряжения [12, 13]. Это приводит к введению в определяющие уравнения большого числа неизвестных параметров.

В работе [16] предлагается иной подход к исследованию деформаций наследственных вязкоупругих сред при разных температурах. В определяющее уравнение, предложенное в [17], вводится некоторая функция $f(T)$, после чего уравнение

записывается в виде

$$\phi(\varepsilon) = \sigma(t) + \int_0^t K(t - \tau)\sigma(\tau)f[T(t), T(\tau)]d\tau$$

где $\phi(\varepsilon)$ – уравнение кривой мгновенного деформирования.

Согласно данным, приведённым в [16], поведение материала зависит лишь от температуры в данный момент времени. Поэтому, далее функция $f[T(\tau)]$ в уравнении не рассматривается.

Постановка задачи

Целью данной работы является исследование влияния изменений температуры на диссипативные свойства грунтов. Для этого в уравнении теории наследственности под знак интеграла введём некоторую функцию температуры $F[\theta(t)]$ (по аналогии с работой [16]), одновременно учитывая зависимость модуля упругости E от температуры θ [18]. В итоге, основываясь на экспериментальных данных о термоползучести грунтов, должны получить выражение для определения гистерезисных энергетических потерь при периодических изменениях напряжения в зависимости от изменения температуры.

1 Решение

Пусть деформация ползучести при напряжении $\sigma = 1$ (мера ползучести) описывается формулой [19]

$$C(t) = C_0(1 - e^{-\alpha t}) + \nu t, \quad (1.1)$$

где C_0 , α и ν – параметры ползучести.

Для описания деформаций при переменных напряжениях $\sigma(t)$, согласно теории наследственности с учётом изменения температуры будем иметь [16,18]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(\theta)} + \int_0^t F[\theta(t)]\sigma(\tau)[C_0\alpha e^{-\alpha(t-\tau)} + \nu]d\tau, \quad (1.2)$$

где $E(\theta)$ – функция зависимости модуля упругости от температуры, $F(\theta)$ – функция температуры.

Виды функций $E(\theta)$ и $F(\theta)$, которые использовались в настоящей работе, представлены в работе [20], в которой они были получены при различных фиксированных температурах для глинистых грунтов в рамках исследований мгновенной компрессионной деформации и их модулей и компрессионной термоползучести:

$$E(\theta) = E_0 - \beta\theta, \quad (1.3)$$

$$F(\theta) = \theta^m. \quad (1.4)$$

Соотношение (1.3) получено путём аппроксимации экспериментальной кривой, приведённой в работе [20] (рис.4.1б, стр. 108).

Рассмотрим действие циклического нагружения

$$\sigma(t) = \sigma_0[\sin(\omega t + \phi_0) + \lambda], \quad (1.5)$$

где ω – циклическая частота, ϕ_0 – начальная фаза, λ – постоянная, определяющая степень асимметрии циклического нагружения.

Для определения площади петли гистерезиса, представляющей собой энергию $\Delta W(n)$, рассеянную за один цикл, используется формула [4]

$$\Delta W(n, \theta) = \int_{T_n}^{T(n+1)} \sigma(t) \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} dt, \quad (1.6)$$

где $T = \frac{2\pi}{\omega}$ – период цикла, n – номер цикла.

Для определения полной механической энергии $W(n)$, затраченной за один цикл деформирования, используем формулу [6,7]

$$W(n, \theta) = \int_{T_n}^{T(n+\frac{1}{2})} \sigma(t) \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} dt. \quad (1.7)$$

Коэффициент поглощения $\psi(n, \theta)$ определяется [3]

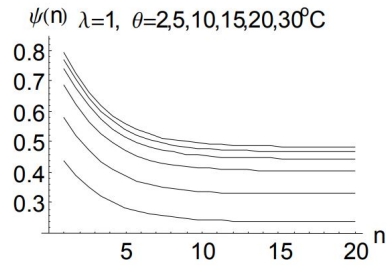
$$\psi(n, \theta) = \frac{\Delta W(n, \theta)}{W(n, \theta)}. \quad (1.8)$$

Используя (1.2), (1.5) и (1.8), согласно теории наследственности, после ряда преобразований получим выражение для $\psi(n, \theta)$ в изотермических условиях при разной температуре:

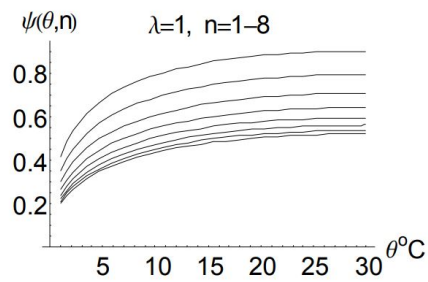
$$\begin{aligned} \psi(n, \theta) = & \theta^m \{ C_0 e^{-\alpha T n} (1 - e^{-\alpha T}) [\frac{\alpha^2}{(\alpha^2 + \omega^2)^2} (\alpha^2 \sin^2 \varphi_0 - \omega^2 \cos^2 \varphi_0) + \\ & + \frac{2\lambda \alpha^2 \sin \varphi_0}{\alpha^2 + \omega^2} + \lambda^2] + \frac{C_0 \pi \omega \alpha}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\pi \nu (1 + \lambda^2)}{\omega} \} / \\ & / \{ \theta^m C_0 e^{-\alpha T n} (\frac{\alpha^2 \sin \varphi_0 - \alpha \omega \cos \varphi_0}{\alpha^2 + \omega^2} + \lambda) [\frac{\alpha^2 \sin \varphi_0 + \alpha \omega \cos \varphi_0}{\alpha^2 + \omega^2} \\ & (1 + e^{-\alpha T/2}) + \lambda (1 - e^{-\alpha T/2})] - \frac{2\theta^m C_0 \lambda}{\alpha^2 + \omega^2} (\alpha^2 \sin \varphi_0 - \alpha \omega \cos \varphi_0) + \\ & + \frac{\theta^m C_0 \alpha \omega \pi}{2(\alpha^2 + \omega^2)} + \frac{\nu \theta^m}{\omega} (\frac{\pi}{2} + \lambda^2 \pi + 4\lambda \cos \varphi_0) - \frac{2\lambda \sin \varphi_0}{E_0 - \beta \theta} \} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Ниже рассматривается графическое представление зависимости коэффициента поглощения ψ от ряда характеристик согласно формуле (1.9) в условиях, когда $\phi_0 = -\pi/2$, $\nu = 0$, при следующих данных, полученных для глины [6,7], $E_0 = 21.5$

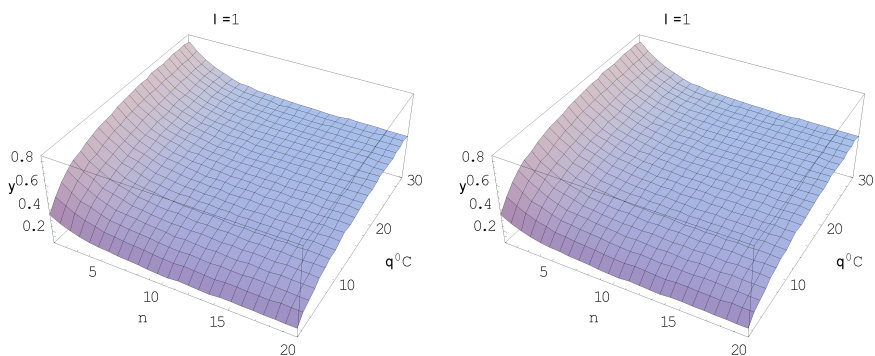
МПа, $\alpha = 0.8 \frac{1}{\text{сут}}$ $C_0 = 0.00955$ и $m = 0.45$.



Фиг. 1: Кривые зависимости $\psi(n, \theta)$ от n при разных температурах θ ($\lambda = 1$)



Фиг. 2: Графики зависимости коэффициента поглощения ψ от температуры θ , при разных циклах нагружения



Фиг. 3: Поверхности в координатах $\psi - n - \theta$ при разных значениях степени асимметрии λ

На Фиг. 1 в качестве примера приведены графики зависимости коэффициента диссипации ψ от номера цикла n в изотермических условиях при разных температурах, построенные по формуле (1.9) (при $\lambda = 1$).

На Фиг. 2 приведены графики зависимости коэффициента диссипации ψ от температуры θ для разных циклов нагрузки-разгрузки.

На Фиг. 3 приведены поверхности, описывающие зависимость коэффициента ψ от номера цикла n и температуры θ при разных значениях степени асимметрии λ .

Заключение

Как можно заключить из данных, приведённых на фиг. 2 и 3, коэффициент диссипации у глинистого грунта с возрастанием температуры растёт, а чем выше номер цикла нагружения, тем ниже коэффициент диссипации.

Литература

- [1] Гурев А.В., Мирошников Э.В. О форме механического гистерезиса и влияние предварительной пластической деформации на рассеяние энергии. Киев: Наукова думка, 1974, с.203-209.
- [2] Мицкевич З.А. Исследование внутреннего поглощения в металлах. Изв. высших учебных заведений. М.: Машиностроение, 1961, №6, с.749-756.
- [3] Давиденков Н.Н. О рассеянии при вибрациях, ЖТФ АН СССР, 1938, т.8, вып.6, с.483-496.
- [4] Шилькрут Д.И. Единая реологическая гипотеза для описания совместного влияния гистерезиса и наследственных явлений на колебательные процессы в не вполне упругих системах. Киев: Изд-во АН УССР, 1963, с.93-109.
- [5] Петросян Т.Л. Экспериментальное исследование влияния степени асимметрии цикла на формы и площади петли гистерезиса водонасыщенных глинистых грунтов при компрессии. Изв. НАН Армении, Науки о Земле, 1993. Т.46, № 2, с. 60-63.
- [6] Петросян Т.Л. Симонян А.М. Исследование гистерезиса при малоцикловой ползучести. Изв. НАН Армении, Механика. 2007. Т.60. №2. С.114-121.
- [7] Симонян А.М. Петросян Т.Л. Исследование гистерезисных энергетических потерь в зависимости от характеристик периодического нагружения на базе теории наследственности. Изв. НАН Армении. Механика. 2011. Т. 64. №2. С.73-77.
- [8] Постников В.С. Температурная зависимость внутреннего трения чистых металлов и сплавов. Успехи физических наук АН СССР. 1958. Т.46, вып.1, с.43-78.

- [9] Шаповал Б.И. О внутреннем трении металлов при высоких температурах. Физика металлов и металловедение. 1964. Т. 18. Вып. 2, с.306-308.
- [10] Славиков С.В. Совершенствование экспериментального метода исследования диссипативных и прочностных свойств полиуретана. Вестник ПНИПУ. 2013. № 2. С.145-153.
- [11] Ферри Дж. Вязкоупругие свойства материалов. Изд. Иностранной литературы. М.: 1963. 535 с.
- [12] Максимов Р.Д., Даугсте Ч.Л., Соколов Е.А. Особенности соблюдения температурно-временной аналогии при физически нелинейной ползучести полимерного материала. Механика полимеров. 1974. № 3. С.415-426.
- [13] Даугсте Ч.А. Совместное применение температурно-временной и напряжённо-временной аналогии для построения обобщённых кривых. Механика полимеров. 1974. №3. С.427-431.
- [14] Колтунов М.А., Трояновский И.Е. Условия существования температурно-временной аналогии. Механика полимеров. 1970. № 2. С.217-222.
- [15] Ильясов М.Х. Нестационарные вязкоупругие волны. Баку: 2011. 230 с.
- [16] Суворова Ю. В. Учёт температуры в наследственной теории упруго-пластических сред. Проблемы прочности. 1977. №2. С.43-48.
- [17] Работнов Ю.Н., Суворова Ю.В. О законе деформирования металлов при одноосном нагружении. МТТ. 1972. №4. С.41-54.
- [18] Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твёрдых тел. М.: Наука, 1977. 384 с.
- [19] Гарофало Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов. М.: 1968. 304 с.
- [20] Месчан С.Р. Реологические процессы в глинистых глинтах (с учётом особых воздействий). Ереван: Изд-во Айастан, 1992. 296 с.

Сведения об авторе

Петросян Тигран Людвигович - к.т.н., научный сотрудник Института механики НАН Армении.

Тел. (+374 99) 16 50 38 **email:** tlpetrosyan@mail.ru

Поступила в редакцию 09.12.2020.