ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ

Մեխանիկա 60, №2, 2007 Механика

УДК 539.376

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Петросян Т. Л., Симонян А. М.

Ключевые слова: ползучесть, гистерезис
Key words: creep, histeresis

Տ. Լ. Պետրոսյան, Ա. Մ. Սիմոնյան
Հիստերեզիսի ուսումնասիրությունը ցիկլիկ սողքի դեպքում

Ծերացման և ժառանգականության տեսությունների հիման վրա ուսումնասիրվում է էներգիայի դիսիպացիան և մարման գործակիցը ցիկլիկ բեռնավորումների ժամանակ: Տեսական տվյալները համեմատվում են երեք տարբեր տիպի գետնահողերի համար ստացված էքսպերիմենտալ տվյալների հետ: Ցույց է տրվում, որ գետնահողերի ցիկլիկ սողքը նկարագրելու համար պիտանի է ժառանգականության տեսությունը:

T. L. Petrosyan, A. M. Simonyan
Investigation of Histeresys at Scarcely Cycle Creep

On the base the theory of aging and the theory of heredity the dissipation energy and the coefficient of absorption at repeated loading are investigated. The theoretical results are compared with experimental ones, which are obtained for three kind of clay soils. It is obtained that the theory of heredity is acceptable for the description of creep at cicle loading of soils.

На основании теории старения и теории наследственности исследуется энергия диссипации и коэффициент поглощения при многократном нагружении. Теоретические данные сравниваются с экспериментальными данными, полученными для трех видов глинистых грунтов. Показано, что для описания малоцикловой ползучести грунтов теория наследственности является приемлемой.

Как известно, при многократных нагружениях материала имеет место явление гистерезиса, определяемое рассеянием энергии. Изучению явления гистерезиса посвящено необозримое количество работ ([1-6] и др.). Механизмы, порождающие гистерезис, чрезвычайно разнообразны для различных материалов и условий испытания, хотя во всяком случае они определяются реологическими процессами. В большинстве работ ([7-12] и др.) аналитическое описание деформаций осуществляется эмпирическим путем, ограничивающим общность результатов. При описании ползучести при многоступенчатом изменении напряжений многие классические теории требуют коррекции. Например, в работе [13] указана непригодность принципа наложения для описания ползучести бетона. В работе [14] разработана теория ползучести, описывающая ускоренную ползучесть при циклических воздействиях в условиях двухстадийной ползучести. В работе [15] для описания циклической ползучести рассмотрены соотношения, построенные на основе теории наследственности в весьма усложненном варианте. В работах ([16-18] и др.) рассматриваются аналитические эмпирические зависимости для описания формы гистерезисной петли и расчета логарифмического декремента затухания колебаний. В работе [19] приведены соотношения для расчета изменения напряжения при задании гармонических колебаний (жесткое нагружение) для различных моделей ползучести.

В настоящей работе на основе данных о ползучести материала при использовании теории старения и теории наследственности построены петли гистерезиса в сравнении с экспериментальными данными для того же материала при малоцикловой ползучести и на примере грунтов показано, что теория наследственности может быть рекомендована для непосредственного описания деформационных процессов при циклических воздействиях.

1. Пусть деформации материала при постоянных напряжениях σ описываются формулой Мак-Ветти-Гарофало

$$\varepsilon(t)=\left[\frac{1}{\mathrm{E}}+C\left(1-e^{-\alpha t}\right)+vt\right]\sigma \tag{1.1}$$

где $\mathrm{E}-$ модуль упругости, а C,α и $v-$ параметры ползучести.

Для описания деформаций при переменных напряжениях $\sigma(t)$, согласно теории старения и теории наследственности [20, 21], будем иметь, соответственно,

$$\varepsilon(t)=\left[\frac{1}{\mathrm{E}}+C\left(1-e^{-\alpha t}\right)+vt\right]\sigma(t) \tag{1.2}$$

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma(t)}{\mathrm{E}}+\int_0^t \sigma(\tau)\left[C\alpha e^{-\alpha(t-\tau)}+v\right]d\tau \tag{1.3}$$

Рассмотрим действие циклического нагружения

$$\sigma(t)=\sigma_0\left[\sin(\omega t+\varphi_0)+\lambda\right] \tag{1.4}$$

где ω и $\lambda-$ некоторые постоянные.

Для определения площади гистерезиса $\Delta W(t)$ используется формула [6]

$$\Delta W(n)=\int_{t_n}^{t_n+T}\sigma(t)\frac{\partial\varepsilon(t)}{\partial t}dt \tag{1.5}$$

где $T-$ период цикла, определяемый формулой

$$T=2\pi/\omega \tag{1.6}$$

а $t_n=nT$ ($n-$ номер цикла).

Формула (1.5), естественно, не предусматривает замкнутости кривой гистерезиса и при $\varphi=-\pi/2$ фактически описывает площадь между кривыми нагружения, разгрузки и осью t.

При использовании (1.2), (1.4)-(1.6) для площади гистерезиса, согласно теории старения, будем иметь

$$\Delta W(n)=\frac{C\left(1-e^{-\alpha T}\right)\sigma_0^2}{e^{\alpha nT}}\left\{\frac{1}{\alpha^2+4\omega^2}\left[\frac{\alpha\omega}{2}\sin 2\varphi_0-\left(\frac{\alpha^2}{2}+\omega^2\right)\cos 2\varphi_0\right]+\right.$$

$$+\frac{\lambda}{\alpha^2+\omega^2}\left[\alpha\omega\cos\varphi_0+\left(2\alpha^2+\omega^2\right)\sin\varphi_0\right]+\frac{1}{2}+\lambda^2\Bigg\}+$$
$$+\frac{\nu\pi\sigma_0^2}{\omega}\left(1+2\lambda^2+2\lambda\sin\varphi_0-\frac{1}{2}\cos 2\varphi_0\right) \tag{1.7}$$

Используя (1.3)-(1.6), получим следующее выражение для площади гистерезиса, согласно теории наследственности:

$$\Delta W(n)=\sigma_0^2\left\{\frac{C\left(1-e^{-\alpha T}\right)}{e^{\alpha nT}}\left[\frac{\alpha^2}{\left(\alpha^2+\omega^2\right)^2}\left(\alpha^2\sin^2\varphi_0-\omega^2\cos^2\varphi_0\right)+\right.\right.$$
$$\left.\left.+\frac{2\lambda\alpha^2}{\alpha^2+\omega^2}\sin\varphi_0+\lambda^2\right]+\frac{C\pi\omega\alpha}{\alpha^2+\omega^2}+\frac{\pi\nu\left(1+2\lambda^2\right)}{\omega}\right\} \tag{1.8}$$

Из рассмотрения (1.7) и (1.8) можно заключить, что в случае отсутствия второй стадии ползучести $(\nu=0)$, согласно теории старения, площадь гистерезиса с увеличением количества циклов n устремляется к нулю, в то время, как, согласно теории наследственности, она устремляется к значению $\frac{\sigma_0^2\pi\omega\alpha C}{\alpha^2+\omega^2}$. Отметим также и тот факт, что в случае установившейся ползучести ($C=0$, $\nu\neq 0$) теория старения и теория наследственности определяют, вообще говоря, различные результаты в обоих случаях, не зависящие от номера цикла n, однако программа нагружения может быть выбрана такой $\left(\lambda=\frac{\cos 2\varphi_0}{4\sin\varphi_0}\right)$, что предсказания о площади гистерезиса по обеим теориям совпадут независимо от частоты ω. Например, в случае нагружения, чередующегося с полной разгрузкой $(\lambda=1)$, обе теории дают совпадающие предсказания по этим теориям в случае, если начальная фаза $\varphi_0=\arcsin\left(\sqrt{3/2}-1\right)$.

Ниже рассмотрим определение коэффициента поглощения $\Psi(n)$ в форме [22]:

$$\Psi(n)=\frac{\Delta W(n)}{W(n)} \tag{1.9}$$

где $\Delta W(n)-$ площадь петли гистерезиса, а $W(n)-$работа в процессе нагружения, определяемая так: $W(n)=\int\limits_{t_n}^{t_n+\frac{T}{2}}\sigma(t)\frac{\partial\varepsilon(t)}{\partial t}dt$ (1.10)

Для расчета $W(n)$, согласно теории старения, при использовании (1.2) и (1.4) получим формулу

$$W(n)=\sigma_0^2\left\{\frac{C\left(1-e^{-\frac{\alpha T}{2}}\right)}{e^{\alpha nT}\left(\alpha^2+4\omega^2\right)}\left[-\left(\frac{\alpha^2}{2}+\omega^2\right)\cos 2\varphi_0+\frac{\alpha\omega}{2}\sin 2\varphi_0\right]+\right.$$

$$+\frac{\left(1+e^{-\frac{\alpha T}{2}}\right)\lambda C}{e^{\alpha nT}\left(\alpha^2+\omega^2\right)}\left[\left(2\alpha^2+\omega^2\right)\sin\varphi_0+\alpha\omega\cos\varphi_0\right]+\frac{\left(1-e^{-\frac{\alpha T}{2}}\right)C}{e^{\alpha nT}}\left(\frac{1}{2}+\lambda^2\right)-$$

$$-2\lambda\sin\varphi_0\left(\frac{1}{\mathrm{E}}+C\right)+v\left[\frac{2\lambda}{\omega}\cos\varphi_0-\lambda\left(2nT+\frac{\pi}{\omega}\right)\sin\varphi_0-\right.$$

$$\left.\left.-\frac{\pi}{4\omega}\cos 2\varphi_0+\frac{\pi}{\omega}\left(\frac{1}{2}+\lambda^2\right)\right]\right\} \tag{1.11}$$

Аналогично, для расчета $W(n)$, согласно теории наследственности, при использовании (1.3) и (1.4) получим формулу

$$W(n)=\sigma_0^2\left\{\frac{C\left(1+e^{-\alpha T/2}\right)}{e^{\alpha nT}\left(\alpha^2+\omega^2\right)}\left[\lambda\alpha+\frac{\alpha^2\left(\alpha\sin\varphi_0-\omega\cos\varphi_0\right)}{\alpha^2+\omega^2}\right]\left(\alpha\sin\varphi_0+\omega\cos\varphi_0\right)+\right.$$

$$+\frac{2\lambda\alpha C}{\alpha^2+\omega^2}\left(\omega\cos\varphi_0-\alpha\sin\varphi_0\right)+\frac{C\omega\alpha\pi}{2\left(\alpha^2+\omega^2\right)}+\frac{C\lambda\left(1-e^{-\alpha T/2}\right)}{e^{\alpha nT}}\left[\lambda+\sin\varphi_0-\right.$$

$$\left.\left.-\frac{\omega}{\alpha^2+\omega^2}\left(\alpha\cos\varphi_0+\omega\sin\varphi_0\right)\right]+\frac{v}{\omega}\left(\frac{\pi}{2}+\lambda^2\pi+4\lambda\cos\varphi_0\right)-\frac{2\lambda}{E}\sin\varphi_0\right\} \tag{1.12}$$

В случае циклического нагружения от нуля до $2\sigma_0$ (фиг. 1) в формуле (1.4) будем иметь $\lambda=1$, $\varphi_0=-\pi/2$. При этом, используя формулы (1.7), (1.8), (1.11) и (1.12), получим для теории старения

$$\Delta W(n)=\sigma_0^2\left\{C\left(1-e^{-\alpha T}\right)e^{-\alpha nT}\left[\frac{\alpha^2+2\omega^2}{2\left(\alpha^2+4\omega^2\right)}-\frac{2\alpha^2+\omega^2}{\alpha^2+\omega^2}+\frac{3}{2}\right]+\frac{3vT}{4}\right\} \tag{1.13}$$

$$W(n)=\sigma_0^2\left\{C\left[\left(1-e^{-\alpha T/2}\right)e^{-\alpha Tn}\frac{2\alpha^2+7\omega^2}{\alpha^2+4\omega^2}-\left(1+e^{-\alpha T/2}\right)e^{-\alpha Tn}\frac{2\alpha^2+\omega^2}{\alpha^2+\omega^2}+2\right]+\right.$$

$$\left.+\frac{2}{\mathrm{E}}+vT\left(2n+\frac{11}{8}\right)\right\} \tag{1.14}$$

а для теории наследственности –

$$\Delta W(n)=\sigma_0^2\left\{\frac{C}{\alpha^2+\omega^2}\left[\frac{\left(1-e^{-\alpha T}\right)\omega^4}{e^{\alpha nT}\left(\alpha^2+\omega^2\right)}+\pi\omega\alpha\right]+\frac{3\pi v}{\omega}\right\} \tag{1.15}$$

$$W(n)=\sigma_0^2\left\{C\left[\frac{\alpha(4\alpha+\omega\pi)}{2\left(\alpha^2+\omega^2\right)}+\frac{\omega^2\left(1-e^{-\frac{\alpha T}{2}}\right)}{\left(\alpha^2+\omega^2\right)e^{\alpha nT}}-\frac{\alpha^2\omega^2\left(1+e^{-\frac{\alpha T}{2}}\right)}{\left(\alpha^2+\omega^2\right)^2 e^{\alpha nT}}\right]+\frac{3\nu\pi}{2\omega}+\frac{2}{\mathrm{E}}\right\} \quad (1.16)$$

2. Пусть деформации материала при постоянных напряжениях σ описываются формулой

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma}{\mathrm{E}}+\left[C\left(1-e^{-\alpha t}\right)+\nu t\right]\sigma^m \quad (2.1)$$

где m – параметр, определяющий нелинейные свойства материала при ползучести. При m=1 формулы (2.1) и (1.1) совпадают.

Для описания деформаций при переменных напряжениях $\sigma(t)$, согласно теории старения и теории наследственности, будем иметь, соответственно,

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma(t)}{\mathrm{E}}+\left[C\left(1-e^{-\alpha t}\right)+\nu t\right]\sigma^m(t) \quad (2.2)$$

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma(t)}{\mathrm{E}}+\int_0^t \sigma^m(\tau)\left[C\alpha e^{-\alpha(t-\tau)}+\nu\right]d\tau \quad (2.3)$$

В случае действия циклического нагружения (1.4) для определения площади гистерезиса $\Delta W(n)$ на n-м витке, согласно формуле (1.5), для теории старения (2.2) получим

$$\Delta W(n)=\sigma_0^{m+1}\int_{Tn}^{T(n+1)}\left\{\left(C\alpha e^{-\alpha t}+\nu\right)\left[\sin(\omega t+\varphi_0)+\lambda\right]^{m+1}+\right.$$

$$\left.+\omega m\left[C\left(1-e^{-\alpha t}\right)+\nu t\right]\left[\sin(\omega t+\varphi_0)+\lambda\right]^m\cos(\omega t+\varphi_0)\right\}dt \quad (2.4)$$

а согласно теории наследственности (2.3) –

$$\Delta W(n)=\sigma_0^{m+1}\int_{Tn}^{T(n+1)}(C\alpha+\nu)\left[\sin(\omega t+\varphi_0)+\lambda\right]^{m+1}dt-$$

$$-C\alpha^2\sigma_0^{m+1}\int_{Tn}^{T(n+1)}\left\{\left[\sin(\omega t+\varphi_0)+\lambda\right]\int_0^t e^{-\alpha(t-\tau)}\left[\sin(\omega\tau+\varphi_0)+\lambda\right]^m d\tau\right\}dt \quad (2.5)$$

Отметим, что интегралы в выражениях (2.4) и (2.5) могут быть определены численными методами.

Для определения $W(n)$ работы в процессе нагружения (1.10), согласно теории старения будем иметь

$$W(n)=\sigma_0^{m+1}\int_{Tn}^{T\left(n+\frac{1}{2}\right)}\left\{\left(C\alpha e^{-\alpha t}+\nu\right)\left[\sin(\omega t+\varphi_0)+\lambda\right]^{m+1}+\right.$$

$$\left.+m\omega\left[C\left(1-e^{-\alpha t}\right)+\nu t\right]\left[\sin(\omega t+\varphi_0)+\lambda\right]^m\cos(\omega t+\varphi_0)\right\}dt-\frac{2\lambda\sigma_0^2}{E}\sin\varphi_0 \quad (2.6)$$

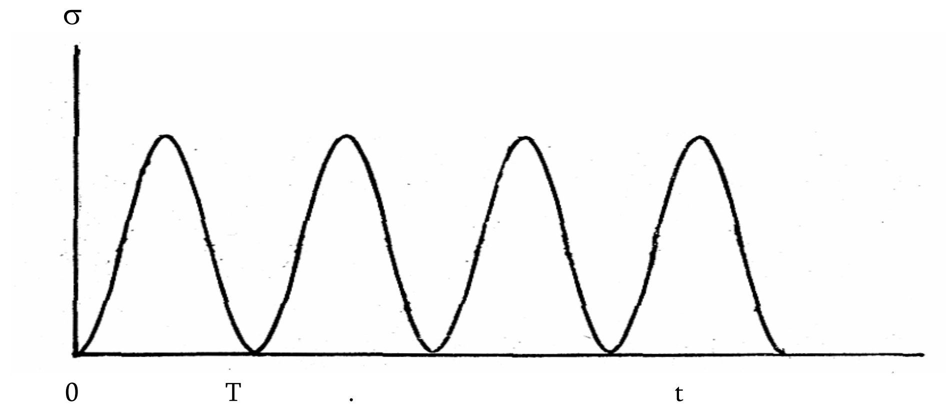
а согласно теории наследственности –

$$W(n)=\sigma_0^{m+1}\int\limits_{Tn}^{T\left(n+\frac{1}{2}\right)}(C\alpha+\nu)\left[\sin(\omega t+\varphi_0)+\lambda\right]^{m+1}dt-$$

$$-C\alpha^2\sigma_0^{m+1}\int\limits_{Tn}^{T\left(n+\frac{1}{2}\right)}\left\{\sigma_0\left[\sin(\omega t+\varphi_0)+\lambda\right]\int\limits_0^t e^{-\alpha(t-\tau)}\left[\sin(\omega\tau+\varphi_0)+\lambda\right]^m d\tau\right\}dt-$$

$$-\frac{2\lambda\sigma_0^2}{E}\sin\varphi_0 \qquad (2.7)$$

Как можно заключить из рассмотрения формул (2.4) и (2.5) или (2.6) и (2.7), в отличие от линейной ползучести, при нелинейной зависимости деформаций ползучести от действующего напряжения величина Ψ, определяемая формулой (1.9), зависит от напряжения σ_0.



Фиг. 1

3. Ниже рассматриваются результаты экспериментального исследования гистерезиса различных грунтов в условиях многократного компрессионного сжатия (фиг. 1), чередующегося с полной разгрузкой $(\lambda=1)$. Опыты, осуществленные в лаборатории Института механики по инициативе и под руководством проф. С.Р. Месчяна, для получения петли гистерезиса проводились на компрессионном приборе М2 [23] с использованием цилиндрических образцов с диаметром $d=70$ мм и с высотой $h=20$ мм. Для изготовления образцов бралась грунтовая паста с влажностью $w=0.35$, которая консолидировалась под давлением 1.0 МПа. После консолидации пасты образцы имели следующие физические параметры: плотность 2.07 г/см^3, влажность 0.218 и коэффициент пористости 0.55. После полной разгрузки и затухания деформаций декомпрессии образцы подвергались испытаниям на циклическое нагружение и разгрузку, осуществляемые по следующему режиму: изменение напряжений согласно фиг.1 приближенно осуществлялось ступенями по $0.25\sigma_a$ (σ_a-наибольшее значение напряжения при данном испытании) с выдержкой по 10 сек. на каждой ступени.

Все эксперименты проведены для 10 циклов нагружения и разгрузки.Экспериментальные данные коэффициента поглощения Ψ при σ_0 =0,15 МПа , определяемого по формуле (1.9) в сравнении с расчетными данными, полученными, согласно линейной теории старения и линейной теории наследственности при использовании соотношений (1.7), (1.11) и (1.8), (1.12), а также, согласно нелинейной теории старения и нелинейной теории наследственности при использовании соотношений (2.4), (2.6) и (2.5), (2.7), соответственно, приведены в нижеследующей табл. 1.

Расчетные данные (табл. 1) были определены на основе аппроксимации кривых ползучести согласно формулам (1.1) и (2.1) при принятии ν =0 и при значениях Е, C , α и m , приведенных в табл. 2. Отметим, что, как показано в работе [21], соответственно аппроксимации (1.1) и (2.1) при ν =0, предсказания деформаций ползучести, согласно теории упрочнения [20], совпадают с теорией наследственности.

Значения коэффициентов поглощения $\Psi(n)$. Таблица 1

		Эксперимен-тальные данные	Линейная теория старения	Линейная теория наследственности	Нелинейная теория старения	Нелинейная теория наследственности
Глина	n=2	0,523	0,0171	0,441	0.0388	0.520
	n=10	0,396	3.9(10-6	0,398	2.6(10-6	0.483
Суг-линок	n=2	0,436	0,0128	0,386	0.0225	0.433
	n=10	0,326	0,9(10-6	0,315	0.43(10-6	0.419
Супесь	n=2	0,341	0,0045	0,264	0.00697	0.402
	n=10	0,255	4,98(10-6	0,255	0.29(10-6	0.399

.402n=100,2554,98(10-60,2550.29(10-60.399 Значения механи

Вид грунтов	Глина	Суглинок	Супесь
$\tilde{N}$	0.00955	0.00826	0.00775
α сутки $^{-1}$	0.8	0.9	1.2
E МПа	21,5	16,5	10,5
m	0.362	0.421	0.470

и0.80.91.2 МПа21,516,510,50.3620.4210.470Отметим, что экспериментальные данные получены на основе усреднения десяти исп σ_0 ытанных образцов при различных значениях , та $\Psi(n)$ к ка σ_0 к не выявлено какой-либо зависимости от . Как можно заключить из представленных в табл. 1 результатов, несмотря на хорошее описание кривых ползучести при ступенчато-возрастающих напряжениях по теории старения, в случае циклического нагружения, чередующегося с полной разгрузкой, теория старения неприем $\nu = 0$ лема. Однако теория наследственности при как в нелинейном, так и в линейном варианте, описывает коэффициент поглощения довольно точно, что позволяет рекомендовать ее для описания гистерезиса.

ЛИТЕРАТУРА

Матвеев В. В. К описанию контура петли механического гистерезиса.
1. //Проблемы прочности. 1973. № 8. С. 3-9.

2. Пановко Я. Г. Об учете гистерезисных потерь в задачах прикладной теории упругих колебаний //ЖТФ. 1953. Т. 23. Вып. 3. С. 486-497
3. Пановко Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Физматгиз, 1963. 195 с.
4. Сорокин Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Госстройиздат, 1960. 130 с.
5. Шилькрут Д. И. Единая реологическая гипотеза для описания совместного влияния гистерезиса и наследственных (релаксационных) явлений на колебательные процессы в не вполне упругих системах. Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем. Киев: Изд-во АН УССР. 1963. С. 97-111.
6. Ржаницын А. Р. Теория ползучести. М.: Изд-во литературы по строительству. 1968. 418 с.
7. Шнейдерович Р. М. Прочность при статическом и переменном нагружении. М.: Машиностроение, 1968. 343 с.
8. Герберт Д. С., Армстронг Д. И. Испытание на ползучесть сплавов нимоник при изменяющихся напряжении и температуре. Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. М-Л.: Госэнергоиздат, 1960. С. 111-116.
9. Симмонс В. Ф., Кросс Х. К. Испытания различных материалов на ползучесть при постоянном и переменном нагружении. Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях.М-Л.: Госэнергтоиздат, 1960. С. 148-155.
10. Paslay P. R., Wells C. H. Uniaxial creep behavior of metals under cyclic temperature and stress or strain variations.//Trans. ASME. 1976. E 43, № 3. P. 445-449.
11. Голуб В. П. Влияние температуры на процесс циклической ползучести жаропрочных сплавов при многоцикловом нагружении. //Проблемы прочности. 1981.144. № 6. С. 17-22.
12. Демидов А. С. О восстановлении деформации ползучести стали Х18Н10Т при циклическом изменении напряжения. //Проблемы прочности. 1978. 106. № 4. С. 30-32.
13. Александровский С. В., Колесников Н. А. Нелинейная ползучесть бетона при ступенчато-изменяющихся напряжениях. //Бетон и железобетон. 1971. № 6. С. 24-27.
14. Lagneborg R. A theoretical approach to creep deformation during intermittent load. //Trans. ASME, 1971. D93. No 2. P. 205-210.
15. Шорр Б. Ф. Расчеты на нестацинонарную ползучесть. //Тепловые напряжения в элементах конструкций. 1970. В. 9. С. 165-173.
16. Давиденков Н. Н. О рассеянии энергии при вибрациях. //ЖТФ. 1938. Т. 8. Вып. 6. С. 483-499.
17. Месчян С. Р., Петросян Т. Л. Применение статического метода определения логарифмического декремента колебаний грунтов в условиях компрессии. //Изв. АН Арм.ССР. Науки о земле. 1989. № 5. С. 69-74.
18. Шилькрут Д. И. Сравнение основного реологического закона эллиптического типа с другими реологическими зависимостями, описывающими явление гизтерезиса. //Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1961. № 5. С. 52-57.

19. Шилькрут Д. И. Определение реологического закона не вполне упругого тела для периодических процессов в случае гистерезисной петли эллиптического типа. //Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. 1961. № 4. С. 141-146.
20. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
21. Симонян А. М. Некоторые вопросы ползучести. Ереван: Гитутюн, 1999. 255 с.
22. Савченко И. А. Экспериментальные исследования коэффициента поглощения грунтов. //В сб.: Динамика грунтов. М.: 1961. № 44. С. 107-111.
23. Месчян С. Р. Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. М.: Недра, 1974. 192с.

Институт механики
НАН Армении

Поступила в редакцию
11.11.2005