

4. **Грачева П.О.** Взаимодействие вагонов и железнодорожного пути. - М.: Транспорт, 1968. –207 с.
5. **Болотин В.В.** Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. –М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1971. – 255 с.
6. **Гусев А.С.** О распределении амплитуд в широкополосных случайных процессах при схематизации их по методу полных циклов // Машиноведение. - 1974. - № 1. - С. 30-50.
7. **Свешников А.А.** Прикладные методы теории случайных функций. - М.: Наука, 1968. – 460 с.
8. **Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М.** Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. - М.: Машгиз, 1963. –350 с.

ЕрАСИ

17.03.1998

Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2000. Т. LIII, № 1.

УДК 539.376:620.17

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

К.А. КАРАПЕТАН, А.М. СИМОНЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ И РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В БЕТОНЕ С УЧЕТОМ ЕГО СТАРЕНИЯ

Ծերացող բետոնի սողքի փորձնական տվյալների մոտարկման հիման վրա ստացված են լարումների թուլացման հաշվման բանաձևեր՝ ժառանգականության, հոսունության, ամրապնդման, ծերացման և կինետիկ տեսությունների համաձայն: Բացահայտված է, որ ծերացման տեսությունը մարմնի ծերացման հաշվառմամբ ամենանպատակահարմարն է լարումների թուլացման գործնական հաշվարկների համար:

На основе аппроксимации экспериментальных данных о ползучести стареющего бетона построены формулы для расчета релаксации напряжений соответственно теориям наследственности, течения, упрочнения, старения и кинетической теории. Выявлено, что теория старения с учетом старения материала оказывается наиболее приемлемой для практического расчета релаксации напряжений.

Ил.3. Табл. 1. Библиогр.: 15 назв.

On the basis of experimental data approximation on aging concrete creeping, the formulas for stress relaxation calculation are constructed according to theories of heredity, flow, hardening, aging and the kinetic theory. It is discovered that the aging theory accounting aging of the material is more acceptable for stress relaxation calculation than other ones.

Илл. 3. Table 1. Ref. 15.

Для оценки напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций, подвергнутых предварительному напряжению, необходимы данные о релаксации напряжений в бетоне. Работы,

посвященные релаксации напряжений в бетоне, основываются на различных концепциях и в основном относятся к старому (нестареющему) бетону [1-9]. В [10] анализируются данные о релаксации напряжений на базе теории наследственности с учетом возраста бетона, а в [11] - на базе теории старения стареющего бетона вследствие его карбонизации.

В настоящей работе предпринята попытка определения целесообразности и пределов применимости той или иной теории ползучести для построения релаксационных кривых на основе данных о ползучести в стареющем бетоне.

1. Экспериментальные исследования проводились на вибрированном тяжелом бетоне состава массой 1:3,19:4,23, В/Ц=0,6 с использованием кварцевого песка из карьера Кур-Араз ($\gamma_n = 1600 \text{ кг/м}^3$), базальтового щебня из карьера 6-го Норкского массива г. Еревана фракцией 5...20 мм ($\gamma_{щ} = 1305 \text{ кг/м}^3$) и портландцемента активностью 500 из Араратского цементно-шиферного завода. Испытанию были подвергнуты призматические образцы сечением 7×7 см и высотой 28 см (образцы изготавливались в вертикальном положении). Кубиковая прочность определялась на образцах размерами 10×10×10 см. Опытные образцы освобождались от форм через двое суток после их изготовления. Их хранение и испытания проводились в помещении при температуре $21 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажности $64 \pm 7\%$. Испытания осуществлялись на специальных пружинных установках. В процессе испытаний на релаксацию напряжений сбрасывание нагрузки осуществлялось каждый раз при изменении деформации образца на $0,77 \cdot 10^{-5}$ с вычетом усадочных деформаций.

2. Экспериментальные исследования ползучести бетона были осуществлены при постоянных нагрузках, составляющих 0,2 и 0,6 $R_{пр}$ ($R_{пр}$ - призматическая прочность к моменту нагружения (табл.)). На рис. 1 представлены экспериментальные данные о полных деформациях бетона во времени в зависимости от его возраста к моменту нагружения (показаны крестиками) в сравнении с построенными согласно аппроксимации [12] (сплошные линии)

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \left\{ \frac{1}{E(\tau_0)} + \varphi(\tau_0) [1 - e^{-\gamma(t-\tau_0)}] \right\} \sigma \quad (1)$$

и аппроксимации (штриховые линии)

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{\sigma}{E_0(1 - \beta e^{-\alpha \tau_0})} [1 + c(1 - e^{-\gamma(t-\tau_0)})], \quad (2)$$

где $E(\tau_0)$ и $\varphi(\tau_0)$ - экспериментальное значение модуля упругости и предельное значение меры ползучести бетона (табл.); γ - опытный параметр, равный 0,044 1/сут. Параметры аппроксимации (2) приняты следующими: $\alpha = 0,0044 \text{ 1/сут}$, $\beta = 0,807$, $E_0 = 3,23 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $c = 1,35$, $\gamma = 0,044 \text{ 1/сут}$.

Отметим, что аппроксимация (2) тождественна (1) при выполнении условий [12, 13]:

$$E(\tau)\varphi(\tau) = c, \quad E(\tau) = E_0(1 - \beta e^{-\alpha \tau}). \quad (3)$$

Возраст бетона к моменту испытания, τ_0 , сут	Кубическая прочность, R_K , МПа	Призменная прочность, $R_{ПР}$, МПа	Модуль упругости, $E(\tau_0) \cdot 10^2$, МПа	Предельное значение меры ползучести, $\varphi(\tau_0) \cdot 10^5$, МПа ⁻¹
28	16,1	11,1	118,8	1,80
90	17,5	12,2	157,6	0,94
180	18,8	13,1	196,4	0,58

Несмотря на то, что влияние возраста на ползучесть более существенно, чем на упругие свойства, обе аппроксимации (1) и (2) оказались приемлемыми для описания деформации бетона с учетом его возраста (рис. 1). Следует отметить, что при различных возрастах исследуемого бетона деформации ползучести линейно зависят от значений действующего напряжения, т.е. вплоть до уровня напряжения $0,6R_{ПР}$ в бетоне микротрещинообразование не имеет места.

3. Для описания процесса релаксации напряжений в бетоне с учетом его старения были использованы теории наследственности, упрочнения, старения, течения и кинетическая теория.

Теория наследственности. При использовании принципа наложения деформаций [12] в соответствии с (1) выражение для полных деформаций при переменном напряжении имеет вид

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{\tau_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + \varphi(\tau)(1 - e^{-\gamma(t-\tau)}) \right] d\tau. \quad (4)$$

Решая для соотношения (4) задачу релаксации напряжений, после ряда выкладок получим формулу

$$\sigma(t) = \sigma(\tau_0) \left[1 - \gamma \varphi(\tau_0) E(\tau_0) \int_{\tau_0}^t e^{\int_{\tau_0}^{\xi} \left[\frac{E'(\xi)}{E(\xi)} - \gamma - \gamma E(\xi) \varphi(\xi) \right] d\xi} d\tau \right], \quad (5)$$

использование которой для практических расчетов затруднительно.

При применении теории наследственности к аппроксимации (2) задача релаксации существенно упрощается, и вместо (5) получим следующую формулу для расчета релаксации напряжений:

$$\sigma(t) = \sigma(\tau_0) \left\{ 1 - \frac{\gamma c}{1 - \beta e^{-\alpha \tau_0}} \left[\frac{1}{\gamma(1+c)} \left(1 - e^{-\gamma(1+c)(t-\tau_0)} \right) - \frac{\beta e^{-\alpha \tau_0}}{\alpha + \gamma(1+c)} \left(1 - e^{-[\alpha + \gamma(1+c)](t-\tau_0)} \right) \right] \right\}. \quad (6)$$

Теория упрочнения. Согласно теории упрочнения [14], называемой иначе гипотезой уравнения состояния [15], между деформацией ползучести, скоростью ползучести и напряжением имеет место однозначная связь, независимо от истории нагружения:

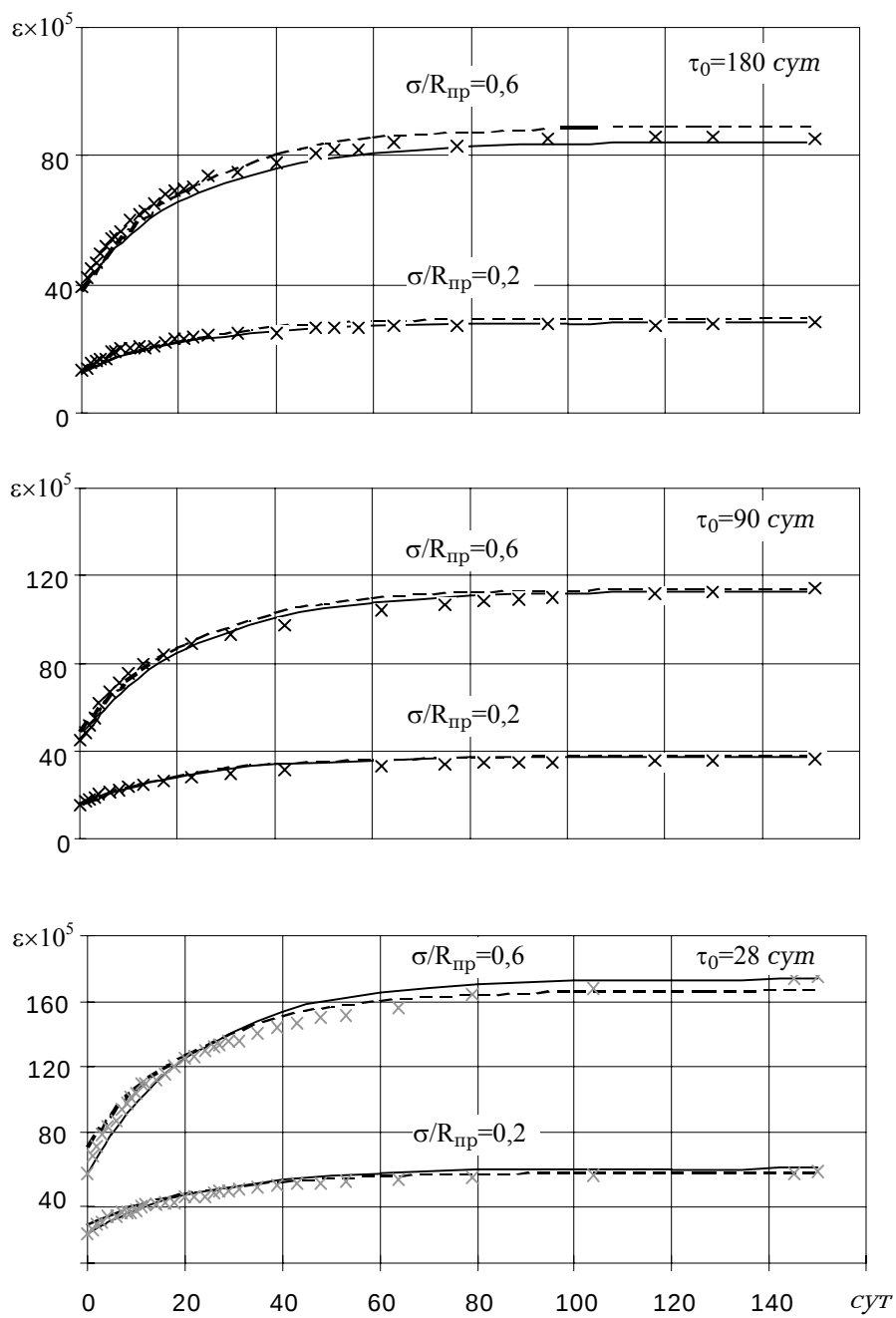


Рис.1. Кривые полных деформаций бетона во времени при постоянных напряжениях в зависимости от его возраста к моменту нагружения

$$\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial t} = \phi(\varepsilon_c, \sigma). \quad (7)$$

В применении к аппроксимации (1) уравнение (7) переписывается в виде

$$\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial t} = \gamma [\sigma(t)\varphi(\tau_0) - \varepsilon_c(t)]. \quad (8)$$

Решая задачу релаксации напряжений, при использовании (8) и очевидных соотношений

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t_0)} + \varepsilon_c(t), \quad \varepsilon(t) = \frac{\sigma(\tau_0)}{E(\tau_0)}, \quad (9)$$

согласно теории упрочнения с учетом старения материала, получим формулу для расчета релаксаций напряжений:

$$\sigma(t) = \frac{\sigma(\tau_0)}{1 + \varphi(\tau_0)E(\tau_0)} \left[1 + \varphi(\tau_0)E(\tau_0)e^{-\gamma[1 + \varphi(\tau_0)E(\tau_0)](t - \tau_0)} \right]. \quad (10)$$

Теория старения. Согласно так называемой теории старения [14] (не имеющей ничего общего со старением материала), в применении к аппроксимации (1) достаточно в ней σ заменить текущим значением $\sigma(t)$. При использовании (9), согласно теории старения с учетом старения материала, после ряда выкладок получим формулу для расчета релаксаций напряжений:

$$\sigma(t) = \frac{\sigma(\tau_0)}{1 + \varphi(\tau_0)E(\tau_0)(1 - e^{-\gamma(t - \tau_0)})}. \quad (11)$$

Теория течения. Согласно теории течения [14], в применении к аппроксимации (1) будем иметь следующее соотношение при переменном напряжении:

$$\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial t} = \sigma(t)\varphi(\tau_0)\gamma e^{-\gamma(t - \tau_0)}. \quad (12)$$

Решая задачу релаксации напряжений с учетом (12), получим

$$\sigma(t) = \sigma(\tau_0)e^{\varphi(\tau_0)E(\tau_0)(e^{-\gamma(t - \tau_0)} - 1)}. \quad (13)$$

Кинетическая теория. Согласно одному из вариантов кинетической теории [15]

$$\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial t} = \phi\left(\sigma, \int_0^{\varepsilon_c} \sigma d\varepsilon\right), \quad (14)$$

в применении к формуле (1) получим

$$\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial t} = \gamma\sigma(t)\varphi(\tau_0) \left[1 - \frac{\int_0^{\varepsilon_c} \sigma d\varepsilon}{\sigma^2(t)\varphi(\tau_0)} \right]. \quad (15)$$

Решая задачу релаксации напряжений, согласно (15), после ряда выкладок получим

$$\sigma(t) = \sigma(\tau_0) \sqrt{\frac{1 + 2\varphi(\tau_0)E(\tau_0)e^{-\gamma[1+2\varphi(\tau_0)E(\tau_0)](t-\tau_0)}}{1 + 2\varphi(\tau_0)E(\tau_0)}}. \quad (16)$$

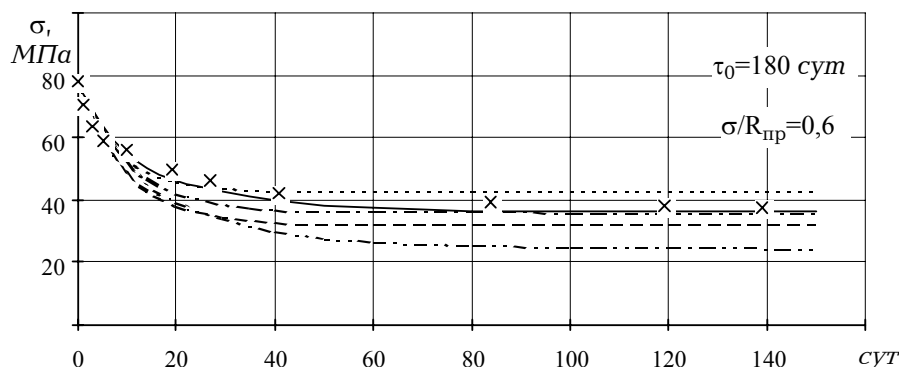


Рис.2. Иллюстрация теоретических данных о релаксации напряжений:

— — - теория наследственности (6), — · — - теория упрочнения (10), — — — - теория старения (11),
— — — - теория течения (13), · · · · - кинетическая теория (16)

На рис.2 приведены экспериментальные данные о релаксации напряжений в бетоне, нагруженном в возрасте 180 сут, при начальном напряжении $\sigma(\tau_0)=0,6R_{пр}$, в сравнении с кривыми релаксации напряжений, построенными согласно теориям наследственности, старения, упрочнения, течения и кинетической теории с учетом старения материала. Наименее удачными оказались теория течения и кинетическая теория, которые не рассматривались при описании релаксации напряжений в бетоне в остальных случаях.

На рис. 3 приведены данные о релаксации напряжений бетонных образцов, нагруженных в возрасте 28, 90 и 180 сут, при начальных напряжениях 0,2, 0,4 и 0,6 $R_{пр}$. Кривыми показаны расчетные данные согласно теориям наследственности, старения и упрочнения с учетом старения бетона.

На основе рассмотрения данных рис. 3 можно сделать вывод, что в условиях релаксации теория старения с учетом старения материала во всех случаях нагружения более точно описывает экспериментальные данные по сравнению с другими классическими теориями ползучести. Это предопределяет целесообразность использования формулы (11) для расчета релаксации напряжений в бетоне с учетом его старения на основе данных о ползучести. Отметим также, что при относительно низких начальных напряжениях, независимо от возраста бетона, результаты расчетов релаксации напряжений по теориям старения, наследственности и упрочнения практически совпадают между собой и с экспериментальными данными.

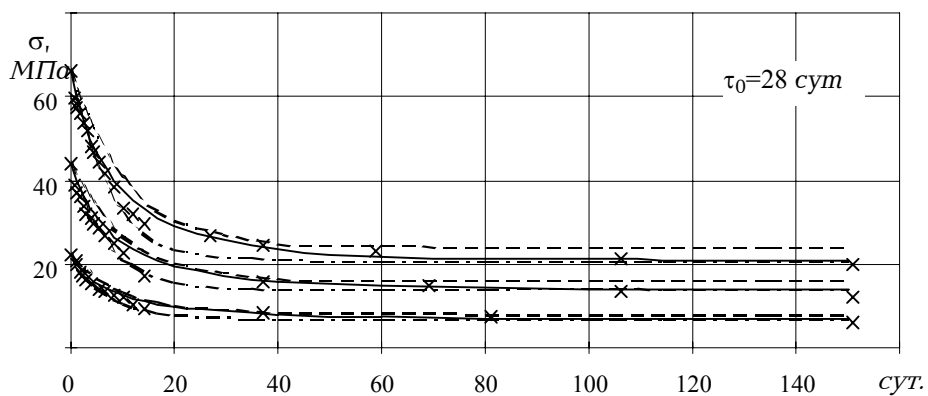
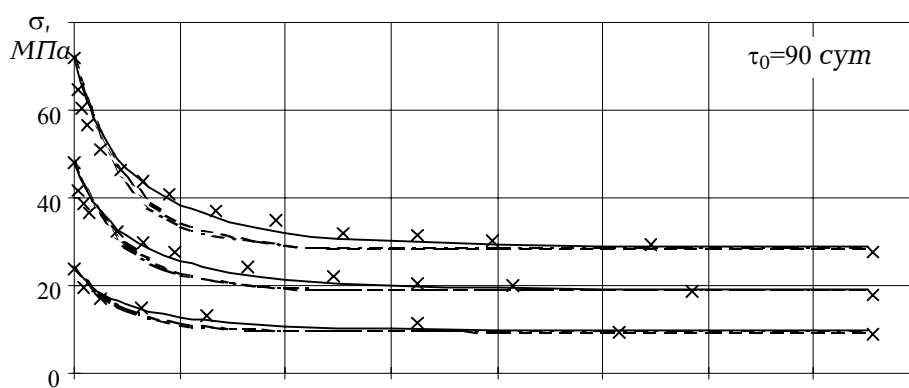
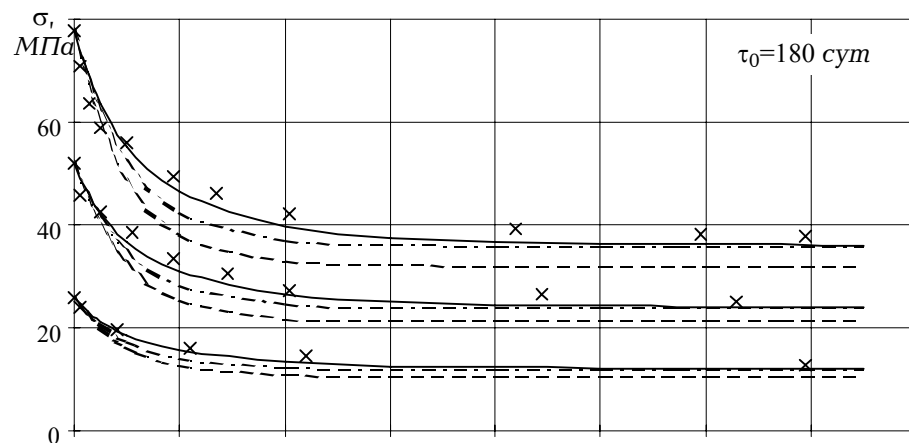


Рис.3. Кривые релаксации напряжений при начальном нагружении до 0,2, 0,4 и 0,6 R_{np} . — — — - теория наследственности (6), — · — - теория упрочнения (10), — — — - теория старения (11)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Торбен К. Гансен.** Ползучесть и релаксация напряжений в бетоне.- М.: Госстройиздат, 1963. - 124 с.
15. **Шафрановский Ю.А.** О построении кривых релаксации напряжений на основе рассмотрения бетона как неоднородного тела // Проблемы ползучести и усадки бетона. -М.: Стройиздат, 1974. - С. 54-59.
16. **Trost Heinrich, Cordes Heiner, Abele Gunther.** Kriech und Relaxations versuche an sehr altem Beton. Dtsch. Ausschuss stahlbeton.- 1978. -№295. - P. 3-27.
17. **Acker P., Barral Andre.** Comportement differe du beton Appareillage pour essai de relaxation // Bull. Piais. Lab. Ponts et chaussees. -1983. - №128. - P. 121-123.
18. **Любимов А.А., Кононов В.П., Филимонов П.И.** Взаимосвязь между ползучестью и релаксацией напряжений в бетоне // Бетон и железобетон. -1984. - №7. - С. 26-28.
19. **Полисмаков А.И., Смелик Г.Г., Сысоев А.К.** Математическая модель релаксации напряжений в бетоне // Изв. Сев.-Кавказ. научн. центра высш. шк. Сер. ТН. -1984. - №2. - С. 91-92.
20. **Глуховский В.Д., Серых Р.Л., Ткаленко С.А.** Ползучесть и релаксации шлакощелочного бетона // Пром. стр-во и инж. сооруж. - 1988. -№ 3. - С. 9-10.
21. **Дасибеков А.Д., Суендыкова К.Б.** Некоторые задачи нелинейной теории ползучести бетона.- Деп. в КазНИИТИ 25.07.91. 3486-Ка91.
22. **Shen Jing-Hua.** Lineare und nichtlineare Theorie des Kriechens und der Relaxations von Beton under Druckbeanspruchung. Dtsch. Ausschuss stahlbeton.- 1992. - №432. - P.1-36.
23. **Pirtz D., Thomas K., Monteiro P.J.M.** Stress relaxation: comparison of measured and computed values // J. Amer. Concr. Inst. -1986. -№3. - P. 432-437.
24. **Газиев М.А.** Релаксация напряжений в автоклавных ячеистых бетонах с учетом их старения вследствие карбонизации // Работоспособ. композиц. строит. материалов в условиях воздействия разл. эксплуат. факторов. - Казань, 1985. - С. 44-46.
25. **Арутюнян Н.Х.** Некоторые вопросы теории ползучести. -М.;-Л.: Гостехтеориздат, 1952. -323 с.
26. **Симонян А.М., Карапетян К.А.** К расчету бетонных и железобетонных конструкций с учетом неоднородности бетона // Изв. НАН Армении. Механика. - 1996.-Т.49, №2. - С. 26-34.
27. **Качанов Л.М.** Теория ползучести. -М.: Физматгиз, 1960. - 456 с.
28. **Работнов Ю.Н.** Ползучесть элементов конструкции. - М.: Наука, 1966. -752 с.

Ин-т механики НАН РА

23.01.1998