

Р. А. КОТИКЯН

ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА ПРИ ПОСТОЯННЫХ И СТУПЕНЧАТО-ВОЗРАСТАЮЩИХ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

Исследования [6] показали, что при растяжении, начиная с малых напряжений, деформации ползучести растут непропорционально напряжениям. При этом нелинейность деформаций особенно ярко начинает проявляться, когда уровень напряжения превышает 0.5—0.6 и в большей степени зависит от возраста бетона к моменту длительного нагружения (-). До указанного уровня отклонение зависимости $\epsilon - \epsilon_p$ от линейной незначительно и можно считать, что практически имеет место линейная ползучесть.

Результаты этих исследований противоречат тому сложившемуся мнению, что при растяжении связь между напряжениями и деформациями ползучести линейна почти до напряжения, близкого к пределу прочности бетона. Учитывая это, автор решил еще раз подробно изучить этот вопрос. В новых более обширных опытах, результаты которых приводятся в настоящей работе, ползучесть изучалась как при постоянных, так и при разных режимах ступенчато-возрастающих растягивающих напряжений с учетом старения бетона. Постановка более широких опытов дала возможность исследовать также такой важный для теории вопрос, каким является применимость принципа наложения воздействий. Последний для деформаций ползучести при сжимающих нагрузках весьма подробно исследовался в работах А. Д. Росса [4], П. И. Васильева [5], С. В. Александровского и Э. Я. Багрия [2], А. А. Гвоздева, А. В. Яшина, К. Э. Гластова [3] и других. В случае растяжения этот вопрос пока недостаточно изучен.

Опыты были поставлены на восьмерках сечением 10 × 10 см, высотой 60 см, изготовленных из вибрированного тяжелого бетона состава (по весу) 1:2, 13:2, 91, $\frac{B}{C} = 0.635$. Для приготовления бетона применялись базальтовый щебень, кварцевый песок и портланд-цемент марки 500 Араратского завода (г. Ереван). Всего было приготовлено пять замесов бетона и из каждого изготовлено по 30 восьмерок. Образцы бетонировались в вертикальных формах при продолжительности вибрации 30 сек. Распалубка образцов производилась через 48 часов и далее все они находились в помещении, где температура воздуха в процессе длительных опытов составляла $T = 21 \pm 5$ С, а относительная влажность $P = 70 \pm 10\%$.

Для длительного нагружения образцов разными постоянными и ступенчато-возрастающими напряжениями в возрасте 7, 28, 91 и 286 сут в каждом возрасте испытанием образцов-близнецов под кратковременной нагрузкой определялись прочность и деформации бетона при растяжении. При испытании образцов до разрушения нагрузка повышалась ступенями и после каждой ступени брались отсчеты по микрошным индикаторам, измеряющим продольные деформации. Под каждой ступенью нагрузки образец выдерживался лишь на время, необходимое для отсчетов по приборам, измеряющим деформации. Испытание каждого образца длилось не более 3-х минут. Прочность бетона на сжатие по испытаниям кубиков с ребром 10 см в возрасте 28 сут получилась равной 342 кг/см². Прочностные характеристики бетона при растяжении приведены в табл. 1.

Отсутствие четкой закономерности в изменении прочности бетона во времени, несомненно, является следствием того, что образцы, испытанные в возрастах 7, 28, 91 и 286 сут, принадлежали разным замесам бетона.

Таблица 1

Прочность бетона на растяжение

τ в сут	R_p в кг/см ²		% отклонения прочности отдельного образца от средней прочности	R_D в % от месячной прочности
	отдельных образцов	средняя		
7	11,1	11,4	-2,6	68,3
	10,7		-6,0	
	12,4		8,8	
28	16,2	16,7	-3,0	100,0
	17,4		-3,9	
	16,6		-0,6	
91	14,6	14,5	1,0	86,8
	15,2		-4,8	
	13,7		-5,5	
286	14,2	15,2	-6,5	91,0
	16,8		+10,5	
	14,7		-2,3	

Прочность же отдельных образцов, испытанных в одном возрасте, весьма мало отличается от их среднего значения. Это обстоятельство важно было для уменьшения разброса деформаций ползучести бетона.

Экспериментальные кривые кратковременных деформаций бетонных посьмерок подвергались статистической обработке по методике [7] и описывались корреляционным уравнением

$$\epsilon = \frac{a \sigma / R_p}{1 - b \sigma / R_p} \quad (1)$$

Для исследования ползучести бетона при постоянных и ступенчато-возрастающих растягивающих напряжениях образцы были подвергнуты длительному нагружению в возрасте 7, 28, 91 и 286 сут. Образцы, нагруженные в одном возрасте, принадлежат одному замесу бетона. Необходимые данные об опытных образцах приведены в табл. 2.

Таблица 2

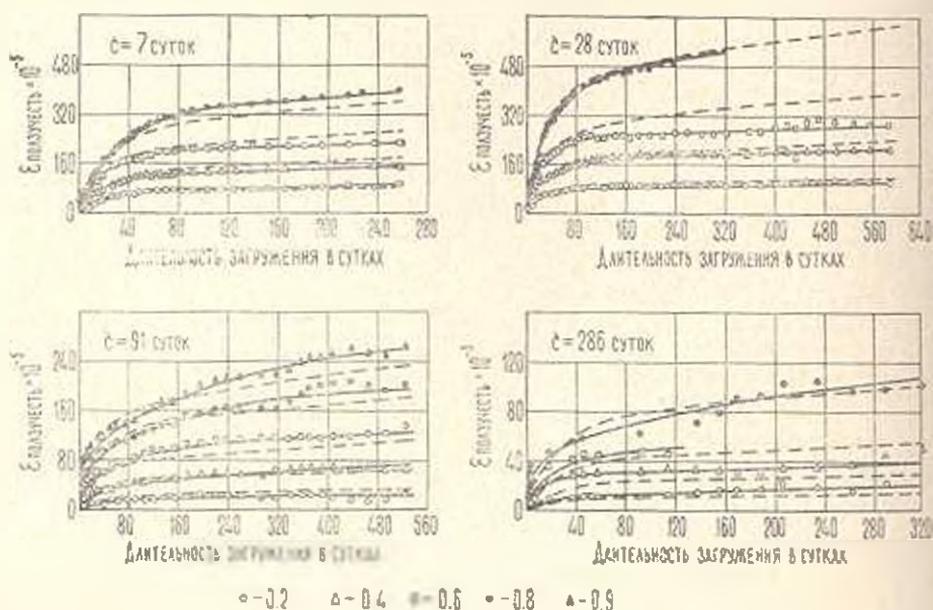
t в сут	R_p в кг/см ²	σ / R_p	σ в кг/см ²	Количество образцов
7	11.4	0.2	2.3	3
		0.4	4.6	3
		0.6	6.8	2
		0.8	9.1	3
		0.2-0.4	2.3-4.6	2
		0.2-0.4-0.6	2.3-4.6-6.8	2
		0.2-0.4-0.6-0.8	2.3-4.6-6.8-9.1	4
28	16.7	0.2	3.3	3
		0.4	6.7	3
		0.6	10.0	2
		0.8	13.4	2
		0.2-0.4	3.3-6.7	2
		0.2-0.4-0.6	3.3-6.7-10.0	2
		0.2-0.4-0.6-0.8	3.3-6.7-10.0-13.4	4
91	14.5	0.2	2.9	3
		0.4	5.8	3
		0.6	8.7	2
		0.8	11.6	3
		0.9	13.0	2
		0.2-0.4	2.9-5.8	2
		0.2-0.6	2.9-8.7	2
		0.2-0.3-0.6	2.9-4.4-8.7	2
		0.2-0.5-0.6	2.9-7.2-8.7	2
0.2-0.6-0.8	2.9-8.7-11.6	2		
0.2-0.3-0.6-0.8	2.9-4.4-8.7-11.6	2		
286	15.2	0.2	3.0	3
		0.4	6.1	3
		0.6	9.1	2
		0.8	12.2	3
		0.2-0.4	3.0-6.1	2
		0.2-0.4-0.6	3.0-6.1-9.1	2
		0.2-0.4-0.6-0.8	3.0-6.1-9.1-12.2	4

Как видно из табл. 2, в возрасте 7, 28 и 286 сут ступенчатое повышение напряжения до максимального значения во всех случаях производилось равными ступенями, составляющими 0.2 от предела прочности бетона на растяжение в момент нагружения первой ступенью.

В возрасте 7 и 28 сут нагрузка повышалась через каждые 15 сут, а в возрасте 286 сут — через 45 сут. Согласно принципу наложения

воздействий конечная ползучесть не зависит от истории нагружения. Для экспериментальной проверки этого положения при $\tau=91$ сут ступенчатое понижение напряжения до одинакового конечного уровня (0.6 и 0.8) осуществлялось тремя и двумя разными режимами, которые отличались как количеством и величинами ступеней, так и их продолжительностью воздействия. При ступенчатом нагружении 0.2—0.5—0.6 вторая ступень прикладывалась через 60 сут после первого нагружения, а третья ступень — через 30 сут после приложения второй ступени. Что касается режима нагружения 0.2—0.6; 0.2—0.3—0.6; 0.2—0.6—0.8 и 0.2—0.3—0.6—0.8, то в этих случаях нагрузка повышалась через равные интервалы времени (30 сут) и образцы оставались под максимальным напряжением до конца опытов. Через 30 сут повышалась нагрузка и при ступенчатом нагружении 0.2—0.4 (табл. 2).

Деформации ползучести, развивающиеся за короткое время нагружения образцов на длительное растяжение, которое обычно длилось не более 3-х минут, в последующем отделялись от полных деформаций и относились к длительным деформациям ползучести. На фиг. 1



Фиг. 1

сплошными линиями представлены экспериментальные кривые ползучести бетона при постоянных напряжениях растяжения. Кривые ползучести бетона при ступенчато-возрастающих напряжениях представлены на фиг. 2.

Для аппроксимации кривых ползучести, как и в работе [6], использована зависимость теории нелинейной ползучести [1, 5]

$$\epsilon_{\text{полз}}(t, \tau) = C(t, \tau) [\alpha(\tau) \sigma - \beta(\tau) \sigma^2] \quad (2)$$

При этом удовлетворяется уравнение $\alpha(\tau) + \beta(\tau) = 1$.

Мера ползучести бетона была выбрана по предложению Н. Х. Арутюняна [1]

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) f(t)$$

где

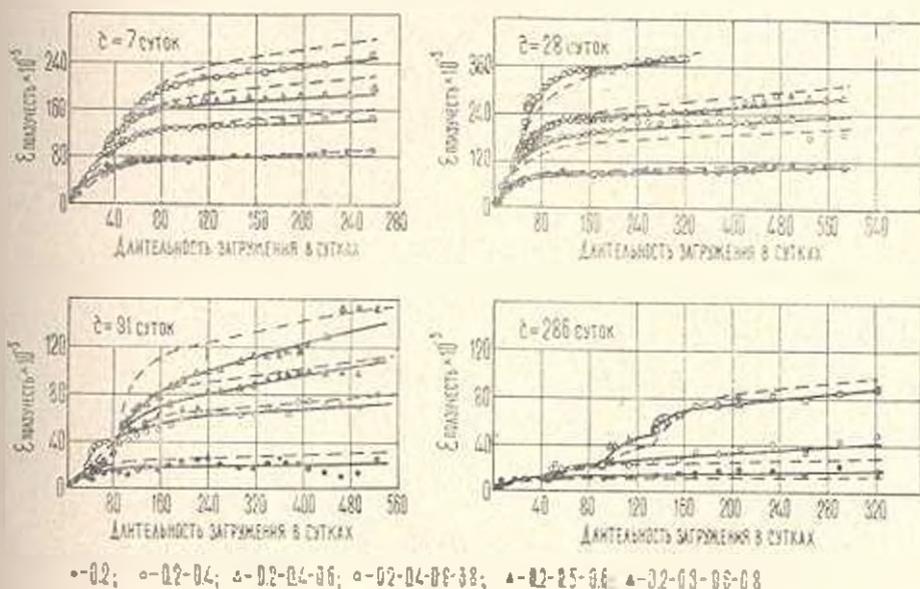
$$\varphi(\tau) = C_0 + \frac{A + B\tau}{D + \tau^2} \quad (3)$$

$$f(t) = 1 - 0.5[e^{-\gamma_1 t} + e^{-\gamma_2 t}]$$

Коэффициенты C_0 , A , B , D , γ_1 и γ_2 определяются из опыта.

Подставляя (3) в выражение (2), получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{пол}}(t, \tau) = & \left(C_0 + \frac{A + B\tau}{D + \tau^2} \right) [1 - 0.5(e^{-\gamma_1 t} + e^{-\gamma_2 t})] \times \\ & \times \left\{ 1 + \beta(\tau) \cdot 1 \frac{\text{с.кг}^6}{\text{кг.с}^2} (\tau^3 - 1) \right\} \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$



Фиг. 2

В результате описания семейства экспериментальных кривых ползучести бетона при постоянных напряжениях была получена следующая зависимость:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{пол}}(t, \tau) = & \left(0.68 + \frac{12950 - 68.6\tau}{2536 + \tau^2} \right) [1 - 0.5(e^{-0.0117t} + e^{-0.0011t})] \times \\ & \times \left\{ 1 + 692 [1 - 0.5(e^{-0.017t} + e^{-0.0011t})] (\tau^3 - 1) \right\} \cdot 10^{-5} \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно из фиг. 1, где пунктиром представлены теоретические кривые, зависимость (5) вполне удовлетворительно описывает экспериментальные кривые ползучести.

Теоретические кривые ползучести режимных образцов, которые были загружены разными ступенчатыми нагрузками, рассчитывались по формуле

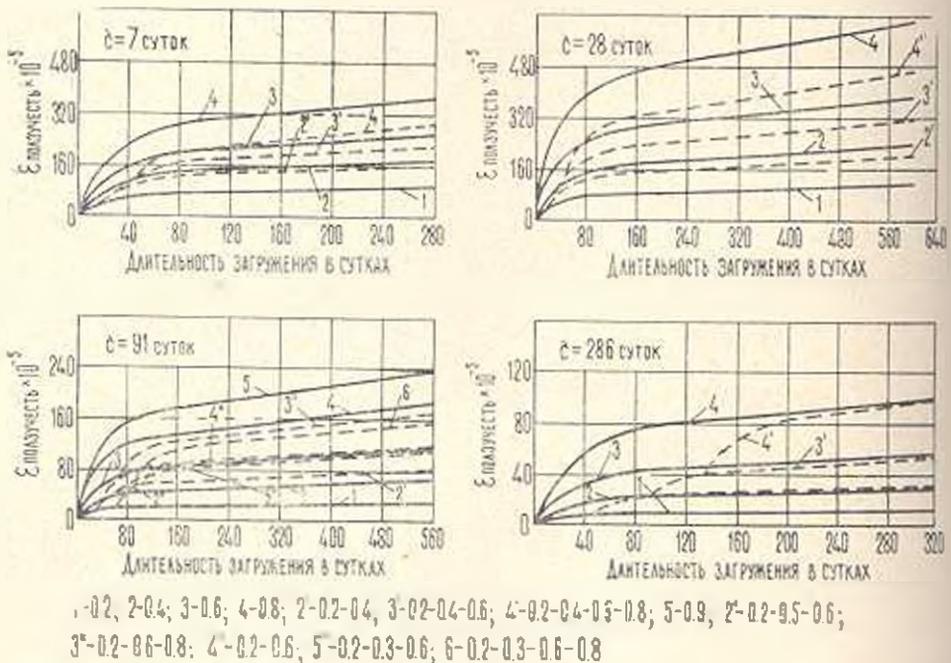
$$\varepsilon_{\text{полз}}(t, \tau) = \sum_{i=0}^n C(t - \tau_i, \tau_i) [F[\tau_i(\tau_i)] - F[\tau_{i-1}(\tau_{i-1})]] \quad (6)$$

при этом

$$F[\tau_{-1}(\tau_{-1})] = 0 \quad (7)$$

Теоретические кривые ползучести образцов, загруженных разными ступенчатыми напряжениями, рассчитанные по формуле (6), пунктиром нанесены на фиг. 2. Как видим, в большинстве случаев расхождение экспериментальных и теоретических кривых деформаций режимных образцов незначительна.

Таким образом, нелинейная теория упруго-ползучего тела вполне удовлетворительно описывает экспериментальные кривые ползучести бетона как при постоянных, так и при ступенчато-возрастающих растягивающих напряжениях с учетом старения. Это говорит о том, что при ступенчато-возрастающих растягивающих напряжениях принцип наложения воздействий, который является одной из рабочих гипотез

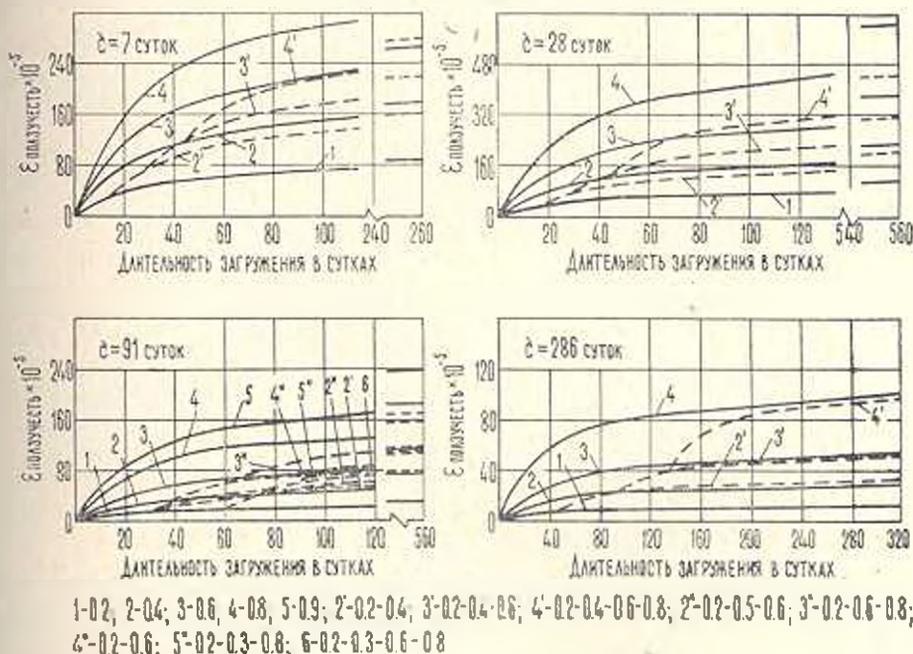


Фиг. 3

теории упруго-ползучего тела, применим. Однако, чтобы экспериментально проверить справедливость принципа наложения воздействий для деформаций ползучести при растягивающих напряжениях (без использования какой-либо теории), необходимо выяснить зависит ли

конечная деформация ползучести от режима нагружения. Для анализа опытных данных с этой точки зрения рассмотрим фиг. 3, где приведены теоретические кривые ползучести при постоянных и ступенчато-возрастающих напряжениях для $\tau = 7, 28, 91$ и 286 сут . Для наглядности на фиг. 4 те же кривые показаны в другом масштабе. Из представленных графиков следует, что в области условной линейной ползучести конечная деформация не зависит от режима нагружения. Что касается нелинейной области ползучести, то в этом случае большое значение имеет возраст бетона к моменту длительного нагружения. При $\tau = 7, 28$ и 91 сут деформации ползучести образцов, нагруженных сразу конечным напряжением, намного больше, чем деформации образцов, нагруженных тем же напряжением ступенчато. С дальнейшим увеличением возраста указанная разница деформаций уменьшается и при $\tau = 286 \text{ сут}$, если даже $\sigma/R_p = 0,8$, конечные деформации не зависят от режима нагружения.

В табл. 3 приведены упруго-мгновенные деформации, деформации ползучести и характеристика ползучести бетона φ , при различных τ и σ/R_p .



Фиг. 4

По данным табл. 4, которые относятся к возрасту 7 сут , нелинейность деформаций ползучести даже при $\sigma/R_p = 0,8$ весьма незначительна и поэтому можно считать, что практически имеет место линейная ползучесть. Во всех остальных случаях ($\tau = 28, 91$ и 286 сут) нелинейность деформаций ползучести начинает резко проявляться при $\sigma/R_p > 0,6$ и тем чувствительнее, чем больше σ/R_p и τ . При $\tau \geq 28 \text{ сут}$

зависимость между напряжениями и деформациями ползучести можно практически считать линейной до $\sigma/R_p = 0.5-0.6$.

Таким образом, проведенные исследования еще раз подтверждают тот ранее сделанный вывод [6], что при растяжении зависимость между напряжениями и деформациями ползучести вообще нелинейна. Однако, до некоторого уровня напряжения, который зависит от возраста бетона к моменту длительного нагружения, нелинейность деформаций ползучести незначительна и поэтому можно считать, что практически имеет место линейная ползучесть.

Таблица 3

τ , сут	Показатели	Показатели при относительном напряжении				
		0.2	0.4	0.6	0.8	0.9
7	$10^5 \times \varepsilon_y$	0.638	1.277	1.915	2.554	—
	$10^5 \times \varepsilon_{пол}$ (при $t=250$ сут)	8.82	17.70	26.42	36.02	—
	$\varphi_t = \varepsilon_{пол} / \varepsilon_y$	13.82	13.86	13.80	14.10	—
28	$10^5 \times \varepsilon_y$	1.342	2.685	4.028	5.371	—
	$10^5 \times \varepsilon_{пол}$ (при $t=250$ сут)	9.36	19.45	32.13	50.55	—
	$\varphi_t = \varepsilon_{пол} / \varepsilon_y$	6.97	7.24	7.98	9.41	—
91	$10^5 \times \varepsilon_y$	1.238	2.477	3.715	4.953	5.571
	$10^5 \times \varepsilon_{пол}$ (при $t=250$ сут)	2.65	5.56	9.43	15.40	19.65
	$\varphi_t = \varepsilon_{пол} / \varepsilon_y$	2.14	2.24	2.54	3.11	3.53
286	$10^5 \times \varepsilon_y$	1.180	2.359	3.539	4.78	—
	$10^5 \times \varepsilon_{пол}$ (при $t=250$ сут)	1.290	2.82	5.24	9.60	—
	$\varphi_t = \varepsilon_{пол} / \varepsilon_y$	1.09	1.20	1.48	2.03	—

Новые опыты еще раз показали, что при растяжении характеристика ползучести φ_t особенно при нагружении бетона в молодом возрасте может получиться весьма значительной.

Как видно из табл. 4, при $\tau = 7$ сут и $\sigma/R_p = 0.8$ характеристика ползучести уменьшается и тем чувствительнее, чем меньше уровень напряжения. При $\sigma/R_p = 0.2$ и 0.8 увеличение τ от 7 сут до 286 сут привело к уменьшению φ_t соответственно в 13 и 7 раз.

Թ. Ա. ԿՈՏԻԿՅԱՆ

ԲԵՏՈՆԻ ՍՈՂՔՐԸ ՀՈՍՏՏՏՈՒՆԻ ԵՎ ԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԱՃՈՂ ՉԳՈՂ
ԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԳԵՊՔՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հողվածում բերվում են բետոնի սողքի էրապերիմենտալ հետազոտությունների արդյունքները հաստատուն և աստիճանաչին որոշումներով աճող ձգող լարումների ղեկարում: Հաստատված է որ սողքի գեֆորմացիաների և լարումների կապը բնդանրապես ոչ գծային է: Մակայն մինչև լարումների աճման որոշակի սահմանի, որը կախված է բետոնափորման մամենտում բետոնի հասակից, սողքի գեֆորմացիաների և լարումների կապի ոչ դժայնությունը թույլ է, և այդ սահմանը չգերազանցելու ղեկարում, կարելի է բնդունել որ գործնականորեն անդի ունի գծային սողք:

Պարզվել է, որ վերադրման սկզբունքը վարկածների ձգման ղեկարում տեղի ունի և սողքի վերջնական գեֆորմացիաները կախված չեն բետոնափորման սեփմից:

CREEP OF AGEING CONCRETE UNDER CONSTANT
AND GRADUALLY GROWING TENSILE STRESSES

R. A. KOTIKIAN

S u m m a r y

The results of experiments on creep of ageing concrete under constant and gradually growing tensile stresses are presented in the paper.

It is found that under tensile stress the relations between stresses and deformations of creep are non-linear in general. However, up to a certain stress level that depends on the age of concrete at the instant of a continuous loading, the non-linearity of creep deformation is insignificant. Therefore, the linear creep may practically be considered to occur. The principle of superposition of effects which is one of the operating hypotheses of the theory of an elastic creep body is used for tensile stresses. The final deformation of creep is independent of loading conditions.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести Гостехтеориздат, М.—Л., 1952.
2. Александровский С. В., Визрий В. Я. Ползучесть бетона при периодических воздействиях. Стройиздат, М., 1970.

3. Гвоздев А. А., Яшин А. В., Гилуестой К. Э. О некоторых отступлениях от принципа наложения в теории ползучести бетона. „Бетон, железобетон“, № 8, 1967.
4. Ross A. D. Creep of concrete under variable stress. Journ. of the Amer. Concr. Inst., vol. 29, № 9, 1958.
5. Васильев П. И. Некоторые вопросы пластических деформаций бетона. „Известия ВНИИГ“, т. 49, 1959.
6. Карапетян К. С., Котикян Р. А. Исследование зависимости между напряжениями и деформациями ползучести при растяжении. Известия АН АрмССР, Механика, т. XXIV, № 5, 1971.
7. Митропольский А. К. Техника статистического вычисления. М., 1961.