

УДК 666.972.04

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СЕКУЩЕГО МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПЕСЧАНОГО БЕТОНА ПРИ
ДЛИТЕЛЬНОМ ЦЕНТРАЛЬНОМ СЖАТИИ НАГРУЗКОЙ
РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СІЧНОГО
МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦІЙ ПІСЧАНОГО БЕТОНУ ПРИ
ДОВГОТРИВАЛОМУ ЦЕНТРАЛЬНОМУ СТИСНЕННІ
НАВАНТАЖЕННЯМ РІЗНОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ**

**THE EXPERIMENTAL AND STATISTICAL RESEARCH INTO SECANT
STRESS-STRAIN MODULUS OF SAND CONCRETE WITH A LONG
CENTRAL COMPRESSION LOAD OF VARYING INTENSITY**

**Битько Н.М., к.т.н., доцент, Кузнецова О.В., ст.преподаватель,
Бойко В.В., ст.преподаватель (Черкасский государственный
технологический университет, г. Черкассы)**

**Битько М.М., к.т.н., доцент, Кузнецова О.В., ст.викладач, Бойко В.В., ст.
викладач (Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси)**

**N. M. Bitko, Ph.D., Associate Professor, O. V. Kuznetsova, Assistant V. V.
Boiko, Senior Lecturer (State Technological University, Cherkassy)**

**Изложены результаты экспериментально-статистических исследований
секущего модуля деформаций песчаного бетона при длительном
центральном сжатии нагрузкой различной интенсивности. На основании
статистической обработки результатов длительных испытаний
песчаного бетона, установлена линейная корреляционная зависимость
между секущим модулем полных деформаций $E'_{\eta,t,\tau}$ и начальным
уровнем напряжений η_τ при длительном центральном сжатии с
постоянными во времени напряжениями σ_τ .**

**Приведені результати експериментально-статистичних досліджень
січного модуля деформацій пісчаного бетону при довготривалому
центральному стисненні навантаженням різної інтенсивності. На основі
статистичної обробки результатів довготривалих випробувань пісчаного
бетону, з великою надійністю установлена лінійна кореляційна
залежність між січним модулем повних деформацій $E'_{\eta,t,\tau}$ і початковим**

рівнем напружень η_τ при довготривалому центральному стисненні з постійними в часі напруженнями σ_τ .

There are given the results of experimental and statistical studies of secant stress-strain modulus of sand concrete with a long central compression load of varying intensity. The statistical analysis of the results for the long-term testing of sand concrete allowed to establish a reliable linear correlation between secant stress-strain modulus $E_{\eta,t,\tau}$ and the initial level of stress η_τ in the long central compression under constant pressure σ_τ . The linear relationship $E'_{\eta,t,\tau} - \eta_\tau$ allowed to receive the theoretical value of secant modulus of complete deformations $E_{\eta,t,\tau}$ under relative initial stress $\sigma_\tau = 0 - E_{0,t,\tau}$ and $\sigma_\tau = f_{cd} - E'_{Rt,\tau}$ with corresponding $\varphi_{0,t,\tau}$ initial value and $\varphi_{R,t,\tau}$ boundary value of creep characteristics for heavy concrete.

We received analytical dependence for the theoretical value of the secant modulus of complete deformation for sand concrete $E_{\eta,t,\tau}$ under constant squeezing load the initial level of stress $\eta_\tau < 0,9 f_{cd}$ at any time of its action ($t - \tau$). Scalar parameters values being the part of analytic dependence have been received from the correlation analysis of dependence $E'_{\eta,t,\tau} - \eta_\tau$ and approximation of experimental correlation curves $\varphi_{0,t,\tau}$ and $\varphi_{R,t,\tau}$ over time.

Ключевые слова:

Песчаный бетон, секущий модуль, напряжения, уровень напряжений, характеристика ползучести.

Пісчаний бетон, січний модуль, напруження, рівень напружень, характеристика повзучості.

Sand concrete, secant modulus, pressure, stress level, creep characteristics.

Введение. В практике строительства в настоящее время основным строительным материалом служат железобетонные конструкции. Исходя из этого, большое значение уделяется вопросу расчета и проектирование таких конструкций. Одним из важных является вопрос оценки напряженно-деформированного состояния конструкций при длительном сжатии нагрузкой различной интенсивности.

Актуальность. Бетон обладает важным свойством – это ползучесть. Ползучесть бетона оказывает существенное влияние на работу железобетонных конструкций под нагрузкой при расчете трещиностойкости и деформативности конструкций, определений внутренних усилий в статически неопределимых конструкциях [1].

Это явление может оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на надежную работу железобетонных конструкций. Поэтому разработка новых и совершенствование существующих методик определения напряженно-деформированного состояния бетонов, в том числе секущего модуля деформаций, является одной из главных задач по дальнейшему совершенствованию методов расчета железобетонных конструкций.

Анализ результатов исследований. Напряженно-деформированное состояние песчаного бетона является функцией многих переменных, поэтому описание общих зависимостей между напряжениями и деформациями, при действии длительной нагрузки, можно получить на базе построения уравнений. Эти уравнения описывают процессы, происходящие в песчаном бетоне с учетом изменения во времени многих факторов. В свое время имелись попытки построения таких зависимостей для тяжелого бетона [2].

Поэтому в данное время разработаны феноменологические зависимости между напряжениями и деформациями, полученными из опыта при определенных режимах длительных испытаний [2].

Цель. Разработка на основе результатов экспериментально-статистических исследований упрощенных феноменологических зависимостей для определения напряженно-деформативного состояния песчаного бетона.

Изложения основного материала. Для решения этой задачи была забетонирована серия образцов близнецов в виде призм размером 100x100x750 мм. На каждый начальный уровень обжарки ($\eta_\tau = 0; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$) загружались по три образца. Кроме этого имелось три образца не повергавшихся загрузке, предназначенные для определения деформаций свободной усадки $\varepsilon_{o,t,\tau}^{cr}$, значения которых вычитались из деформаций, развивающихся под нагрузкой.

Деформации опытных образцов, в процессе их длительных испытаний, фиксировались через 0, 1ч, 12ч, 1с, 3с, 7с, 11с, 28с, 57с, 112с, 180с, 197суток.

Исходя из определения ползучести бетонов, его полная относительная деформация при любом начальном уровне действия сжимающей нагрузки η_τ в любой момент времени $(t - \tau)$ $\varepsilon_{\eta,t,\tau}$ равна сумме начальной деформации $\varepsilon_{\eta\tau}^{el}$, возникшей в момент приложения нагрузки, и деформации ползучести $\varepsilon_{\eta,t,\tau}^{cr}$, развивающейся во времени, т.е.

$$\varepsilon_{\eta,t,\tau} = \varepsilon_{\eta\tau}^{el} + \varepsilon_{\eta,t,\tau}^{cr}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\eta,t,\tau}$ - полная деформация песчаного бетона в момент времени $(t - \tau)$,
загруженного в возрасте τ до относительного уровня $\eta_\tau = \frac{\sigma_\tau}{f_{cd,\tau}}$;

$\varepsilon_{\eta\tau}^{el}$ - начальная (упругая) деформация песчаного бетона в момент
загружения τ до относительного уровня η_τ ;

$\varepsilon_{\eta,t,\tau}^{cr}$ - деформации ползучести песчаного бетона к моменту времени $(t - \tau)$,
загруженного в возрасте τ до относительного уровня η_τ .

В большинстве случаев за упругие деформации песчаных бетонов $\varepsilon_{\eta\tau}^{el}$, пренебрегая его пластическими деформациями в момент загрузки, принимают начальные деформации бетона, в момент окончания приложения сжимающей нагрузки, т.е. $\varepsilon_{\eta\tau}^{el} \approx \varepsilon_{\eta\tau}$.

Для количественной оценки деформаций песчаного ползучести бетона, при действии постоянной сжимающей нагрузки различной интенсивности, служит характеристика $\varphi_{\eta,t,\tau}$ или мера ползучести $c_{\eta,t,\tau}$, которые равны:

$$\varphi_{\eta,t,\tau} = \frac{\varepsilon_{\eta,t,\tau}^{cr}}{\varepsilon_{\eta,\tau}^{el}}; \quad c_{\eta,t,\tau} = \frac{\varepsilon_{\eta,t,\tau}^{cr}}{\sigma_\tau}, \quad (2)$$

Задача установления зависимости между σ_τ напряжениями и деформациями $\varepsilon_{\eta,t,\tau}$ в песчаном бетоне, при длительном действии нагрузки, решалась авторами путем исследования изменения во времени секущего модуля упруго-пластичности с учетом деформаций ползучести $E'_{\eta,t,\tau}$, значение которого определялось по формуле:

$$E'_{\eta,t,\tau} = \frac{\sigma_\tau}{\varepsilon_{\eta,\tau} + \varepsilon_{\eta,t,\tau}^{cr}}, \quad (3)$$

Ранее [3] было доказано, что зависимость между секущим модулем деформаций $E'_{\eta,\tau}$ и напряжениями σ_τ , или уровнем напряжений η_τ в тяжелом бетоне при кратковременном сжатии является линейной корреляционной.

Как показала статистическая обработка результатов испытаний песчаного бетона, а также опытов К.С. Карапетяна [4] и Р.А.Мельника [5] для тяжелого бетона, зависимости «секущий модуль деформаций – начальный уровень напряжений», можно также аппроксимировать линейными уравнениями регрессии как при кратковременном нагружении с постоянной скоростью приложения сжимающей нагрузки, так и при последующем длительном центральном сжатии с постоянными во времени напряжениями σ_τ или начальными уровнями напряжений η_τ .

Корреляционные зависимости $(E'_{\eta,\tau} - \sigma_\tau)$ при кратковременном нагружении имеют вид:

$$E'_{\eta,\tau} = \frac{\sigma_\tau}{\varepsilon_{\eta,\tau}} = E_{o,\tau} \left[1 - \left(1 - \frac{E'_{R,\tau}}{E_{o,\tau}} \right) \eta_\tau \right], \quad (4)$$

$E_{o,\tau}$ и $E'_{R,\tau}$ - предельные опытно-корреляционные (теоретические) значения секущего модуля деформаций в момент загрузки τ при относительном уровне напряжений $\eta_\tau = 0$ и $\eta_\tau = 1$.

Корреляционные зависимости $(E'_{\eta,t,\tau} - \sigma_\tau)$ при длительном нагружении имеют вид:

$$E'_{\eta,t,\tau} = \frac{\sigma_\tau}{\varepsilon_{\eta,t,\tau}} = E_{o,t,\tau} \left[1 - \left(1 - \frac{E'_{R,t,\tau}}{E_{o,t,\tau}} \right) \eta_\tau \right], \quad (5)$$

Для теоретического определения значение секущего модуля деформаций песчаного бетона $E'_{\eta,t,\tau}$ в любой момент времени t и продолжительности действия сжимающей нагрузки $(t - \tau)$ на любом начальном уровне η_τ , приложенных постоянных напряжений, было использовано соотношение опытно-корреляционных граничных значений секущих модулей деформаций $E'_{\eta,\tau} / E'_{\eta,t,\tau}$ при $\eta_\tau = 0$ и $\eta_\tau = 1$, полученных из линейных корреляционных уравнений в различные моменты времени $(t - \tau)$.

$$\frac{E'_{\eta,\tau}}{E'_{\eta,t,\tau}} = \frac{\sigma_\tau \varepsilon_{\eta,t,\tau}}{\varepsilon_{\eta,\tau} \sigma_\tau} = \frac{\varepsilon_{\eta,t,\tau}}{\varepsilon_{\eta,\tau}} = \frac{\varepsilon_{\eta,\tau} + \varepsilon_{\eta,t,\tau}^{cr}}{\varepsilon_{\eta,\tau}} = 1 + \varphi_{\eta,t,\tau} \quad (6)$$

По аналогии с (6) при $\eta_\tau = 0$

$$\frac{E_{o,\tau}}{E_{o,t,\tau}} = 1 + \varphi_{o,t,\tau}, \quad \frac{E'_{R,\tau}}{E'_{R,t,\tau}} = 1 + \varphi_{R,t,\tau} \quad (7)$$

где $\varphi_{o,t,\tau}$ и $\varphi_{R,t,\tau}$ - соответственно начальное и предельное значение характеристик ползучести песчаного бетона $\varphi_{\eta,t,\tau}$, полученные из корреляционных уравнений (4) и (5) с использованием уравнений (7) в любой момент времени $(t - \tau)$, т.е.

$$\varphi_{o,t,\tau} = \frac{E_{o,\tau}}{E_{o,t,\tau}} - 1; \quad \varphi_{R,t,\tau} = \frac{E'_{R,\tau}}{E'_{R,t,\tau}} - 1 \quad (8)$$

Аппроксимация значений $\varphi_{o,t,\tau}$ и $\varphi_{R,t,\tau}$ проведены авторами по гиперболической зависимости:

$$\varphi_{o,t,\tau} = \varphi_{o,\infty,\tau} \left[1 - \frac{1}{1 + \alpha_1(t - \tau)} \right]^{n_1} \quad (9)$$

$$\varphi_{R,t,\tau} = \varphi_{R,\infty,\tau} \left[1 - \frac{1}{1 + \alpha_2(t - \tau)} \right]^{n_2} \quad (10)$$

В формулах (9) и (10):

$\varphi_{o,\infty,\tau}$ - начальное значение характеристики ползучести песчаного бетона в момент времени $(t - \tau) = \infty$;

$\varphi_{R,\infty,\tau}$ - предельное значение характеристики ползучести песчаного бетона в момент времени $(t - \tau) = \infty$;

$(t - \tau)$ – время действия длительной сжимающей нагрузки в сутках.

За момент времени $(t - \tau) = \infty$ принята продолжительность испытаний 720 суток.

Численные значения параметров α_1 ; α_2 ; n_1 ; n_2 получены на основе корреляционного анализа зависимости $E'_{\eta,t,\tau} - \eta_\tau$ и аппроксимации опытно-корреляционных кривых $\varphi_{o,t,\tau}$ и $\varphi_{R,t,\tau}$ во времени, при помощи ЭВМ.

Как показала обработка параметров исследований из песчаного бетона значения α_1 и n_1 являются постоянными независимо от вида бетона, времени загрузки и равны $\alpha_1 = 0,0044$ и $n_1 = 0,4$. Для упрощения расчета значение коэффициентов принято соответственно $\alpha_1 = 0,0044$ и $n_1 = 0,5$, т.е

$$\varphi_{o,t,\tau} = \varphi_{o,\infty,\tau} \left[1 - \frac{1}{1 + 0,0044(t - \tau)} \right]^{0,5} = \varphi_{o,\infty,\tau} \sqrt{1 - \frac{1}{1 + 0,0044(t - \tau)}} \quad (11)$$

Величины параметров α_2 и n_2 зависят от вида бетона и для песчаного бетона их значения составили соответственно $\alpha_2 = 0,006$ и $n_2 = 0,25$, т.е.

$$\varphi_{R,t,\tau} = \varphi_{R,\infty,\tau} \left[1 - \frac{1}{1 + 0,006(t - \tau)} \right]^{0,25} \quad (12)$$

Для использования вышеуказанных зависимостей для других видов бетонов, необходимо произвести дополнительные исследования с целью установления для них вышеуказанных α_1 ; α_2 ; n_1 ; n_2 .

Исходя из вышеизложенных исследований, теоретическое значение секущего модуля полных деформаций песчаного бетона $E'_{\eta,t,\tau}$ при произвольном относительном уровне действия постоянной сжимающей нагрузки $\eta_\tau < 0,9$ в любой момент ее действия $(t - \tau)$ можно получить исходя из формулы (5) с учетом формул (7) и (8) в виде:

$$E'_{\eta,t,\tau} = E_{o,t,\tau} \left[1 - \left(1 - \frac{E'_{R,t,\tau}}{E_{o,t,\tau}} \right) \eta_\tau \right] = E_{o,\tau} \left[\frac{1 - \eta_\tau}{1 + \varphi_{o,t,\tau}} + \frac{\nu_{R,\tau} \eta_\tau}{1 + \varphi_{R,t,\tau}} \right] \quad (13)$$

где $E_{o,\tau}$ и $E'_{R,\tau}$ - начальное (модуль упругости) и предельное при $\sigma_\tau = f_{cd}$ значение секущего модуля деформаций песчаного бетона в момент приложения длительно действующей нагрузки σ_τ ;

$$v_{R,\tau} = \frac{E'_{R,\tau}}{E_{o,\tau}} = \frac{\varepsilon_{R,\tau}^{el}}{\varepsilon_{R,\tau}} - \text{предельное (при } \sigma_{\tau} = f_{cd} \text{) значение коэффициента}$$

упругости песчаного бетона в момент времени τ .

В частности для песчаного бетона, значение секущего модуля полных деформаций будет иметь вид:

$$E'_{\eta,t,\tau} = E_{o,\tau} \left[\frac{1 - \eta_{\tau}}{1 + \varphi_{o,t,\tau} \sqrt{1 - \frac{1}{1 + 0,0044(t - \tau)}}} + \frac{v_{R,\tau} \eta_{\tau}}{1 + \varphi_{R,t,\tau} \left[1 - \frac{1}{1 + 0,006(t - \tau)} \right]^{0,25}} \right] \quad (14)$$

В таблице 1 представлены опытные и корреляционные значения секущих модулей деформаций с учетом ползучести для исследуемого песчаного бетона. Как видно из таблицы, отклонения опытных и корреляционных значений $E'_{\eta,t,\tau}$ не превышает $\pm 5,0\%$.

Таблица 1

Секущие модули силовых деформаций $E'_{\eta,t,\tau} \cdot 10^4$ с учетом ползучести в тяжелом бетоне в зависимости от продолжительности действия сжимающей нагрузки $(t - \tau)$ и начального уровня обжатия η_{τ}

Суток ($t - \tau$)	Способ опреде- ления	$\eta_{\tau} = \frac{\sigma_{\tau}}{R_{b,\tau}}$									
		0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0	опыт	-	3,261	3,155	2,853	2,720	2,512	2,184	1,950	1,841	-
	теор.	3,750	3,317	3,101	2,884	2,668	2,451	2,235	2,018	1,802	1,586
	$\Delta \%$	-	+1,7	-1,7	+1,1	-1,9	-2,4	+2,3	+3,2	-2,1	-
2 ч	опыт	-	3,069	2,810	2600	2,343	2,070	1,725	1,460	1,274	-
	теор.	3,623	3,094	2,830	2,566	2,301	2,031	1,772	1,508	1,243	0,979
	$\Delta \%$	-	+0,8	+0,7	-1,3	-1,8	-1,6	+2,7	+3,3	-2,4	-
12 ч	опыт	-	2,960	2,671	2,422	2,212	1,969	1,638	1,401	1,175	-
	теор.	3,459	2,949	2,694	2,438	2,183	1,928	1,672	1,417	1,162	0,906
	$\Delta \%$	-	-0,4	+0,9	+0,7	-1,3	+1,8	-2,1	-1,1	+1,1	-
1 с	опыт	-	2,898	2,601	2,380	2,090	1,882	1,573	1,366	1,097	-
	теор.	3,388	2,878	2,623	2,368	2,114	1,858	1,604	1,349	1,093	0,839
	$\Delta \%$	-	-0,7	+0,9	+0,9	+1,2	-1,3	+2,0	-1,2	-0,3	-
4 с	опыт	-	2,644	2,402	2,142	1,927	1,744	1,482	1,296	1,048	-
	теор.	3,071	2,622	2,390	2,173	1,948	1,723	1,499	1,274	1,050	0,825
	$\Delta \%$	-	-0,8	-0,5	+1,4	+1,1	-1,2	+1,2	-1,7	+0,2	-
7 с	опыт	-	2,502	2,242	2,084	1,875	1,621	1,401	1,255	1,020	-
	теор.	2,903	2,484	2,274	2,064	1,855	1,645	1,436	1,226	1,016	0,806
	$\Delta \%$	-	-0,7	+1,4	-1,0	-1,1	+1,5	+2,5	-2,3	-0,4	-
15 с	опыт	-	2,256	2,074	1,935	1,756	1,516	1,347	1,202	0,993	-
	теор.	2,630	2,268	2,087	1,906	1,725	1,544	1,363	1,182	1,001	0,820
	$\Delta \%$	-	+0,4	+0,6	-1,5	-1,8	+1,9	+1,2	-1,7	+0,9	-

30 с	опыт	-	2,068	1,894	1,787	1,628	1,451	1,303	1,132	0,962	-
	теор.	2,391	2,077	1,920	1,763	1,606	1,450	1,293	1,136	0,979	0,822
	Δ %	-	+0,5	+1,4	-1,4	-1,5	-0,1	-0,8	+0,4	+1,8	-
60 с	опыт	-	1,887	1,750	1,653	1,512	1,352	1,232	1,085	0,944	-
	теор.	2,170	1,899	1,765	1,630	1,494	1,359	1,224	1,089	0,954	0,819
	Δ %	-	+0,6	+0,9	-1,4	-1,2	+0,6	-0,7	+0,4	+1,0	-
120 с	опыт	-	1,745	1,643	1,494	1,248	1,296	1,163	1,028	0,927	-
	теор.	1,918	1,690	1,577	1,463	1,349	1,236	1,122	1,009	0,895	0,782
	Δ %	-	-3,2	-4,0	-2,1	+10,0	-4,7	-3,5	-1,9	-3,5	-
180 с	опыт	-	1,660	1,536	1,417	1,350	1,242	1,134	1,002	0,897	-
	теор.	1,867	1,653	1,547	1,440	1,333	1,226	1,120	1,013	0,906	0,799
	Δ %	-	-0,4	+0,7	+1,6	-1,2	-1,3	-1,2	+1,1	+1,0	-
240 с	опыт	-	1,551	1,462	1,350	1,283	1,168	1,085	0,966	0,880	-
	теор.	1,748	1,555	1,459	1,362	1,266	1,170	1,073	0,977	0,881	0,785
	Δ %	-	+0,3	-0,2	+0,9	-1,3	+0,2	-1,1	+1,1	+0	-
300 с	опыт	-	1,486	1,430	1,338	1,244	1,156	1,043	0,953	0,871	-
	теор.	1,692	1,509	1,418	1,327	1,236	1,144	1,053	0,962	0,871	0,780
	Δ %	-	+1,6	-0,8	-0,8	-0,7	-1,0	+1,0	+1,0	0	-
480 с	опыт	-	1,435	1,353	1,236	1,145	1,082	1,007	0,946	0,830	-
	теор.	1,589	1,422	1,338	1,255	1,171	1,087	1,008	0,920	0,837	0,753
	Δ %	-	-0,9	-1,1	+0,9	+2,3	+0,5	+0,1	-2,8	+0,9	-
660 с	опыт	-	1,344	1,242	1,178	1,058	1,003	0,932	0,900	0,796	-
	теор.	1,471	1,320	1,245	1,170	1,094	1,020	0,943	0,868	0,792	0,717
	Δ %	-	-1,6	+0,1	-0,7	+3,4	+1,7	+1,2	-3,6	-0,6	-
∞		1,412	1,275	1,207	1,142	1,075	1,008	0,938	0,871	0,803	0,735

Выводы. Зависимость между секущим модулем упруго-пластичности и напряжениями является линейной корреляционной. Исходя из длительных испытаний образцов при двух начальных уровнях действия сжимающей нагрузки, можно прогнозировать деформативные характеристики песчаного бетона на любом произвольном уровнях действия сжимающей нагрузки. Накопленные результаты экспериментов могут быть использованы при совершенствовании норм по расчету и проектированию железобетонных конструкций.

1. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення, Київ, Мінрегіонбуд України, 2009.

2. Гвоздев А.А. Замечание о нелинейной теории ползучести бетона при одноосном сжатии // Известия АН СССР, серия «Механика твердого тела». – М., «Наука», № 5, 1972.

3. Макаренко Л.П., Фенко Г.А. Графо-аналитический способ определения модуля упругости бетона при наличии трещин // Известия высших учебных заведений, // раздел «Строительство и архитектура». - № 8, 1972.

4. Карапетян К.С. Ползучесть бетона при высоких напряжениях. Издательство А.Н. Армейской ССР, серия физико-математические науки, Том III, №2, 1953.

5. Мельник Р.А. Экспериментальное исследование нелинейной ползучести бетона. Сборник научных трудов КИСИ, Вып. 16, 1961.

6. Horigmoe G. Assessmant of the performance and safety of deteriorated concrete structures. Concrete Solutions: Conference Proceedings and Papers 1st International Conference on Concrete Repair, St –Malo, France, 15-17 July 2003. – Published by GR Technologie Ltd, London, UK, 2003. – P. 209 – 223.