

*Битько Н.М., к.т.н., доцент
Кузнецова О.В., ассистент
Бойко В.В., старший преподаватель
Черкасский государственный технологический университет*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЗУЧЕСТИ ТЯЖЁЛОГО БЕТОНА С УЧЁТОМ ЕГО СТАРЕНИЯ

Изложены результаты экспериментально-статистических исследований определения характеристик ползучести тяжёлого бетона с учётом его старения. Предложена методика её определения в любой момент времени и на любом уровне относительного обжатия постоянной нагрузкой. На основании экспериментально-статистической обработки результатов предложены зависимости определения характеристики ползучести тяжёлого бетона с учётом его старения в любой момент времени действия сжимающей загрузки t на любом уровне относительного обжатия η_t . Дано процентное отклонение опытных и теоретических значений характеристик ползучести тяжёлого бетона, полученных по предлагаемым зависимостям на каждом уровне относительно обжатия.

Ключевые слова: характеристика ползучести, относительный уровень напряжений, тяжёлый бетон, деформации ползучести, момент времени, старение.

*Битько М.М., к.т.н., доцент
Кузнецова О.В., ассистент
Бойко В.В., старший викладач
Черкаський державний технологічний університет*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЗУЧОСТІ ВАЖКОГО БЕТОНУ З УРАХУВАННЯМ ЙОГО СТАРІННЯ

Викладено результати експериментально-статистичних досліджень визначення характеристик повзучості важкого бетону з урахуванням його старіння. Запропоновано методику її визначення в будь-який момент часу і на будь-якому рівні відносного обтиску постійним навантаженням. На підставі експериментально-статистичної обробки результатів запропоновано залежності визначення характеристики повзучості важкого бетону з урахуванням його старіння в будь-який момент часу дії навантаження t , яке стискає, на будь-якому рівні відносного обтиску η_t . Дано процентне відхилення дослідних і теоретичних значень характеристик повзучості важкого бетону, отриманих за пропонуваними залежностями на кожному рівні щодо обтиску.

Ключові слова: характеристика повзучості, відносний рівень напружень, важкий бетон, деформації повзучості, момент часу, старіння.

Bitko M., PhD, Associate Professor
Kuznetsova O., assistant
Boiko V., senior lecturer
Cherkasy State Technological University

EXPERIMENTAL AND STATISTICAL INVESTIGATION OF HEAVY CONCRETE CREEP CHARACTERISTICS WITH ITS AGING CONSIDERED

The results for experimental and statistical investigation of nonlinear creep deformation of heavy concrete with its aging considered are presented.

Based on the obtained experimental data resulting from the two year testing of twins prism-shaped samples, we established a linear correlation between the secant modulus of deformation $\dot{A}'_{\eta,t,\tau} = \sigma_{\tau} / \varepsilon_{\eta,t,\tau}$ and the initial constant relative stress levels $\eta_{\tau} = \sigma_{\tau} / f_{cd}$ at any given time $(t - \tau)$ of their interaction, where σ_{τ} is a starting long-acting constant aging stress; $\varepsilon_{\eta,t,\tau}$ is full relative concrete deformation that considered its creepiness at a random time t loaded at τ with constant compressive load $(t - \tau)$.

Considering these aspects we discovered the dependence ($\dot{A}_{\eta_0,t} > \dot{A}_{\eta_0,\tau}$) in identifying the heavy concrete creep characteristics with its aging considered. It reflects the actual work of concrete under the influence of long-acting constant compressive load more accurately when compared with its definition without aging considered.

The values of full $\varphi_{0,t,\tau}$ and limited $\varphi_{R,t,\tau}$ creep characteristics at any given time $(t - \tau)$ in the proposed dependence equals the stress level at $\eta_{\tau} = 0$ and $\eta_{\tau} = 1$ received by being approximated in the time period following the hyperbolic dependence. The statistical parameters of creep characteristics α_1 and n_1 with the approximated initial $\varphi_{0,t,\tau}$ do not depend on the kind of concrete and can be adopted $\alpha_1 = 0,0044$ и $n_1 = 0,5$.

The experiments by R. A. Miller and K. S. Karategin conducted with heavy concrete and processed with the proposed dependencies, proved that despite their different compositions the duration of the compressive load and the time of loading of expression to determine $\varphi_{0,t,\tau}$ and $\varphi_{e,t,\tau}$ are the same. The main variable parameters are limiting values of $\varphi_{0,\infty,\tau}$ and $\varphi_{R,\infty,\tau}$ that indicate the acceptability of the proposed dependencies for all kinds of heavy concrete.

*The solution of the problem of approximating $\varphi_{0,t,\tau}$ and $\varphi_{e,t,\tau}$ using exponents give better results but are more time-consuming. Hyperbolic dependencies to express $\varphi^*_{\eta,t,\tau}$ are recommended for practical applications.*

α_2 and n_2 parameters with approximated limited value $\varphi_{R,t,\tau}$ of creep properties depend on the type of concrete. We recommend $\alpha_2 = 0,01$ и $n_2 = 0,1$ for heavy concrete.

This dependence allowed us to identify theoretical values of the creep characteristics with aging considered for heavy concrete at every level where there is permanent compressive stress at any time of its action.

At the same time 20% security of the theoretical values received from the proposed dependence is 97%.

Keywords: elastic modulus, concrete, solution, structural scheme, concrete components.

Введение. В настоящее время в практике строительства всё чаще применяются железобетонные конструкции. Поэтому большую важность представляет собой вопрос проектирования и расчёта таких конструкций. С этой целью введены новые нормы расчёта и проектирования железобетонных конструкций. Одним из важных является вопрос определения напряжённо-деформированного состояния конструкций при длительном действии сжимающей нагрузки, так как фактически все они пребывают в таком состоянии.

Анализ последних источников исследований и публикаций. Напряженно-деформированное состояние тяжёлого бетона является функцией многих переменных, поэтому описания общих зависимостей между напряжениями и деформациями при действии длительной нагрузки можно получить на базе построения уравнений. Эти уравнения описывают процессы, происходящие в бетоне с учётом изменения во времени многих факторов. В своё время предпринимались попытки построения таких зависимостей. Однако мы ещё далеки от построения зависимости «напряжения – деформации», которая учитывала бы весь комплекс физических явлений и условий, определяющих эти зависимости.

Таким образом, в настоящее время разработаны теории ползучести бетона, основанные на феноменологических зависимостях между напряжениями и деформациями, полученными из опыта при определённых режимах длительных испытаний.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. В стадии эксплуатации в значительном количестве железобетонных элементов возникают длительно приложенные сжимающие напряжения, вследствие чего в бетоне появляются деформации ползучести. Вопрос их количественной оценки представляет практическую важность при расчёте и проектировании как обычных, так и предварительно напряжённых железобетонных конструкций. По тяжёлому бетону определения нелинейных деформаций ползучести без учёта его старения изложены авторами [1 – 3], но с учётом его старения таких исследований незначительное количество.

Авторами в работе [1] предложены аналитические зависимости для определения полных относительных силовых деформаций тяжёлого бетона в произвольный момент времени $(t - \tau)$ в зависимости от начального уровня $\eta_\tau = \sigma_\tau / f_{cd,\tau}$ сжимающей нагрузки:

$$\varepsilon_{\eta,t,\tau} = \frac{\sigma_\tau}{E_{cm,\tau} \left[\frac{1 - \eta_\tau}{1 + \phi_{0,t,\tau}} + \frac{v_\tau \sigma_\tau}{1 + R_{t,\tau}} \right]}, \quad (1)$$

где $E_{cm,\tau}$ – модуль упругости тяжёлого бетона в момент приложения длительно действующей нагрузки τ ;

v_τ – коэффициент упругости тяжёлого бетона в момент приложения длительно действующей нагрузки τ ;

$\phi_{0,t,\tau}$, $\phi_{R,t,\tau}$ – соответственно начальное и предельное значения характеристик ползучести тяжёлого бетона $\phi_{\eta,t,\tau}$ в любой момент времени действия сжимающей нагрузки $(t - \tau)$.

Цель работы – разработка на основе результатов эксперимента упрощённых феноменологических зависимостей для определения как линейных, так и нелинейных деформаций ползучести тяжёлого бетона с учётом его старения в произвольный момент времени действия сжимающей нагрузки $(t - \tau)$ и на любом относительном уровне η_τ приложения длительно действующей сжимающей нагрузки σ_τ .

Основной материал и результаты. Для решения поставленной задачи была забетонирована серия образцов-близнецов из бетона в виде призм размером 100×100×750 мм. На каждый начальный уровень обжатия $\eta_\tau = \sigma_\tau / f_{cd,\tau} = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ загружались по три образца-близнеца. Кроме этого, имелось

три образца, не подвергавшихся загрузке, предназначенные для определения деформаций свободной усадки $\varepsilon_{0,t,\tau}$, значения которых вычитались из деформаций, развивающихся под нагрузкой.

Исходя из определения ползучести тяжёлого бетона, его полная относительная деформация $\varepsilon_{\eta,t,\tau}$ при любом начальном уровне действия сжимающей нагрузки η_τ в любой момент времени её действия $(t - \tau)$ 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.

$$\varepsilon_{\eta,t,\tau} = \varepsilon_{\eta,\tau}^{el} + \varepsilon_{\eta,t,\tau}^{cr} \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\eta,t,\tau}$ – полная деформация тяжёлого бетона в момент времени $(t - \tau)$, нагруженного в возрасте τ до относительного уровня $\eta_\tau = \sigma_\tau / f_{cd,\tau}$.

Для количественной оценки деформации ползучести тяжёлого бетонам с учётом его старения, при действии постоянной сжимающей нагрузки различной интенсивности, служит характеристика ползучести $\phi_{\eta,t,\tau}^*$. В настоящее время характеристика ползучести тяжёлого бетона определяется в зависимости от принятой методики оценки деформаций ползучести через упруго-пластические и упругие деформации в возрасте τ и $t > \tau$, а также без учёта и с учётом естественного роста модуля упругости ($E_{cm,t} > E_{cm,\tau}$).

Явление ползучести тяжёлого бетона при постоянном длительно действующем напряжении σ_τ , приложенном в возрасте τ , математически можно выразить зависимостями (рис. 1):

$$\varepsilon_{\eta,t,\tau}^{*cr} = \varepsilon_{\eta,t,\tau} - \varepsilon_{\eta,t}^{el}, \quad \phi_{\eta,t,\tau}^* = \frac{\varepsilon_{\eta,t,\tau}^{*cr}}{\varepsilon_{\eta,t}^{el}} = \frac{E_{cm,t}}{E'_{\eta,t,\tau}} - 1 \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\eta,t}^{el}$ – относительная начальная (упругая) деформация тяжёлого бетона с учётом его старения при сжимающем напряжении σ_τ в возрасте $t > \tau$;

$\varepsilon_{\eta,t,\tau}^{*cr}$ – относительные деформации ползучести тяжёлого бетона с учётом его старения;

$\varepsilon_{\eta,t,\tau}$ – полные силовые относительные деформации тяжёлого бетона с учётом ползучести, нагруженного в возрасте τ до начального уровня η_τ в момент времени t при длительности действия постоянной сжимающей нагрузки $(t - \tau)$;

$E_{cm,t}$, $E'_{\eta,t,\tau}$ – модуль упругости и секущий модуль деформаций тяжёлого бетона при начальном уровне действия постоянной сжимающей нагрузки η_τ в возрасте $t > \tau$.

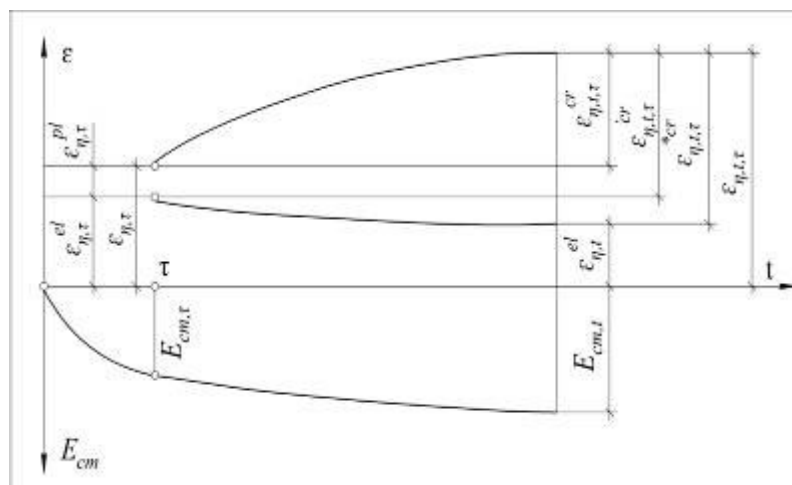


Рисунок 1 – Деформации ползучести тяжёлого бетона с учётом и без учёта его старения

Характеристика ползучести тяжёлого бетона с учётом его старения, определенная по формуле (3), которая учитывает старение бетона ($E_{cm,t} > E_{cm,\tau}$), более достоверно отражает работу бетона под воздействием постоянной длительно действующей сжимающей нагрузки, по сравнению с методиками без учёта его старения, изложенными в работе [1].

Исходя из экспериментально-статистических исследований авторов, значение $\phi_{\eta,t,\tau}$ можно записать в виде уравнения

$$\phi_{\eta,t,\tau}^* = \frac{E_{cm,t}}{E_{cm,\tau} \left[1 + \phi_{0,\infty,\tau} \frac{1-\eta_\tau}{\sqrt{1-\frac{1}{1+0.0044(t-\tau)}}} + \frac{\nu_{R,\tau} \eta_\tau}{1 + \phi_{R,\infty,\tau} \left[1 - \frac{1}{1+0.01(t-\tau)} \right]^{0.1}} \right]} - 1, \quad (4)$$

где $\nu_{R,\tau}$ – предельное при ($\sigma_\tau = f_{cd}$) значение коэффициента упругости тяжёлого бетона в момент приложения (τ) внешней нагрузки;

$\phi_{0,\infty,\tau}$, $\phi_{R,\infty,\tau}$ – начальное и предельное значения характеристик ползучести тяжёлого бетона в любой момент времени $t > \tau$ при длительности действия сжимающей нагрузки ($t - \tau$).

Аппроксимация экспериментально-статистических значений $\phi_{0,\infty,\tau}$ и $\phi_{R,\infty,\tau}$ во времени проведена по гиперболическим зависимостям:

$$\phi_{0,t,\tau} = \phi_{0,\infty,\tau} \left[1 - \frac{1}{1 + \alpha_1(t-\tau)} \right]^{n_1}, \quad (5)$$

$$\phi_{R,t,\tau} = \phi_{R,\infty,\tau} \left[1 - \frac{1}{1 + \alpha_2(t-\tau)} \right]^{n_2}, \quad (6)$$

где $\phi_{0,\infty,\tau}$ – начальное экспериментально-статистическое значение характеристики ползучести бетона в момент времени $(t - \tau) = \infty$ на уровне напряжений $\eta_\tau = \sigma_\tau / f_{cd} = 0$;

$\phi_{R,\infty,\tau}$ – предельное экспериментально-статистическое значение характеристики ползучести в момент времени $(t - \tau) = \infty$ на уровне напряжений $\eta_\tau = 1,0$;

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

За момент $(t - \tau) = \infty$ принята продолжительность испытаний 2 года, т.е. 720 суток.

Численные значения параметров α_1 , n_1 , α_2 , n_2 для исследуемого бетона были получены на основе корреляционного анализа зависимостей ($E'_{\eta,t,\tau} - \eta_\tau$) – (секущий модуль полных деформаций – начальный уровень длительного обжатия) и аппроксимации экспериментально-статистических значений $\phi_{0,\infty,\tau}$ и $\phi_{R,\infty,\tau}$ во времени по гиперболической и экспоненциальной зависимостям с использованием алгоритма оптимизации, основанного на критерии наименьших квадратов, в соединении с программой конечного элемента для деформаций и напряжений во времени.

В исследованиях Р.А. Мельника и К.С. Каратегина, проведенных с тяжёлым бетоном и обработанных по предлагаемым зависимостям, несмотря на их различные составы, продолжительность действия сжимающей нагрузки и времени загрузки, были использованы одинаковые выражения для определения $\phi_{0,t,\tau}$ и $\phi_{e,t,\tau}$. Основными изменяемыми параметрами являются предельные значения $\phi_{0,\infty,\tau}$ и $\phi_{R,\infty,\tau}$, которые указывают на приемлемость предлагаемых зависимостей для всех видов тяжёлых бетонов.

Решение поставленной задачи аппроксимации $\phi_{0,t,\tau}$ и $\phi_{e,t,\tau}$ при помощи экспоненты дает лучшие результаты, но являются более трудоёмкими. Для практического же использования рекомендованы гиперболические зависимости определения $\phi_{\eta,t,\tau}^*$.

При этом, как показали исследования, статистические параметры α_1 и n_1 при аппроксимации начального значения $\varphi_{0,t,\tau}$ характеристики ползучести не зависят от вида бетона и равны $\alpha_1 = 0,0044$ и $n_1 = 0,5$.

Значения параметров α_2 и n_2 при аппроксимации предельного значения $\varphi_{R,t,\tau}$ характеристики ползучести для тяжёлого бетона оказались равны $\alpha_2 = 0,02$ и $n_2 = 0,1$.

В таблице 1 приведены опытные и теоретические значения, по предлагаемой зависимости, характеристики ползучести $\varphi^*_{\eta,t,\tau}$ для исследуемого тяжёлого бетона с учётом изменения модуля упругости за счёт старения в зависимости от продолжительности $(t - \tau)$ действия сжимающей нагрузки и её интенсивности $\eta_\tau = \sigma_\tau / f_{cd,\tau}$.

Как видно из таблицы 1, предлагаемая формула даёт приемлемые результаты теоретической оценки характеристики ползучести тяжёлого бетона с учётом его старения. Пятипроцентная обеспеченность теоретических значений характеристик ползучести тяжёлого бетона $\varphi^*_{\eta,t,\tau}$ составляет 32%, а двадцатипроцентная обеспеченность – 97%.

Следовательно, значения характеристик ползучести тяжёлого бетона с учётом его старения дают лучшее схождение с опытом по сравнению с характеристикой ползучести тяжёлого бетона $\varphi_{\eta,t,\tau}$, полученной без учёта его старения. Это объясняется тем обстоятельством, что при определении характеристики ползучести тяжёлого бетона без учёта его старения $\varphi_{\eta,t,\tau}$ в деформации $\varepsilon_{\eta,\tau}$ вошла часть пластических деформаций $\varepsilon^{pl}_{\eta,\tau}$ в момент приложения нагрузки. Поэтому определение $\varphi_{\eta,t,\tau}$ без учёта пластических деформаций является малоприемлемым.

Характеристика ползучести тяжёлого бетона с учётом его старения, по сравнению с таким же её значением без учёта старения $\varphi_{\eta,t,\tau}$, на уровне относительного обжатия $\eta_\tau = 0,2$ больше на 47%, а при уровне относительного обжатия $\eta_\tau = 0,9$ – на 90% [1].

Как показывают экспериментально-статистические исследования, характеристика ползучести тяжёлого бетона с учётом его старения является функцией от начального уровня относительного обжатия и вырастает с увеличением этого уровня. Увеличение характеристик ползучести тяжёлого бетона с учётом его старения идёт по нелинейному закону, причём нелинейность с увеличением начального относительного уровня обжатия возрастает.

В дальнейшем целесообразно выполнить аналогичные исследования лёгких и песчаных бетонов, а также цементного камня по определению нелинейных деформаций ползучести с учётом их старения.

Выводы. Связь между деформациями ползучести и напряжениями при одноосном действии постоянной сжимающей нагрузки с учётом ползучести является нелинейной из самых низких уровней длительного сжатия.

Характеристика ползучести тяжёлого бетона при действии длительных постоянных напряжений сжатия в произвольный момент времени $(t - \tau)$ является функцией начального относительного уровня его обжатия.

Нелинейные деформации ползучести тяжёлого бетона зависят от методики их оценки. Пятипроцентная их обеспеченность без учёта старения по предлагаемым зависимостям бетона составляет почти 80%.

Методика определения характеристик ползучести тяжёлого бетона с учётом его старения даёт более приемлемые результаты её оценки относительно других методик.

Значение характеристики ползучести тяжёлого бетона с учётом его старения в существенно нелинейной области $\varphi^*_\tau = 0,9$ и $(t - \tau) = 660$ суток больше по сравнению с характеристикой ползучести тяжёлого бетона без учёта его старения в 1,5 раза.

**Таблица 1 – Опытные и теоретические значения
характеристики ползучести тяжёлого бетона**

К-во вре- мени (t-τ)	Способ опреде- ления	$\varphi_{\eta,t,\tau}^*$									
		$\eta_{\tau} = \sigma_{\tau} / f_{cd,\tau}$									
		0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
0	опытн.	-	0,150	0,188	0,315	0,379	0,494	0,716	0,923	1,037	1,367
	теорет.	0,000	0,131	0,209	0,300	0,407	0,530	0,678	0,861	1,083	-
	Δ %	-	-12,0	+11,1	-4,8	+7,4	+7,3	-5,3	-6,7	+4,5	-
2 ч	опытн.	-	0,169	0,277	0,380	0,532	0,734	1,081	1,458	1,817	-
	теорет.	0,032	0,207	0,319	0,453	0,618	0,825	1,093	1,453	1,963	2,740
	Δ %	-	+22,3	+15,0	+19,2	+16,2	+12,4	+1,2	-0,3	+8,0	-
12 ч	опытн.	-	0,216	0,347	0,486	0,627	0,833	1,197	1,569	2,063	-
	теорет.	0,081	0,267	0,385	0,529	0,705	0,927	1,216	1,607	2,165	3,026
	Δ %	-	+23,5	+10,9	+8,8	+12,4	+11,2	+1,6	+2,4	+4,9	-
1 с	опытн.	-	0,245	0,387	0,516	0,727	0,918	1,294	1,642	2,290	-
	теорет.	0,115	0,307	0,429	0,577	0,459	0,988	1,286	1,689	2,265	3,154
	Δ %	-	+25,0	+10,7	+11,7	+4,4	+7,7	-0,7	+2,8	-1,1	-
4 с	опытн.	-	0,391	0,532	0,717	0,909	1,110	1,483	1,839	2,511	-
	теорет.	0,233	0,441	0,574	0,734	0,930	1,177	1,495	1,922	2,526	3,444
	Δ %	-	+12,7	+8,0	+2,4	+2,3	+6,0	+0,8	+4,5	+0,6	-
7 с	опытн.	-	0,497	0,671	0,797	0,998	1,311	1,674	1,985	2,722	-
	теорет.	0,316	0,535	0,674	0,842	1,046	1,302	1,631	2,069	2,682	3,602
	Δ %	-	+7,6	+0,6	+5,6	+4,9	-0,7	-2,6	+4,2	-1,5	-
15 с	опытн.	-	0,765	0,920	1,058	1,268	1,627	1,957	2,314	3,012	-
	теорет.	0,503	0,746	0,900	1,083	1,306	1,582	1,935	2,394	3,027	3,950
	Δ %	-	-2,5	-2,2	+2,4	+2,9	-2,8	-1,2	+3,4	+0,5	-
30 с	опытн.	-	0,986	1,178	1,298	1,523	1,831	2,152	2,628	3,270	-
	теорет.	0,714	0,981	1,148	1,346	1,583	1,875	2,240	2,712	3,346	4,239
	Δ %	-	-0,5	-1,8	+3,6	+3,9	+2,4	+4,1	+3,2	+2,3	-
60 с	опытн.	-	1,330	1,512	1,660	1,908	2,252	2,568	3,052	3,657	-
	теорет.	1,012	1,308	1,491	1,706	1,961	2,270	2,650	3,130	3,756	4,605
	Δ %	-	-1,6	-1,4	+2,8	+2,8	+0,8	+3,1	+2,6	+2,7	-
180 с	опытн.	-	1,710	1,929	2,175	2,333	2,623	2,968	3,491	4,016	-
	теорет.	1,468	1,793	1,990	2,216	2,479	2,789	3,160	3,612	4,173	4,890
	Δ %	-	+4,8	+3,1	+1,9	+6,2	+6,4	+6,5	+3,5	+3,9	-
300 с	опытн.	-	2,230	2,356	2,587	2,858	3,152	3,602	4,036	4,510	-
	теорет.	1,745	2,087	2,292	2,527	2,797	3,112	3,485	3,931	4,476	5,157
	Δ %	-	-6,4	-2,7	-2,3	-2,1	-1,2	-3,2	-2,6	-0,8	-
480 с	опытн.	-	2,484	2,695	3,045	3,366	3,621	3,965	4,285	5,024	-
	теорет.	1,994	2,351	2,564	2,805	3,082	3,402	3,776	4,220	4,755	5,412
	Δ %	-	- 5,7	-4,8	-7,9	-8,4	-6,0	-4,8	-1,5	-5,4	-
660 с	опытн.	-	2,794	3,106	3,329	3,820	4,084	4,472	4,666	5,407	-
	теорет.	2,296	2,679	2,907	3,164	3,458	3,796	4,190	4,654	5,209	5,885
	Δ %	-	-4,1	-6,4	-4,9	-9,5	-7,1	-6,3	-0,2	-3,7	-
	опытн.	2,531	2,531	3,144	3,377	3,660	3,967	4,336	4,741	5,223	-
	теорет.										5,902
	Δ %										-

Литература

1. Битько Н. М. К вопросу определения нелинейных деформаций ползучести тяжёлого бетона без учёта его старения и наследственности / Н. М. Битько, О. В. Кузнецова, В. Н. Величко // Бетон и железобетон в Украине. – Полтава, 2007. – № 4. – С. 9 – 13.
2. Битько Н. М. К вопросу определения нелинейных деформаций ползучести аглопоритобетона без учёта его старения и наследственности / Н. М. Битько, О. В. Кузнецова, В. В. Бойко // Вісник ЧДТУ. – Черкаси, 2006. – № 2. – С. 3 – 7.
3. Битько Н. М. Напряженно-деформированное состояние аглопоритобетона при длительном сжатии различной интенсивности / Н. М. Битько, О. В. Кузнецова // Бетон и железобетон в Украине. – Полтава, 2004. – № 1. – С. 25 – 30.
4. Галустов К. З. Об особенностях учёта упругих деформаций в нелинейных теориях ползучести бетона / К. З. Галустов // Вестник отделения строительных наук РАН. – 2008. – № 3. – С. 57 – 60.
5. Галустов К. З. Учёт ползучести бетона при расчёте железобетонных конструкций АЭС / К. З. Галустов // Бетон и железобетон. – 2007. – № 3. – С. 33 – 38.
6. Гурьева Ю. А. Некоторые приложения упрощённой теории нелинейной ползучести нестареющего бетона при сжатии / Ю. А. Гурьева // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – № 6. – С. 52 – 53.
7. ДСТУ Б.В.2.7-216:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення деформацій усадки та повзучості. – К. : Мінрегіонбуд, 2010. – 11 с.
8. Элистров В. Н. К вопросу расчёта сжатых железобетонных элементов с учётом мгновенной линейной и нелинейной ползучести бетона / В. Н. Элистров // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 18 – 21.
9. Харлаб В. Д. Теория нелинейной ползучести и длительной прочности нестареющего бетона при сжатии / В. Д. Харлаб // Вестник гражданских инженеров. – 2007. – № 3. – С. 19 – 21.
10. Alexander K. M. Range in concrete creep when cement SO₃ content, curing temperature and fly ash content are varied / K. M. Alexander, K. I. Wardlaw, I. A. Ivanuses // Cem. and Concr. Res. – 1986. – №2. – P. 173 – 180.
11. Galustov K. Z. Underwater nuclear power plants: improved safety environmental compatibility, and efficiency / K. Z. Galustov // American Nuclear Society author recognition this certificate presenter at the ans Meeting – San Francisco, 1991.
12. Castellani A. Beams with corroded reinforcement: Evaluation of the effects of cross-section losses and bond deterioration by finite element analysis / A. Castellani, D. Coronelli // Structural Faults and Repair. – London, 1999. – P. 104 – 109.
13. Rossi P. Une nouvelle approche concernant le fluage et la relaxation propres du beton / P. Rossi // Bull Liais. Lab. puts et chaussées. – 1988. – № 153. – P. 73 – 76.
14. Horrigmoe G. Assessment of the performance and safety of deteriorated concrete structures / G. Horrigmoe // Concrete Solutions: Conference Proc. and Papers 1st Intern. Conf. on Concrete Repair (St-Malo, France, 15–17 July 2003). – London, Published by GR Technologie Ltd, 2003. – P. 209 – 223.

© Битько Н.М., Кузнецова О.В., Бойко В.В.

Надійшла до редакції 05.02.2016