

**Н. М. Битько**, к.т.н., доцент,

e-mail: bitkonm@mail.ru

**О. В. Кузнецова**, ассистент,

e-mail: kuznes-68@mail.ru

**В. В. Бойко**, старший преподаватель,

e-mail: boykin.valentina@gmail.com

Черкасский государственный технологический университет

бул. Шевченка, 460, г. Черкассы, 18006, Украина

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕКУЩЕГО МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ЦЕНТРАЛЬНОМ СЖАТИИ НАГРУЗКОЙ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

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

*Исходя из линейных зависимостей  $E'_{\eta,t,\tau} - \eta_\tau$  получены теоретические значения секущих модулей деформаций  $E'_{\eta,t,\tau}$  при относительных начальных уровнях напряжений  $\eta_\tau = 0 - E'_{o,t,\tau}$  и  $\eta_\tau = f_{cd} - E'_{R,t,\tau}$  которым соответствуют начальное  $\Phi_{o,t,\tau}$  и предельное  $\Phi_{R,t,\tau}$  значение характеристик ползучести.*

*Получена аналитическая зависимость для теоретического определения секущего модуля полных деформаций тяжелого бетона  $E'_{\eta,t,\tau}$  при действии сжимающей загрузки начального уровня напряжений  $\eta_\tau < 0,9f_{cd}$  в любой момент ее действия  $(t - \tau)$ .*

*Численные значения параметров входящих в аналитическую зависимость получены на основе корреляционного анализа зависимостей  $E'_{\eta,t,\tau} - \eta_\tau$  и аппроксимации опытных корреляционных кривых  $\Phi_{o,t,\tau}$  и  $\Phi_{R,t,\tau}$  во времени.*

**Ключевые слова:** тяжелый бетон, секущий модуль, напряжения, уровень напряжений, характеристика ползучести.

**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, определении 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 тяжелого 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 бетоне с учетом изменения во времени многих факторов. В свое время имелись попытки построения таких зависимостей [2]. Однако, мы еще далеки от построения зависимости «напряжение-деформации», которая учитывала бы весь комплекс физических явлений и условий, определяющих эти зависимости.

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

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

**Изложения основного материала.** Для решения этой задачи была забетонирована серия образцов близнецов в виде призм размером 100x100x750 мм. На каждый начальный уровень обжатия ( $\eta_\tau = \frac{\sigma_\tau}{f_{cd,\tau}} = 0; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ) 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, 2ч, 12ч, 1с, 4с, 7с, 15с, 30с, 60с, 120с, 180с, 240с, 300с, 480с, 660 суток.

Исходя из определения ползучести бетонов, его полная относительная деформация при любом начальном уровне действия сжимающей нагрузки  $\eta_\tau$  в любой момент времени  $(t - \tau)$   $\varepsilon_{\eta,t,\tau}$  равна сумме начальной деформации  $\varepsilon_{\eta\tau}^{el}$ , возникшей в момент приложе-

ния 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 бетона в момент времени  $(t - \tau)$ , загруженного в возрасте  $\tau$  до относительного уровня  $\eta_\tau = \frac{\sigma_\tau}{f_{cd,\tau}}$ ;

$\varepsilon_{\eta\tau}^{el}$  – начальная (упругая) деформация бетона в момент загрузки  $\tau$  до относительного уровня  $\eta_\tau$ ;

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

В большинстве случаев за упругие деформации 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 ползучести бетона, при действии постоянной сжимающей нагрузки различной интенсивности, служит характеристика  $\varphi_{\eta,t,\tau}$  или мера ползучести  $c_{\eta,t,\tau}$ , которые равны:

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

где  $\sigma_\tau$  – напряжение.

Задача установления зависимости между напряжениями и деформациями в тяжелом бетоне при длительном действии нагрузки решалась авторами путем исследования изменения во времени секущего модуля упругопластичности с учетом деформаций ползучести, значение которого определялось по формуле:

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

где  $E'_{\eta,t,\tau}$  – секущий модуль упругопластичности бетона в момент времени  $(t - \tau)$ , загруженного в возрасте  $\tau$  на начальный относительный уровень сжимающей нагрузки  $\eta_\tau$ .

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

Как показала статистическая обработка результатов испытаний тяжелого 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  $\sigma_\tau$  или начальными уровнями напряжений  $\eta_\tau$ .

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

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

где  $E'_{\eta,\tau}$  – секущий модуль деформаций в момент загрузки  $\tau$  при относительном уровне напряжений  $\eta_\tau$ ;

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

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

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

Для теоретического определения значения секущего модуля деформаций  $E'_{\eta,t,\tau}$  в любой момент времени  $t$  и продолжительности действия сжимающей нагрузки  $(t - \tau)$  на любом начальном уровне  $\eta_\tau$ , 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  $(t - \tau)$ .

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

По аналогии с (6) при  $\eta_\tau = 0$

$$\frac{E_{o,\tau}}{E_{o,t,\tau}} = 1 + \varphi_{o,t,\tau}, \quad (7)$$

при  $\eta_\tau = 1$

$$\frac{E'_{R,\tau}}{E'_{R,t,\tau}} = 1 + \varphi_{R,t,\tau}, \quad (8)$$

где  $\varphi_{o,t,\tau}$  и  $\varphi_{R,t,\tau}$  – соответственно начальное и предельное значение характеристик ползучести бетонов  $\varphi_{\eta,t,\tau}$ , полученные из корреляционных уравнений (4) и (5) с использованием уравнений (7) и (8) в любой момент времени  $(t - \tau)$ , т.е.

$$\varphi_{o,t,\tau} = \frac{E_{o,\tau}}{E_{o,t,\tau}} - 1 \quad (9)$$

$$\varphi_{R,t,\tau} = \frac{E'_{R,\tau}}{E'_{R,t,\tau}} - 1 \quad (10)$$

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

$$\varphi_{o,t,\tau} = \varphi_{o,\infty,\tau} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \alpha_1(t - \tau)} \right]^{n_1} \quad (11)$$

$$\varphi_{R,t,\tau} = \varphi_{R,\infty,\tau} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \alpha_2(t - \tau)} \right]^{n_2} \quad (12)$$

В формулах (11) и (12):

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

$\varphi_{R,\infty,\tau}$  – предельное значение характеристики ползучести бетонов 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  $\alpha_1$ ;  $\alpha_2$ ;  $n_1$ ;  $n_2$  получены на основе корреляционного анализа зависимости  $E'_{\eta,t,\tau} - \eta_\tau$  (секущий модуль полных деформаций – начальный уровень длительного обжатия) и аппроксимации опытно-корреляционных кривых  $\varphi_{o,t,\tau}$  и  $\varphi_{R,t,\tau}$  во времени с использованием алгоритма оптимизации, основанного на критерии наименьших квадратов в соединении с программой конечного элемента для деформаций и напряжений, при помощи ЭВМ.

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

$$\begin{aligned} \varphi_{o,t,\tau} &= \varphi_{o,\infty,\tau} \left[ 1 - \frac{1}{1 + 0,0044(t - \tau)} \right]^{0,5} = \\ &= \varphi_{o,\infty,\tau} \sqrt{1 - \frac{1}{1 + 0,0044(t - \tau)}} \end{aligned} \quad (13)$$

Величины параметров  $\alpha_2$  и  $n_2$  зависят от вида бетона и для тяжелого бетона их значения составили по скаляру соответственно  $\alpha_2 = 0,01$  и  $n_2 = 0,10$ , т.е.

$$\varphi_{R,t,\tau} = \varphi_{R,\infty,\tau} \left[ 1 - \frac{1}{1 + 0,01(t - \tau)} \right]^{0,1} \quad (14)$$

Для использования вышеуказанных зависимостей для других видов бетонов, необходимо произвести дополнительные исследования с целью установления для них вышеуказанных  $\alpha_1$ ;  $\alpha_2$ ;  $n_1$ ;  $n_2$ .

Исходя из вышеизложенных исследований, теоретическое значение секущего модуля полных деформаций  $E'_{\eta,t,\tau}$  при произвольном относительном уровне действия постоянной сжимающей нагрузки  $\eta_\tau < 0,9$  в любой мо-

мент ее действия  $(t - \tau)$  можно получить исходя из формулы (5) с учетом формул (7) и (8) в виде:

$$\begin{aligned} E'_{\eta,t,\tau} &= E_{o,t,\tau} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{E'_{R,t,\tau}}{E_{o,t,\tau}} \right) \eta_\tau \right] = \\ &= \frac{E_{o,\tau}}{1 + \varphi_{o,t,\tau}} \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{E'_{R,\tau}(1 + \varphi_{o,t,\tau})}{E_{o,\tau}(1 + \varphi_{R,t,\tau})} \right] \eta_\tau \right\} = \\ &= E_{o,\tau} \left[ \frac{1 - \eta_\tau}{1 + \varphi_{o,t,\tau}} + \frac{E'_{R,\tau} \eta_\tau}{E_{o,\tau}(1 + \varphi_{R,t,\tau})} \right] = \\ &= E_{o,\tau} \left[ \frac{1 - \eta_\tau}{1 + \varphi_{o,t,\tau}} + \frac{v_{R,\tau} \eta_\tau}{1 + \varphi_{R,t,\tau}} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

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

$$v_{R,\tau} = \frac{E'_{R,\tau}}{E_{o,\tau}} = \frac{\varepsilon_{R,\tau}^{el}}{\varepsilon_{R,\tau}} \quad \text{– предельное (при}$$

$\sigma_\tau = f_{cd}$ ) значение коэффициента упругости тяжелого бетона в момент времени  $\tau$ .

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

$$E'_{\eta,t,\tau} = E_{o,\tau} \left[ \frac{\frac{1 - \eta_\tau}{1 + \varphi_{o,t,\tau} \sqrt{1 - \frac{1}{1 + 0,0044(t - \tau)}}} + \frac{v_{R,\tau} \eta_\tau}{1 + \varphi_{R,t,\tau} \left[ 1 - \frac{1}{1 + 0,01(t - \tau)} \right]^{0,1}}}{1 + \varphi_{R,t,\tau} \left[ 1 - \frac{1}{1 + 0,01(t - \tau)} \right]^{0,1}} \right] \quad (16)$$

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

Секущие модули силовых деформаций  $E'_{\eta,t,\tau}$   $10^4$  МПа с учетом ползучести  
в тяжелом бетоне в зависимости от продолжительности действия сжимающей

нагрузки  $(t - \tau)$  и начального уровня обжатия  $\eta_\tau = \frac{\sigma_\tau}{f_{cd,\tau}}$

Суток ( $t - \tau$ )	Способ опреде- ления	$\eta_\tau = \frac{\sigma_\tau}{f_{cd,\tau}}$									
		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
	$\Delta \%$	-	+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
	$\Delta \%$	-	+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
	$\Delta \%$	-	-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
	$\Delta \%$	-	-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
	$\Delta \%$	-	+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
	$\Delta \%$	-	+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
	$\Delta \%$	-	-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
	$\Delta \%$	-	-1,6	+0,1	-0,7	+3,4	+1,7	+1,2	-3,6	-0,6	-
$\infty$		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 при длительном центральном сжатии нагрузкой различной интенсивности является линейной корреляционной.

Исходя из длительных испытаний образцов при двух начальных уровнях действия сжимающей нагрузки, можно прогнозировать деформативные характеристики тяжелого бетона на любом произвольном уровнях действия сжимающей нагрузки. Это позволяет существенно уменьшить количество опытных образцов и трудоемкость эксперимента, а также решить целый ряд задач в области нелинейной ползучести бетонов.

В дальнейшем целесообразно выполнить аналогичные исследования для других видов бетонов.

Накопленные результаты экспериментов могут быть использованы при совершенствовании норм по расчету и проектированию железобетонных конструкций.

#### Список литературы

- ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення, Київ, Мінрегіонбуд України, 2009.
- Гвоздев А.А. Замечание о нелинейной теории ползучести бетона при одноосном сжатии / А.А. Гвоздев // Известия АН СССР, серия «Механика твердого тела». – М., «Наука». – № 5. – 1972.
- Макаренко Л.П. Графо-аналитический способ определения модуля упругости бетона при наличии трещин / Л.П. Макаренко, Г.А. Фенко // Известия высших учебных заведений, // раздел «Строительство и архитектура». – № 8, 1972.
- Карапетян К.С. Ползучесть бетона при высоких напряжениях / К.С. Карапетян. – Изд-во А.Н. Армейской ССР – Том III, №2. – 1953. – (Серия: физико-математические науки)
- Мельник Р.А. Экспериментальное исследование нелинейной ползучести бетона / Р.А. Мельник // Сборник научных трудов КИСИ. – Вып. 16. – 1961.
- Харлаб В. Д. Теория нелинейной ползучести и длительной прочности нестареющего бетона при сжатии / В. Д. Харлаб // Вестник гражданских инженеров. – 2007. – № 3. – С. 19 – 21.
- Alexander K. M. Range in concrete creep when cement SO<sub>3</sub> content, curing temperature and fly ash content are varied / K. M. Alexander, K. I. Wardlaw, I. A. Ivanuses // Cem. And Coucr. Res. – 1986. – №2. – P. 173 – 180.
- 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.
- Castellani A., Coronelli D. Beams with corroded reinforcement: Evaluation of the effects of cross-section losses and bond deterioration by finite element analysis. Structural Faults and Repair –99, London, UK, July, 1999, P.104–109.
- 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.
- Horrigmoe G. Assessmant of the performance and safety of deteriorated concrete structures. Concrete Solutions: Conference Proceedings and Papers 1<sup>st</sup> International Conference on Concrete Repair, St –Malo, France, 15-17 July 2003. – Published by GR Technologie Ltd, London, UK, 2003. – P. 209 – 223.

#### References

- DBN V.2.6-98:2009 Betonni ta zalizobetonni konstruktsiyi. Osnovni polozhennya, Kyviv, Minrehionbud Ukrayiny, 2009.
- Hvozdev A.A. Zamechanye o nelyneynoy teoryy polzuchesty betona pry jednoosnom szhatyy // Yzvestyya AN SSSR, seryya «Mekhanyka tverdoho tela». – М., «Nauka», # 5, 1972.
- Makarenko L.P., Fenko H.A. Hrafo-analytycheskyy sposob opredelenyya modulya upruhosty betona pry nalychyuy treshchyn // Yzvestyya vysshyykh uchebnykh zavedenyyu, // razdel «Stroytel'stvo y arkhytektura». - # 8, 1972.
- Karapetyan K.S. Polzuchest' betona pry vysokyykh napryazhenyyakh. Yzdatel'stvo A.N. Armeyskoy SSR, seryya fyzyko-matematycheskye nauky, Tom III, #2, 1953.
- Mel'nyk R.A. Eksperymental'noe yssledovanye nelyneynoy polzuchesty betona.

- Sbornyk nauchnykh trudov KYSY, Выр. 16, 1961.
6. Kharlab V. D. Teoryya nelyneynoy polzuchesty y dlytel'noy prochnosti nestareyu-shcheho betona pry szhaty / V. D. Kharlab // Vestnyk hrazhdanskykh ynzhenyrov. – 2007. – # 3. – S. 19 – 21.
  7. Alexander K. M. Range in concrete creep when cement SO<sub>3</sub> content, curing temperature and fly ash content are varied / K. M. Alexander, K. I. Wardlaw, I. A. Ivanuses // Cem. And Coucr. Res. – 1986. – #2. – R. 173 – 180.
  8. 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.
  9. Castellani A., Coronelli D. Beams with corroded reinforcement: Evaluation of the effects of cross-section losses and bond deterioration by finite element analysis. Structural Faults and Repair –99, London, UK, July, 1999, R.104-109.
  10. Rossi P. Une nouvelle approche concernant le fluage et la relaxation propres du beton./ P. Rossi // Bull Liais. Lab. puts et chaussées. – 1988. – # 153. – R. 73 – 76.
  11. Horrigmoe G. Assessment 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. – R. 209 – 223.

**M. Bitko**, Ph.D., Associate Professor,  
bitkonm@mail.ru

**O. V. Kuznetsova**, Assistant  
kuznes-68@mail.ru

**V. V. Boiko**, Senior Lecturer  
boykin.valentina@gmail.com

Cherkasy State Technological University  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

### EXPERIMENTAL AND STATISTICAL RESEARCH OF SECANT MODULUS OF HEAVY CONCRETE DEFORMATIONS AT LONG CENTRAL COMPRESSION BY VARYING INTENSITY LOADS

*There are given the results of experimental and statistical studies of secant stress-strain modulus of heavy concrete with a long central compression load of varying intensity.*

*The statistical analysis of the results for the long-term testing of heavy concrete allowed to establish a reliable linear correlation between secant stress-strain modulus  $E_{\eta,t,\tau}$  and the initial level of stress  $\eta_\tau$  in the long central compression under constant pressure  $\sigma_\tau$ .*

*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  $\sigma_\tau = 0 - E_{o,t,\tau}$  and  $\sigma_\tau = f_{cd} - E'_{Rt,\tau}$  with corresponding  $\varphi_{o,t,\tau}$  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 heavy concrete  $E'_{\eta,t,\tau}$  under constant squeezing load the initial level of stress  $\eta_\tau < 0,9f_{cd}$  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  $\varphi_{o,t,\tau}$  and  $\varphi_{R,t,\tau}$  over time.*

Concrete and reinforced concrete structures are main modern building materials. That is the reason for precise attention to calculations and design of such structures. One of the most important issues is the study of stressed-strain state of constructions during long-lasting pressure of different intensity.

The authors demonstrate results of experimental and statistic studies of performance of heavy concrete under long-lasting compressive load. Based on the above, the linear correlative dependence between the secant modulus of full deformations  $E'_{\eta,t,\tau}$  and initial relative stress level

$$\eta_{\tau} = \frac{\sigma_{\tau}}{f_{cd,\tau}} \text{ was defined.}$$

Based on linear dependence  $E'_{\eta,t,\tau} - \eta_{\tau}$  theoretical figures of secant modulus of deformations  $E'_{\eta,t,\tau}$  for relative initial stress level were obtained,  $\eta_{\tau} = 0 - E_{o,t,\tau}$  and  $\eta_{\tau} = f_{cd} - E'_{R,t,\tau}$  corresponding to initial  $\Phi_{o,t,\tau}$  and limiting  $\Phi_{R,t,\tau}$  creep characteristics.

Based on correlation analysis of dependences  $E'_{\eta,t,\tau} - \eta_{\tau}$  and approximation of experimental-correlative curves  $\Phi_{o,t,\tau}$  and  $\Phi_{R,t,\tau}$  in time the hyperbolic dependence was obtained to define secant modulus of total deformation of heavy concrete  $E'_{\eta,t,\tau}$  under compressive load of level  $\eta_{\tau} < 0,9_{fcd}$  at any time  $(t - \tau)$ . The obtained results  $E'_{\eta,t,\tau}$  as for the suggested dependence were compared with experimental figures. Deviation did not exceed 10%.

**Key words:** heavy concrete, secant modulus, pressure, stress level, creep characteristics.

Рецензенты: Донченко П.А., к.т.н., профессор,  
Голоднов А.И., д.т.н., профессор.