

**СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ КАРПЕНКО**

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем прочности и качества в строительстве, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Москва, Российская Федерация)  
*niisf\_lab9@mail.ru*

**АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ПЕТРОВ**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*petr@psu.karelia.ru*

**АННА ВЛАДИМИРОВНА ЕВСЕЕВА**

инженер кафедры архитектуры, строительных конструкций и геотехники строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*evseevaanna@list.ru*

**ДИАГРАММЫ-ИЗОХРОНЫ ВЫСОКОПРОЧНОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА\***

Решение задач длительного деформирования железобетонных конструкций с применением нелинейных теорий ползучести сопряжено со значительными математическими трудностями. Целью исследования является разработка диаграммного подхода к расчету железобетонных конструкций на длительные нагрузки. В рамках общего подхода к описанию полной диаграммы деформирования бетона, сделанного Н. И. Карпенко, предложены эмпирические зависимости по описанию диаграмм-изохрон высокопрочного модифицированного бетона при длительном нагружении. Показано хорошее соответствие экспериментальных и теоретических данных. Полученные зависимости рекомендуются в качестве расчетного аппарата при проектировании железобетонных конструкций.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, ползучесть, высокопрочный модифицированный бетон, длительное нагружение, диаграммы-изохроны

Экспериментальные исследования по изучению свойств высокопрочных бетонов, модифицированных на органоминеральной основе, проведенные в последние годы Н. И. Карпенко, С. С. Каприеловым, И. М. Безгодовым, Е. Н. Кузнецовым, А. А. Андриановым, Д. С. Ромкиным и другими, подтвердили установленные ранее закономерности нелинейной ползучести бетона: инвариантность быстроснатекающих деформаций относительно возраста бетона в момент нагружения и противоречие принципу наложения воздействий. Эти обстоятельства создают существенные трудности при решении задач ползучести на базе общих нелинейных теорий, в частности двухкомпонентной модели [1]. Указанных противоречий при решении задач длительного деформирования можно избежать, если использовать так называемый диаграммный подход с представлением диаграмм деформирования бетона в виде диаграмм-изохрон.

Диаграммой-изохроной деформирования бетона называется кривая в координатах деформации-напряжения, все точки которой достигаются за равный промежуток времени – время нагружения. В общем случае при построении диаграмм-изохрон различают три условных ре-

жима нагружения: при действии постоянных напряжений, при линейном росте напряжений и при линейном росте деформаций. Поведение бетона при действии постоянных напряжений изучено наиболее полно, однако в реальных конструкциях такой режим практически не встречается. Второй режим существенно ближе к условиям реального нагружения, но сложен технически при проведении экспериментов. Последний режим нагружения, технически наиболее сложный, позволяет получить исчерпывающие данные о деформативных свойствах материала и выйти на нисходящую ветвь диаграммы деформирования.

Если длительность действия нагрузки не превышает одних суток, диаграммы-изохроны всех трех режимов практически совпадают с диаграммой кратковременного нагружения. В дальнейшем, с увеличением времени нагружения, зависимость диаграммы-изохроны от режима изменения напряжений становится более существенной, однако после примерно 100 суток нагружения эта разница практически исчерпывается. Учитывая практическую направленность задачи, предлагаемые в настоящей работе зависимости предполагают постоянство дейст-

вующих напряжений в течение всего времени нагружения, при этом теоретически допускается возможность работы бетона на нисходящей ветви диаграммы.

Связь между напряжениями и относительными деформациями бетона, выраженная через коэффициент секущего модуля, в наиболее общем виде предложена Н. И. Карпенко [2]. Для диаграмм-изохрон эта зависимость приобретает вид

$$\varepsilon_b(t, \tau) = \frac{\sigma_b(\tau)}{E_b(t, \tau)v_b(t - \tau)}, \quad (1)$$

где  $t$  – текущее время,  $\tau$  – возраст бетона в момент нагружения,  $(t - \tau)$  – время нагружения.

Коэффициент секущего модуля определяется по формуле

$$v_b(t - \tau) = \hat{v}_b(t, \tau) \pm [v_0 - \hat{v}_b(t, \tau)] \sqrt{1 - \omega_1(t, \tau)\zeta - \omega_2(t, \tau)\eta^2}, \quad (2)$$

где  $\eta = \sigma_b(\tau) / R_b(t, \tau)$  – уровень напряжений в момент времени  $t$ .

Знак «плюс» соответствует восходящей, а «минус» – нисходящей ветви диаграммы-изохроны. Кроме этого, требуется соблюдение очевидного равенства

$$\varpi_1(t, \tau) + \varpi_2(t, \tau) = 1.$$

Коэффициент секущего модуля в вершине диаграммы-изохроны

$$\hat{v}_b(t, \tau) = R_b(t, \tau) / E_b(t, \tau)\varepsilon_{b0}(t, \tau), \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{b0}(t, \tau)$  – абсцисса вершины.

Ордината вершины диаграммы-изохроны определяется по эмпирической формуле, учитывающей экспериментально установленное снижение прочности бетона в условиях длительного нагружения

$$R_b(t, \tau) = [k + (1 - k)\phi(t - \tau)]R_b(\tau), \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент, отражающий экспериментально установленные пределы снижения прочности бетона при длительном нагружении и изменяющийся от 0,9 до 0,75. При практическом проектировании рекомендуется принимать  $k = 0,85$ ;  $\phi(t - \tau)$  – эмпирическая функция.

Анализ экспериментальных данных показал, что в диапазоне изменения времени нагружения от 1 мин и практически до бесконечности функция  $\phi(t - \tau)$  может быть аппроксимирована простой зависимостью, линейной относительно логарифма времени нагружения

$$\phi(t - \tau) = 1,46 - 0,122 \ln(t - \tau), \quad (5)$$

где  $(t - \tau)$  – время нагружения в минутах.

На функцию (5) накладывается ограничение  $\phi(t - \tau) \leq 1$ .

В условиях длительного нагружения полные деформации бетона складываются из двух составляющих – линейно-упругой и нелинейной. Линейно-упругая незначительно снижается в соответствии со снижением  $R_b(t, \tau)$ , а нелинейная нарастает в результате ползучести бетона. Приращение нелинейной составляющей существенно превосходит соответствующее снижение линейно-упругой во всех практически важных для расчета случаях (нарушение этого соотношения возможно только при очень высоких скоростях нагружения). Такой характер деформирования позволяет предложить для описания роста абсциссы вершины диаграммы-изохроны простую зависимость, аналогичную (4):

$$\varepsilon_{b0}(t, \tau) = \varepsilon_{b0}(\tau)\psi(t - \tau), \quad (6)$$

$$\text{где } \psi(t - \tau) = 0,76 + 0,059 \ln(t - \tau). \quad (7)$$

Параметры формулы (2), определяющие форму ветвей диаграммы-изохроны, также выражаются через функции, линейные относительно логарифма времени нагружения: для восходящей ветви

$$\varpi_1(t, \tau) = \left[ 1,25 - 0,1 \frac{R_b(t, \tau)}{R_0} \right] [0,67 + 0,081 \ln(t - \tau)] \leq 2, \quad (8)$$

для нисходящей ветви

$$\varpi_1(t, \tau) = \left[ 0,35 + 0,22 \frac{R_b(t, \tau)}{R_0} \right] [1,2 + 0,048 \ln(t - \tau)] \leq 2, \quad (9)$$

где  $R_0 = 9,8$  МПа.

Зависимости (1)–(9) использованы для построения диаграмм-изохрон высокопрочного модифицированного бетона, реологические свойства которого были экспериментально исследованы в лаборатории проблем прочности и качества в строительстве НИИСФ РААСН. Для изготовления образцов-призм  $100 \times 100 \times 400$  мм использовалась бетонная смесь с содержанием цемента 497 кг / куб. м и водоцементным отношением 0,128. Содержание песка и щебня двух фракций составило 707 и 1000 кг / куб. м соответственно. Бетонная смесь модифицировалась введением добавки МБ 10–30С в количестве 109 кг / куб. м. Гидроизолированные образцы-близнецы из бетона одного замеса в возрасте

Физико-механические характеристики бетона

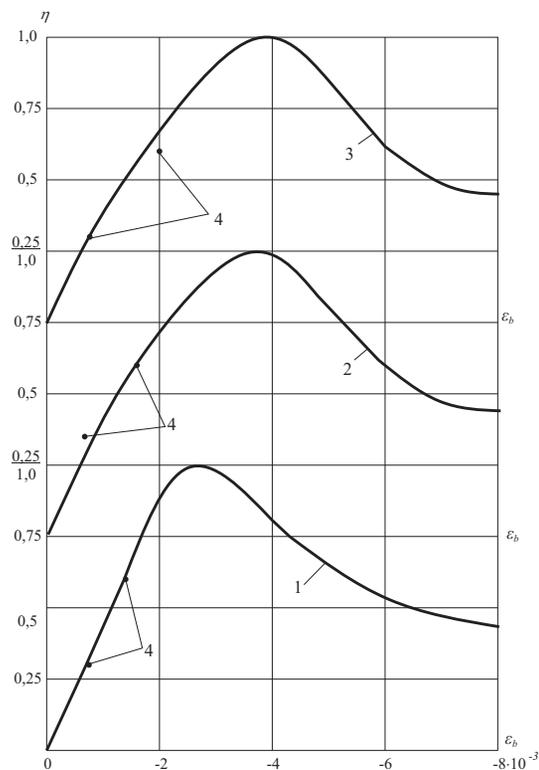
| Параметр            | $\bar{R}$ , МПа | $\bar{R}_b$ , МПа | $B^*$ , МПа | $R_{bn^*}$ , МПа | $E_b$ , МПа | $\varepsilon_{b0} \cdot 10^3$ |
|---------------------|-----------------|-------------------|-------------|------------------|-------------|-------------------------------|
| По данным [3]       | 120             | 90                | 94          | –                | 46 670      | $2,54 \cdot 10^{-3}$          |
| По СП 63.13330.2012 | –               | –                 | 94          | 70               | 42 750      | $2,60 \cdot 10^{-3}$          |

Примечание. \* – расчетное значение при коэффициенте вариации 0,135.

28 сут. после определения призмочной прочности были загружены длительной нагрузкой при двух уровнях напряжений 0,3 и 0,6 от призмочной прочности. Прочностные и деформативные характеристики бетона приведены в таблице.

На рисунке показаны расчетно-экспериментальные, по зависимостям (1)–(9), диаграммы-изохроны для трех режимов загрузки: 1 – при  $t - \tau = 60$  мин, 2 – при  $t - \tau = 100$  сут. и 3 – при  $t - \tau = 360$  сут. Опытные точки 4 получены путем суммирования линейно-упругих деформаций и деформаций ползучести по данным [3]. Для бетона проектируемых конструкций расчетные диаграммы-изохроны могут быть построены по зависимостям (1)–(9) с использованием нормативных данных СП 63.13330.2012, которые приведены в таблице. В координатах  $\epsilon - \eta$  эти диаграммы практически совпадают с кривыми, полученными расчетно-экспериментальным путем.

Соотношение теоретических и опытных данных показывает, что диаграммы-изохроны, построенные по предлагаемым зависимостям, с достаточной для практических расчетов точностью описывают действительный нелинейный характер деформирования высокопрочного бетона и могут быть рекомендованы в качестве расчетного аппарата при проектировании железобетонных конструкций.



Расчетные диаграммы-изохроны

\* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г а л у с т о в К. З. Развитие нелинейной теории ползучести бетона и расчет железобетонных конструкций. М.: Изд-во физико-математической литературы, 2006. 248 с.
2. К а р п е н к о Н. И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
3. К а р п е н к о Н. И., Каприелов С. С., Ромкин Д. С., Безгоднов И. М., Андрианов А. А. Результаты исследования физико-механических и реологических характеристик высокопрочного бетона // Известия ОрелГТУ. 2009. Вып. № 1/21 (553). С. 39–54.

**Karpenko S. N.**, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)  
**Petrov A. N.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Evseeva A. V.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

DIAGRAMS-ISOCHRONES OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE

The solution of the problem of the long-term deformation of reinforced concrete structures with application of nonlinear theories is connected with considerable mathematical difficulties. The research objective is to work out a diagram approach instrumental in calculation of reinforced concrete structures able to bear permanently acting load. Within the limits of the general approach to the description of the full deformation diagram for concrete, made by N. I. Karpenko, empirical dependences based on the description of high performance concrete diagrams-isochrones are offered. A strong correlation between theoretical and experimental data is presented. The received dependences are recommended as calculation vectors in designing reinforced concrete structures.

Key words: reinforced concrete structures, creep, high performance concrete, long-term loading, diagrams-isochrones

REFERENCES

1. Galustov K. Z. *Razvitie nelineynoy teorii polzuchesti betona i raschet zhelezobetonnykh konstruksiy* [The development of nonlinear theory of creep concrete and reinforcement of concrete structures, Moscow, Physical and mathematical literature Publ., 2006. 248 p.
2. Karpenko N. I. *Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona* [General models of reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996. 416 p.
3. Karpenko N. I., Kaprielov S. S., Romkin D. S., Bezgodov I. M., Andrianov A. A. The results of investigation of mechanical and reological properties of high strength concrete [Rezultaty issledovaniya fiziko-mekhanicheskikh i reologicheskikh kharakteristik vysokoprochnogo betona]. *Proceedings of OreIGTU*. 2009. Is. 1/21 (553). P. 39–54.

Поступила в редакцию 30.05.2013