

УДК 624.012.4.042.3

**ДИАГРАММЫ МАТЕРИАЛОВ
В РАСЧЕТАХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ СЖАТИИ И РАСТЯЖЕНИИ
С УЧЕТОМ УСАДКИ БЕТОНА**

**CHART OF MATERIALS
IN THE CALCULATIONS OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS
UNDER CENTRAL COMPRESSION AND TENSION TAKING
INTO ACCOUNT THE SHRINKAGE OF CONCRETE**

*Н.И. КАРПЕНКО, С.Н. КАРПЕНКО, В.А. ЕРЫШЕВ
N.I. KARPENKO, S.N. KARPENKO, V.A. ERY SHEV*

(Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук,
Тольяттинский государственный университет)
(Research Institute of Building Physics
of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Togliatti State University)
E-mail: gsx@tltsu.ru

В работе устанавливается аналитическая связь между усилиями и деформациями железобетонного образца с симметричным армированием при осевом сжатии (растяжении) с учетом деформаций и напряжений в арматуре и бетоне от усадки бетона. Представлены результаты экспериментальных исследований, включающие: диаграммы бетона на сжатие (растяжение), диаграммы развития осевых деформаций с увеличением нагрузки сжатия (растяжения) при центральном нагружении железобетонных элементов. Дана оценка эффективности аналитических выражений, устанавливающих связь между напряжениями и деформациями в диаграммах материалов для расчетов железобетонных конструкций по деформационной модели.

In this paper we establish an analytical relation between effort and deformation of reinforced concrete specimen with symmetrical reinforcement under axial compression (tensile) deformations and stresses in the rebar and concrete from shrinkage of concrete. The results of experimental research that includes: charts of concrete in compression (tension), charts the development of axial strains with increasing load and compression (stretching) under central loading of reinforced concrete elements. Evaluate the effectiveness of the analytical expression that establishes the relationship between stress and strain diagrams of materials, calculations of reinforced concrete structures on the deformation model.

Ключевые слова: усадочные деформации, напряжение, бетон, экспериментальные исследования.

Keywords: usadochnye deformations, tension, concrete, experimental research.

Большинство бетонов подвержено усадке. В процессе усадки в железобетонных элементах возникают деформации укорочения бетона и арматуры. Обозначим: ε – общие деформации элемента; ε_{sh} – деформации бетона от усадки; ε_b – силовые деформации бетона от напряжений в бетоне σ_b ; ε_s – силовые деформации арматуры от напряжений в арматуре σ_s . Связи " $\varepsilon_b - \sigma_b$ " и " $\varepsilon_s - \sigma_s$ " представляются диаграммами деформирования бетона и арматуры. Аналитическую зависимость для описания диаграмм деформирования по рекомендациям [1...3] принимаем в виде:

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m \nu_m}, \quad (1)$$

где ε_m , σ_m , E_m – соответственно относительные деформации, напряжения, начальные модули упругости; m – индекс материала (для бетона $m=b$ – при сжатии; $m=bt$ – при растяжении; для арматуры $m=s$); ν_m – коэффициент изменения секущего модуля, определяемый по формуле:

$$\nu_m = \hat{\nu}_m + (\nu_0 - \hat{\nu}_m) \sqrt{1 - \omega_1 \eta - \omega_2 \eta^2}. \quad (2)$$

Здесь ν_0 – начальный коэффициент изменения секущего модуля $E_m \nu_m$; ω_1, ω_2 – коэффициенты характеризующие полноту диаграммы материала, причем $\omega_2=1-\omega_1$; $\hat{\nu}_m$ – значение коэффициента ν_m в вершине диаграммы; $\eta = \sigma_m / \hat{\sigma}_m$ – относительный

уровень напряжений; в исследованиях рассматривается только восходящая ветвь.

В формулах (1) и (2) при кратковременном одноосном нагружении бетона принимаются:

$$\hat{\sigma}_m = \hat{\sigma}_b, \hat{\nu}_m = \hat{\nu}_b = \frac{\hat{\sigma}_b}{\hat{\varepsilon}_b E_b}, \eta = \frac{\sigma_b}{\hat{\sigma}_b}, \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_m = \hat{\sigma}_{bt}, \hat{\nu}_m = \hat{\nu}_{bt} = 0,6 + 0,15 \frac{\hat{\sigma}_{bt}}{2,5}, \quad (4)$$

$$\hat{\varepsilon}_{bt} = \frac{\hat{\sigma}_{bt}}{(E_b \hat{\nu}_{bt})}, \eta = \frac{\sigma_{bt}}{\hat{\sigma}_{bt}},$$

где формулы (3) используются при описании диаграмм бетона на сжатие, формулы (4) – на растяжение; для двух диаграмм: $\nu_0=1$, $\omega_1=2 - 2,5\hat{\nu}_b$.

Общие деформации бетона ε (или общие деформации элемента с учетом условия совместности деформаций арматуры и бетона) равны:

$$\varepsilon = \varepsilon_{sh} + \varepsilon_b = \varepsilon_{sh} + \frac{\sigma_b}{E_b \nu_b}, \quad (5)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s \nu_s}, \quad (6)$$

откуда:

$$\sigma_b = (\varepsilon - \varepsilon_{sh}) E_b \nu_b, \quad (7)$$

$$\sigma_s = \varepsilon E_s \nu_s. \quad (8)$$

Общие усилия, действующие на элемент, равны:

$$N = \sigma_b A_b + \sigma_s A_s, \quad (9)$$

или, учитывая (7) и (8), находим:

$$N = \varepsilon(E_b v_b A_b + E_s v_s A_s) - \varepsilon_{sh} E_b v_b A_b. \quad (10)$$

При производстве испытаний конструкций усадочные деформации и напряжения в бетоне и арматуре остаются вне поля зрения экспериментатора. Между тем, параметры от нагрузки суммируются с параметрами от усадки бетона, которые должны приниматься за нулевые отсчеты измеряемых величин. Общие деформации элемента $\varepsilon = \varepsilon_0$ от усадки бетона, которые принимаются за начальные, определяются из уравнения (10) при $N=0$:

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_{sh} E_b v_b A_b}{E_b v_b A_b + E_s v_s A_s}. \quad (11)$$

Деформации от усадки ε_{sh} , которые являются максимальными для данного периода времени, определяются опытным путем или расчетами по известным методикам. В проведенных исследованиях деформации от усадки ε_{sh} измерялись опытным путем

на стандартных бетонных образцах призмах (без армирования) с размерами сечения 15×15 см, длиной 60 см. После стабилизации значений усадочных деформаций на этих образцах определялись прочностные и деформационные характеристики бетона. При осевом сжатии: модуль деформаций бетона E_b , предельные значения напряжений $\hat{\sigma}_b$, предельные значения деформаций $\hat{\varepsilon}_b$. Предельные напряжения при осевом растяжении $\hat{\sigma}_{bt}$ вычислялись по величине момента трещинообразования бетонных образцов призм. Опытные значения параметров бетона представлены в табл. 1. Одновременно с бетонными образцами изготавливались железобетонные образцы: образцы призмы, армированные центральным стержнем диаметрами 16, 20 мм из арматуры класса А400, и образцы - стойки прямоугольной формы сечения: высотой $h=18$ см, шириной $b=12$ см и длиной $l=210$ см с арматурным каркасом, в котором продольная арматура включала четыре стержня диаметром 8, 10, 12 мм и поперечная арматура диаметром 5 мм. Бетонные и железобетонные образцы с однородными составами бетонной смеси, армированные, разделены на семь серий (табл. 1 – прочностные и деформационные характеристики бетона).

Т а б л и ц а 1

Образцы	№ серии	Параметры бетона						Армированные образцы
		$\hat{\sigma}_b$, МПа	$\hat{\varepsilon}_b \cdot 10^5$	$E_b \cdot 10^{-3}$, МПа	$\hat{\sigma}_{bt}$, МПа	$\hat{\varepsilon}_{bt} \cdot 10^5$	$-\varepsilon_{sh} \cdot 10^5$	
Призмы	1	18,9	206	19,0	1,6	12,2	24	$\phi 16$
	2	29,3	200	23,0	1,76	11,0	37	$\phi 20$
	3	51,1	214	42,0	2,85	8,8	42	$\phi 20$
	4	48,3	209	37,5	2,64	8,5	39	$\phi 20$
Стойки	5							$4\phi 8$
	6	30,6	210	30,7	2,1	10,0	34	$4\phi 10$
	7							$4\phi 12$

Армированные образцы призмы каждой серии испытывались на центральное сжатие и растяжение, образцы стойки – только на центральное сжатие после окончания измерений усадочных деформаций в бетонных образцах. В процессе испытаний контролировалась нагрузка и осевые деформации образцов. При испытаниях образцов на растяжение нагрузка трещинообразования

$N_{сгс}^{exp}$ и предельные осевые деформации образцов $\hat{\varepsilon}_{bt}^{exp}$, непосредственно перед образованием трещин, фиксировались приборами (табл. 2 – опытные и расчетные параметры деформирования железобетонных элементов при осевом растяжении). Методика испытаний образцов, установки и оборудование для испытаний представлены в работах [1...3].

№	$N_{срс}^{exp}$, кН, ОПЫТ	$-\varepsilon_0 \cdot 10^5$	$\hat{\varepsilon}_{bt,sh} \cdot 10^5$	$\hat{\sigma}_{bt,sh}$, МПа	$\hat{\varepsilon}_{\Delta bt} \cdot 10^5$	$\hat{\sigma}_{\Delta bt}$, МПа	$N_{срс}$, кН	$\hat{\varepsilon}_{\Delta bt}^{exp} \cdot 10^5$, ОПЫТ	$\hat{\sigma}_{\Delta bt}^{exp}$, МПа, ОПЫТ
1	32,5	21,9	1,9	0,32	10,3	1,28	32,8	10,0	1,2
2	25	33,4	3,5	0,79	7,4	0,97	26,0	8,0	1,
3	48	39,7	2,1	0,76	6,7	1,92	48,5	7,0	1,9
4	45,5	36,6	2,2	0,71	6,3	1,79	46,0	6,0	1,9

По результатам испытаний армированных железобетонных образцов построены диаграммы на растяжение " $\varepsilon_{bt} - N$ " (рис. 1-а) и на сжатие " $\varepsilon_b - N$ " (рис. 2-б).

Рис. 1 – к построению диаграмм с учетом напряжений и деформаций от усадки бетона: а – опытные диаграммы деформирования железобетонных образцов на растяжение; б – к построению диаграмм бетона в

приращениях; в – диаграммы бетона с учетом деформаций и напряжений от усадки бетона: --- расчет, — ··· — из опытных данных; рис. 2 – опытные и расчетные диаграммы на сжатие: а – бетонных образцов, б– железобетонных образцов; - · - - опытные данные, - - - расчетные значения; 1,2,3,5,6,7 – номер образца в соответствии с табл. 1.

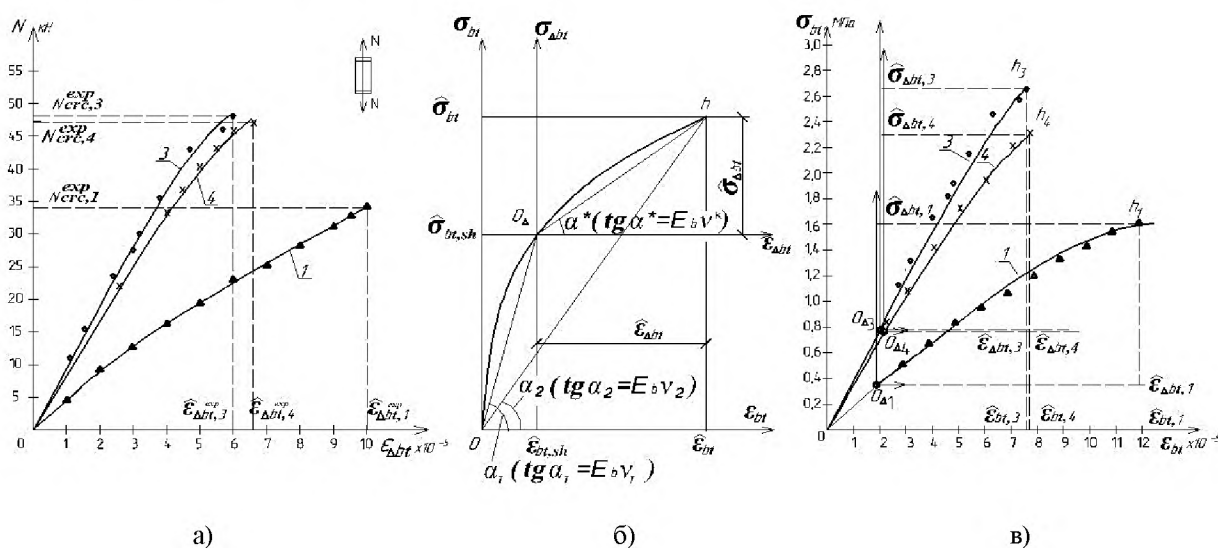


Рис. 1

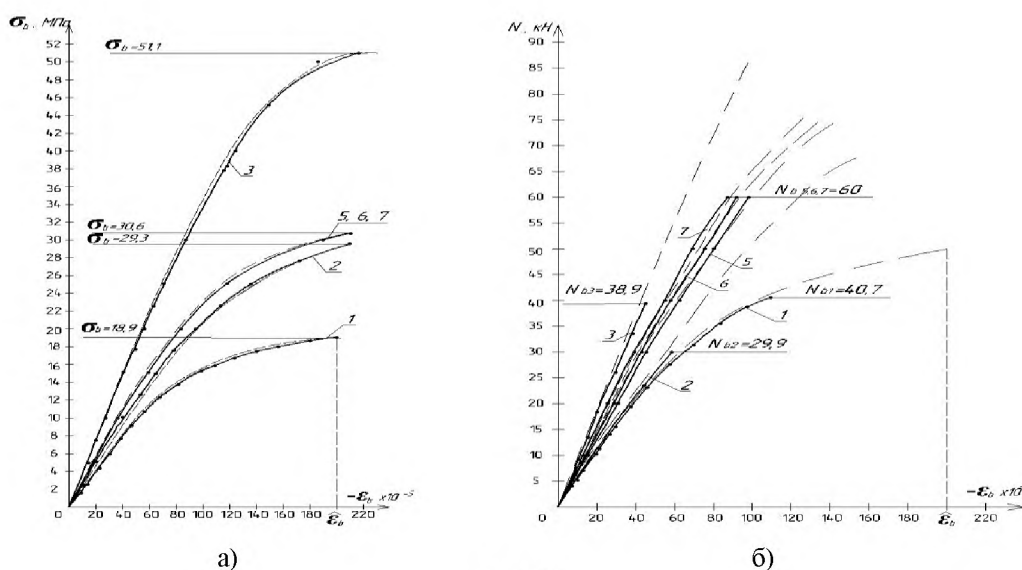


Рис. 2

По результатам испытаний бетонных образцов (без арматуры) построены диаграммы на растяжение " $\varepsilon_{bt} - \sigma_{bt}$ " (рис. 1-в), где $\varepsilon_{bt} = \varepsilon - \varepsilon_{sh}$, и на сжатие " $\varepsilon_b - \sigma_b$ " (рис. 2-а), где $\varepsilon_b = \varepsilon - \varepsilon_{sh}$. Вначале полагаем, что армирование не влияет на усадку и в армированных образцах величинам $(\varepsilon - \varepsilon_{sh})$ соответствуют те же напряжения в бетоне, что и в неармированных. Напряжения в арматуре определяются по общим деформациям $\varepsilon = \varepsilon_s$. Подставляя опытные значения $\sigma_{b,bt}$ и σ_s в уравнение (9), проверяем выполнение равенства правой части уравнения значениям усилий N в армированных образцах.

Расчет упрощается, если деформации и напряжения от нагрузки в виде конечных приращений $\varepsilon_{\Delta bt}$ и $\sigma_{\Delta bt}$ отсчитываются в новой системе координат. Начало новой системы координат, например, при растяжении, переносится относительно исходной на величину конечных значений силовых деформаций $\hat{\varepsilon}_{bt,sh}$ и напряжений $\hat{\sigma}_{bt,sh}$ от усадки бетона (из точки O в точку O_{Δ} , рис. 1-б; из точки O в точки $O_{\Delta 1}$, $O_{\Delta 3}$, $O_{\Delta 4}$, рис. 1-в), значения (табл. 2) которых вычисляются по формулам:

$$\hat{\varepsilon}_{bt,sh} = k_{sh} (\varepsilon_0 - \varepsilon_{sh}), \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_{bt,sh} = \hat{\varepsilon}_{bt,sh} \hat{\nu}_{bt,sh} E_b, \quad (13)$$

где ε_0 вычисляется по формуле (11), ε_{sh} подставляется со своим знаком, $k_{sh} = 0,9$ – коэффициент, понижающий конечные значения деформаций от усадки с учетом интервала по времени от изготовления образцов до начала совместной работы бетона и арматуры.

Чем больше усадочные напряжения в бетоне, тем короче ветвь $O_{\Delta}h$ и меньше усилие образования трещин N_{cr} . С ростом нагрузки N бетон и арматура деформируются совместно. Приращения деформаций $\varepsilon_{\Delta bt}$ и $\varepsilon_{\Delta s}$ равны приращениям деформаций железобетонного образца ε_{Δ} . Этим деформациям на диаграммах соответствуют конкретные величины приращений напряжений $\sigma_{\Delta bt}$ и $\sigma_{\Delta s}$. Связь между приращениями напряжений и деформаций записывается в виде:

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\sigma_{\Delta bt}}{E_b \nu^k} = \frac{\sigma_{\Delta s}}{E_s \nu_s}, \quad (14)$$

где ν^k – условный коэффициент касательного модуля деформаций бетона ($E_b \nu^k$), который выражается через коэффициент секущего модуля в начале и конце отсчета приращений (шага нагружения).

Определим значение коэффициента $\nu^k = \hat{\nu}^k$, когда деформации и напряжения увеличиваются от их усадочных величин (12) и (13) до предельных значений $\hat{\varepsilon}_{bt}$ и $\hat{\sigma}_{bt}$ (табл.1) в вершине h диаграммы. Переход от точки O_{Δ} в точку h осуществляется по хорде $O_{\Delta} \div h$, при этом условный коэффициент касательного модуля ν^k выражается через коэффициент секущего модуля в начале ν_1 (точке O_{Δ}) и конце ν_2 (точке h) шага нагружения по методике конечных приращений [9]:

$$\hat{\nu}^k = \frac{\hat{\varepsilon}_{bt} \nu_2 - \hat{\varepsilon}_{bt,sh} \nu_1}{\hat{\varepsilon}_{\Delta bt}}, \quad (15)$$

где ν_1 и ν_2 вычисляются по формулам (2) и (4), $\hat{\varepsilon}_{\Delta bt} = \hat{\varepsilon}_{bt} - \hat{\varepsilon}_{bt,sh}$.

В приращениях уравнение (9) для общих усилий принимает вид:

$$N = \varepsilon_{\Delta} (E_b \nu^k A_b + E_s \nu_s A_s). \quad (16)$$

При подстановке в уравнение (16) параметров диаграмм бетона и арматуры вычисляем N , и при соответствующих $\varepsilon_{\Delta} = \varepsilon_{\Delta bt}$ строится диаграмма " $\varepsilon_{\Delta bt} - N$ ", которая удовлетворительно описывает опытные данные (рис. 1-а). При $\varepsilon_{\Delta} = \hat{\varepsilon}_{\Delta bt}$ и $\nu^k = \hat{\nu}^k$ из уравнения (16) получаем значение усилия трещинообразования $N = N_{cr}$, при котором в образце образуются поперечные трещины. Расчетные значения усилий трещинообразования N_{cr} , вычисленные с учетом усадочных напряжений и деформаций, незначительно отличаются от их опытных значений N_{cr}^{exp} (табл. 2). Опытные значения предельных деформаций $\hat{\varepsilon}_{\Delta bt}^{exp}$ непосредственно перед образованием в бетоне железобетонных элементов поперечных трещин соответствуют их расчетным значениям $\hat{\varepsilon}_{\Delta bt}$ (табл. 2). Следовательно, в расчетах железобетонных конструкций на растяжение можно принять, что усадка не зависит от армирования и ранее принятые предпо-

сылки оказались верными. При осевом сжатии деформации и напряжения от усадки составляют около 1% от предельных значений, поэтому в расчетах и построениях их можно не учитывать (рис. 2) хотя эффективность бетона от усадки возрастает. При растяжении усилие трещинообразования в бетоне за счет усадочных напряжений значительно уменьшается, что необходимо учитывать в расчетах железобетонных конструкций [7], [8].

ВЫВОДЫ

При твердении в естественных условиях бетоны подвержены усадке. В железобетонных элементах в арматуре и бетоне формируются силовые деформации и напряжения от усадки бетона, которые суммируются с их значениями от внешних нагрузок. Если в расчетах железобетонных элементов на сжатие усадку в силу ее незначительного влияния можно не учитывать, то в расчетах на растяжение без учета усадки усилия трещинообразования могут оказаться завышенными на 25...30%, поэтому этот фактор необходимо учитывать в диаграммной методике расчета конструкций по представленным выше зависимостям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерышев В.А., Тошин Д.С. Диаграмма деформирования бетона при многократных повторных нагрузениях // Изв. вузов. Строительство. – 2005, №10. С. 109...114.
2. Ерышев В.А., Латышев Д.И., Тошин Д.С. Методика расчета деформаций изгибаемого железобетонного элемента при разгрузке // Изв. Орловского гос. тех. ун-та. – 2009, №2. С. 6...13.
3. Ерышев В.А., Латышев Д.И., Бондаренко А.С. К методике описания диаграммы малоциклового нагружения // Изв. Орловского гос. тех. ун-та. – 2009, № 1. С. 22...28.
4. Ерышев В.А., Бондаренко А.С., Царев С. Влияние усадки бетона на деформирование железобетонных конструкций // Вектор науки Тольяттинского гос. ун-та. – 2011, №4(18). С. 52...55.
5. Ерышев В.А., Латышева Е.В., Бондаренко А.С. Усадочные деформации в бетонных и железобетонных элементах // Изв. Казанского гос. арх.-строит. ун-та. – 2012, №4(22). С. 97...102.
6. Карпенко Н.И., Ерышев В.А., Латышева Е.В., Бондаренко А.С. Деформации железобетонного элемента с учетом усадочных деформаций // Вестник Волгоградского гос. арх.-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2013, № 31(50). – Ч. 2.

Строительные науки. – С. 344...358.

7. Ерышев В.А., Латышева Е.В., Ключников С.В., Седина Н.С. К построению диаграмм циклического нагружения бетона при одноосном сжатии // Изв. Казанского гос. арх.-строит. ун-та. – 2013, №1(23). 104...109.

8. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Latysheva E.V. Stress-strain Diagrams of Concrete Under Repeated Loads with Compressive Stresses // Procedia Engineering. – Vol. 111, 2015. P. 371...377.

9. Карпенко Н.И., Ерышев В.А., Латышева Е.В. К построению диаграмм деформирования бетона повторными нагрузками сжатия при постоянных уровнях напряжений // Строительные материалы. – 2013, №6. С. 48...52.

REFERENCES

1. Eryshev V.A., Toshin D.S. Diagramma deformirovaniya betona pri nemnogokratnyh povtornyh nagruzheniyah // Izv. vuzov. Stroitel'stvo. – 2005, №10. S. 109...114.
2. Eryshev V.A., Latyshev D.I., Toshin D.S. Metodika rascheta deformacij izgibaemogo zhelezobetonogo jelementa pri razgruzke // Izv. Orlovskogo gos. teh. un-ta. – 2009, №2. S. 6...13.
3. Eryshev V.A., Latyshev D.I., Bondarenko A.S. K metodike opisanija diagrammy malociklovogo nagruzheniya // Izv. Orlovskogo gos. teh. un-ta. – 2009, № 1. S. 22...28.
4. Eryshev V.A., Bondarenko A.S., Carev S. Vlijanie usadki betona na deformirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij // Vektor nauki Tol'jattinskogo gos. un-ta. – 2011, №4(18). S. 52...55.
5. Eryshev V.A., Latysheva E.V., Bondarenko A.S. Usadochnye deformacii v betonnyh i zhelezobetonnyh jelementah // Izv. Kazanskogo gos. arh.-stroit. un-ta. – 2012, №4(22). S. 97...102.
6. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Latysheva E.V., Bondarenko A.S. Deformacii zhelezobetonogo jelementa s uchetom usadochnyh deformacij // Vestnik Volgogradskogo gos. arh.-stroit. un-ta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura. – 2013, № 31(50). – Ch. 2. Stroitel'nye nauki. – S. 344...358.
7. Eryshev V.A., Latysheva E.V., Kljuchnikov S.V., Sedina N.S. K postroeniju diagramm ciklicheskogo nagruzheniya betona pri jednoosnom szhatii // Izv. Kazanskogo gos. arh.-stroit. un-ta. – 2013, №1(23). 104...109.
8. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Latysheva E.V. Stress-strain Diagrams of Concrete Under Repeated Loads with Compressive Stresses // Procedia Engineering. – Vol. 111, 2015. P. 371...377.
9. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Latysheva E.V. K postroeniju diagramm deformirovaniya betona povtornyimi nagruzkami szhatija pri postojannyh urovnjah naprjazhenij // Stroitel'nye materialy. – 2013, №6. S.48...52.

Рекомендована Ученым советом НИИСФ РААСН. Поступила 03.04.17.