

Особенности нелинейного деформирования бетона

В.Г.Мурашкин, ЗАО «Экология-Сервис», Самара

В большинстве работ при постановке проблемы определения нелинейной модели деформирования конструктивно-го бетона, находящегося в обычной среде или испытывающего различные деструктивные (агрессивное, температурное и др.) воздействия, используются индивидуальные математический аппарат и программные средства. Основным критерием в этих работах для построения деформационной модели бетона была однозначная связь «прочность–модуль упругости». Применение разработанной модели для другого вида бетона или бетона, испытывающего деструктивное воздействие, оказывалось ошибочным. Вместе с тем не все особенности деформирования бетона при построении моделей учитывались. В частности, не учитывался пологий характер деформирования в начальном этапе загрузки. Аналогично построены и модели нелинейного деформирования бетона в нормативных материалах различных стран. Особенно возникают проблемы при обследовании конструкций, эксплуатируемых длительное время. Разрабатывать индивидуальную деформационную модель по созданному ранее алгоритму для индивидуальных моделей, где для каждого класса бетона, вида нагрузки на него и т.д. не рационально, да иногда и нет возможности. В последних исследованиях в ряде работ была отмечена необходимость учёта особенностей начального этапа загрузки бетона и того, что бетон с самого начала загрузки имеет макро- и микротрещины и дефекты структуры. Но и в этих работах не рассматривалась возможность создания обобщённой модели, отвечающей основным особенностям многокомпонентного материала с нарушенной сплошностью. В данной статье рассматривается возможность построения нелинейной модели деформирования на основе экспериментально полученных данных при испытаниях опытных образцов бетона, извлечённых из конструкции. Показана возможность замены индивидуальных моделей деформирования на предлагаемую. В обобщённой модели деформирования «прочность и модуль упругости» могут не совпадать с нормативными характеристиками, и она может служить основой для определения напряжённого состояния при обследовании эксплуатируемых конструкций и, в случае необходимости, для проектирования новых.

Ключевые слова: напряжения, прочность, деформации, модуль упругости, деформационная модель, температурная нагрузка, начальный этап деформирования бетона, разрушение.

Features of Nonlinear Deformation of Concrete

V.G.Murashkin, OOO «Ecologiya-Service»

In most studies, when the problem of determining a nonlinear model of deformation of structural concrete in normal environment, or experienced a variety of destructive (aggressive, temperature, etc.) exposure, using individual mathematical apparatus and software. The main criterion in these works for the construction of the deformation model of concrete was a unique relationship "strength – modulus of elasticity". Apply the developed model for another type of concrete or experienced a destructive impact was erroneous. However, not all features of concrete deformation in the construction of models were taken into account. In particular, the gentle nature of deformation in the initial stage of loading was not taken into account. Similarly, models of nonlinear deformation of concrete in normative materials of different countries are constructed. Especially there are problems in the inspection of structures operated for long time. It is not rational to create individual models based on the algorithm created earlier. In recent studies, a number of works have noted the need to take into account the features of the initial stage of loading of concrete and the fact that concrete from the beginning of loading has macro and micro cracks and structural defects. But even in these works the possibility of creating a nonlinear deformation model based on experimentally obtained data when testing prototypes of generalized model was not considered. This article discusses the possibility of constructing a concrete extracted from the structure. The possibility of replacing the individual deformation models with the proposed one is shown. In the generalized model of deformation "strength and modulus of elasticity" may not coincide with the normative characteristics and it can serve as a basis for determining the stress state in the survey of operated structures and, if necessary, for the design of new ones.

Keywords: stress, strength, deformation, modulus of elasticity, deformation model, temperature load, the initial stage of deformation of concrete, destruction.

Бетон – сложный многокомпонентный материал, и попытки различными научными школами материаловедов и конструкторов построить модель деформирования на основе связи химических и физико-механических процессов с прочностью и деформативностью не давали ожидаемых результатов. Наиболее удачным оказалась выражение нелинейного деформирования

бетона, получаемого путём аппроксимации экспериментальных данных для характерных точек А, В и С, представленное в нормах РФ СП 63.13330.2012 [1] и Евросоюза [2].

В РФ, как и в Евросоюзе, для построения деформационных моделей, предназначенных для проектирования новых железобетонных конструкций, назначается прочность и модуль упругости, соответствующие выбранному классу. Тогда установленная нормативами деформационная модель будет соответствовать графику на рисунке 1.

Однако для эксплуатируемых сооружений применить модели из [1] и [2] не всегда удастся. При эксплуатации сооружения прочность и деформационные характеристики бетона меняются не однозначно. Наиболее существенно изменение свойств при воздействии на бетон высокотемпературной нагрузки, эксплуатации в коррозионной среде, применении новых технологий получения бетона и т.д. Для выхода из этой ситуации стали создаваться специальные деформационные модели отдельно для конструкций, работающих в агрессивной среде и испытывавших высокую температуру [3] и др.

Анализируя существующие модели деформирования для сжимающей и растягивающей нагрузок, автором сделан вывод, что предложенное в [4] выражение может служить универсальной моделью деформирования как для проектирования новых конструкций, так и эксплуатируемых при различных условиях загрузки:

$$\sigma(\varepsilon) = a \cdot \varepsilon^b \cdot e^{\left(\frac{-b \cdot \varepsilon}{p}\right)}, \quad (1)$$

где: $\sigma(\varepsilon)$ – напряжения, ε – относительные деформации, a и b – коэффициенты, p – относительная деформация при максимальных напряжениях.

За основу разработки моделей деформирования в Евросоюзе и РФ взята схема, представленная на рисунке 1, которая не всегда подтверждается экспериментально. При разработке авторской модели использовалась диаграмма деформирования, полученная в экспериментах при точных измерениях деформаций от сжимающей нагрузки на специальном оборудовании (рис. 2).

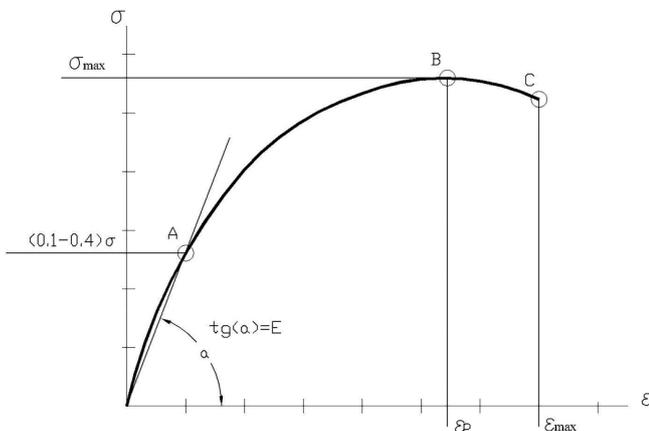


Рис. 1. Схема зависимости напряжений от деформаций бетона при сжатии для нормативных материалов (РФ и Евросоюз)

Основное отличие выражения (1) от принятых в нормах для расчёта новых конструкций заключается в наличии начального участка, имеющего противоположную кривизну по отношению к основной части и отсутствие жёсткой связи класса бетона и модуля упругости. Объяснить наличие начального участка можно тем, что бетон имеет трещины, поры и другие дефекты структуры, которые в начале загрузки не позволяют включиться в работу всему сечению.

В работах [5–8] было рассмотрено применение деформационной модели (1) для проектировании конструкций из нового бетона. Исследования показали не только возможность адекватного (по отношению к нормативным моделям Евросоюза и РФ) определения несущей способности, но и определённого преимущества при расчётах по второй группе предельных состояний.

В 2004 году в нормы Евросоюза (BS EN 1992-1-2:2004) [5] была включена специальная деформационная модель для бетонов, прошедших температурную обработку:

$$\sigma_b(\varepsilon) = \frac{3 \cdot R \cdot \varepsilon}{p \cdot \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{p}\right)^3\right)}, \quad (2)$$

где R – прочность бетона после воздействия температуры, p – относительная деформация при максимуме напряжений $\sigma_b(\varepsilon)$, ε – текущая относительная деформация.

Рассмотрим возможность использования выражения (1) для оценки результатов испытаний образцов бетона после нагрева (например, при $t_1 = 400$ °С и $t_2 = 600$ °С), которые осуществлялись во ВНИИПО и были проанализированы профессором В.С. Фёдоровым [5].

Для тяжёлого бетона на гранитном заполнителе во ВНИИПО были получены следующие данные (табл. 1) [4, табл. 4.3].

Для построения деформационной модели (1) составляем два уравнения – для $t = 400$ °С, $R_{t1} = 26$ МПа и $p_{t1} = 0,0051$:

$$R_{t1} = a_{t1} \cdot (p_{t1})^{b_{t1}} \cdot e^{\left[\frac{b_{t1} \cdot p_{t1}}{p_{t1}}\right]}$$

$$R_{t1} \cdot 0.3 = a_{t1} \cdot (0.001024)^{b_{t1}} \cdot e^{\left[\frac{b_{t1} \cdot 0.001024}{0.0051}\right]}$$

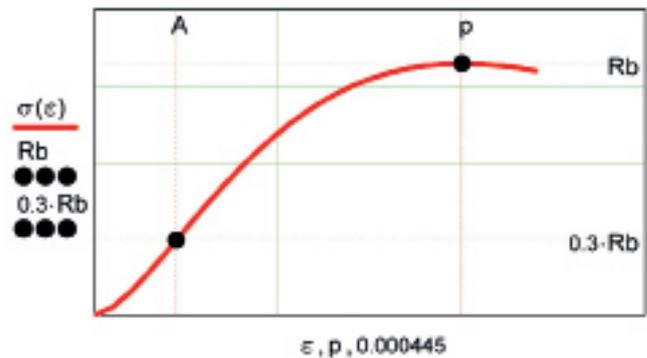


Рис. 2. Схема нелинейного деформирования бетона с учётом начального этапа деформирования под нагрузкой

Решив уравнения получаем: $a_{t1} = 3,065 \cdot 10^5$ и $b_{t1} = 1,493$.

Аналогично, по таблице 1 для $t = 600$ °C $R_{t2} = 16,5$ МПа и $p_{t2} = 0,0088$. На уровне $0,3R_{t3} = 4,95$ МПа деформации на $\sigma_{bE}t_2$ составляют $\varepsilon = 0,001747$. Для деформационной модели (1) коэффициенты для $R_{t2} = 16,5$ МПа составят:

$$a_{t2} = 8,771 \cdot 10^4 \text{ и } b_{t2} = 1,493.$$

Графически модели по выражению (1) и (2) для $t = 400$ °C и $t = 600$ °C представлены на рисунке 3.

Отклонение соответствующих кривых друг от друга:

$$\frac{\int_0^{0,008} \sigma_{Mt1}(\varepsilon1) d\varepsilon1 - \int_0^{0,008} \sigma_{Et1}(\varepsilon1) d\varepsilon1}{\int_0^{0,008} \sigma_{Mt1}(\varepsilon1) d\varepsilon1} \cdot 100\% = 2.002\%$$

и

$$\frac{\int_0^{0,015} \sigma_{Mt2}(\varepsilon2) d\varepsilon2 - \int_0^{0,015} \sigma_{Et2}(\varepsilon2) d\varepsilon2}{\int_0^{0,015} \sigma_{Mt2}(\varepsilon2) d\varepsilon2} \cdot 100\% = 2.255\%$$

Аналогично и для других данных таблицы 1 отклонения составляют не более 3%. Следовательно, выражение (1) может заменить выражение (2) при проведении экспертиз эксплуатируемых объектов.

Анализируя накопленный мировой опыт экспериментальных и теоретических исследований, профессору Фёдорову В.С. удалось создать стройную теорию деформирования бетона при огневой нагрузке и после воздействия на бетон высоких температур [5]. Структурный подход к работе бетона при силовом и огневом нагружении позволил обосновать причины изменения линейной и нелинейной частей деформаций. В бетоне под действием высокой температуры происходят не только деструктивные процессы, связанные с образованием и развитием микротрещин, но и преобразование химических связей. Химические процессы могут (при относительно малых температурах) оказать положительное влияние на прочностные свойства. Так, в опытных образцах из бетона на гранитном заполнителе после нагрева до $t = 200$ °C прочность возросла более чем на 30% по сравнению с образцами с $t = 20$ °C [5].

На базе структурного подхода профессором Фёдоровым В.С. была предложена новая модель деформирования бетона при огневом воздействии [5].

Для параметров в таблице 1 при $t_2 = 400$ °C и $t_3 = 600$ °C получим:

Таблица 1

№ п/п	T °C	Прочность Rbt, МПа	Модуль упругости Et, МПа	Деформации при Rbt $\varepsilon_m = p$
0	20	24,00	26000	0,0020
1	200	33,12	16120	0,0030
2	400	26,00	10920	0,0051
3	600	16,50	6240	0,0088
4	800	4,56	3380	0,0150

$$\sigma_{ft1}(\varepsilon1) = \varepsilon1 \cdot E_1 \cdot e^{-\left[-k_1 \cdot (\eta_1(\varepsilon1))^{k_1}\right]} \quad (3)$$

$$\sigma_{ft2}(\varepsilon2) = \varepsilon2 \cdot E_2 \cdot e^{-\left[-k_2 \cdot (\eta_2(\varepsilon2))^{k_2}\right]} \quad (4),$$

где параметры k_2 и k_3 приняты соответственно 0,76 и 1,2.

Расхождение кривых по выражению (1) от моделей по [5] составляет:

$$\frac{\int_0^{0,008} \sigma_{Mt3}(\varepsilon3) d\varepsilon3 - \int_0^{0,008} \sigma_{ft1}(\varepsilon1) d\varepsilon1}{\int_0^{0,008} \sigma_{Mt3}(\varepsilon3) d\varepsilon3} \cdot 100\% = 2.703\% \text{ и}$$

$$\frac{\int_0^{0,015} \sigma_{ft2}(\varepsilon2) d\varepsilon2 - \int_0^{0,015} \sigma_{Mt4}(\varepsilon4) d\varepsilon4}{\int_0^{0,015} \sigma_{ft2}(\varepsilon2) d\varepsilon2} \cdot 100\% = 2.069\%$$

Из сопоставления видим, что отклонений деформационных модулей по [5] от модели по выражению (1) составляет не более 3%.

При оценке эксплуатируемых конструкций метод определения деформационной модели по (1) наиболее прост, так как требует только стандартных испытаний с определением деформаций в точке А и знание "p" при достижении максимальных напряжений.

Рассмотрим ещё один пример применения деформационной модели (1) тогда, когда нормативные модели для «стан-

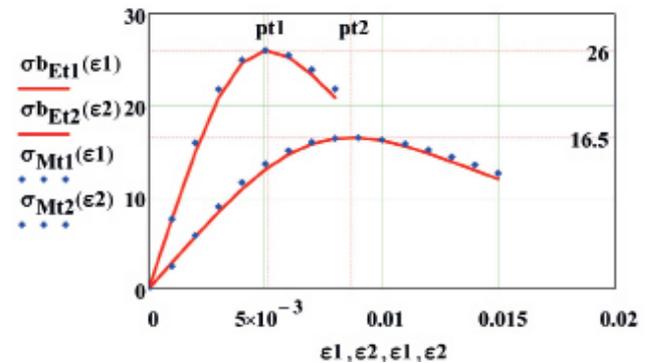


Рис. 3. Визуализация деформационных моделей с использованием данных таблицы 1 по выражениям (1) – отдельные точки и (2) – красные линии

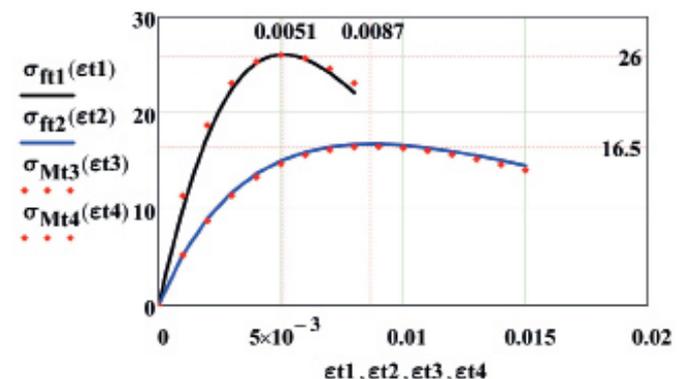


Рис. 4. Деформационные модели по выражениям (1), (3) и (4) по данным испытаний ВНИИПО [5]

дартных» бетонов неадекватно определяют характер работы под нагрузкой. В [6] была показана деформация композитного бетона, испытанного на гидравлическом прессе с записью нагрузки и деформаций в автоматическом режиме (рис. 5).

Из экспериментального графика на рисунке 5 имеем координаты точки *A* ($\sigma_a = 4,9$ МПа, $\varepsilon_a = 0,38$ мм/м) и координаты точки *B* ($\sigma_b = 44$ МПа, $\varepsilon_b = 1,6$ мм/м).

Деформационная модель по выражению (1) будет иметь вид:

$$\sigma b l_M(\varepsilon b) = a1 \cdot (\varepsilon b)^{b1} \cdot e^{\left[\frac{b1 \cdot \varepsilon b}{p1} \right]}, \quad (5)$$

где коэффициенты $a1 = 1,824 \cdot 10^{12}$ и $b1 = 3,287$

График полученной модели на основе эксперимента в [6] показан на рисунке 6. На графике нанесены характерные точки экспериментальной кривой (см. рис.5).

И в этом случае, отклонение экспериментальной кривой от деформационной модели, полученной с использованием выражения (1), даёт удовлетворительные результаты, в то время как деформационные модели из СП 63.133302.2012 и Евросоюза [2] использовать не представляется возможным.

Рекомендуемые в нормативных материалах модели деформирования для проектирования новых конструкций и специальные деформационные модели для особых условий загрузки в большинстве случаев не могут быть применены для конструкций, эксплуатируемых длительное время и испытавших различные условия загрузки. Рекомендуемая в статье обобщённая деформационная модель деформирования бетона может служить основой для использования при обследовании конструкций, а при необходимости и для проектирования новых сооружений.

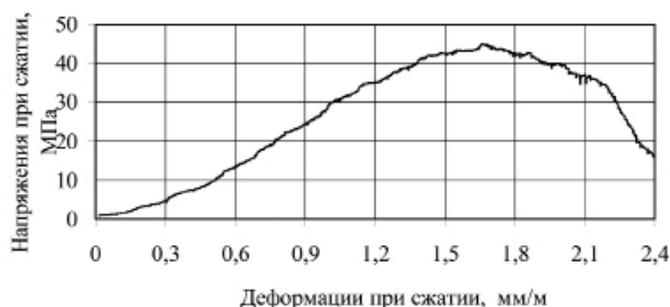


Рис. 5. График деформирования композитного бетона

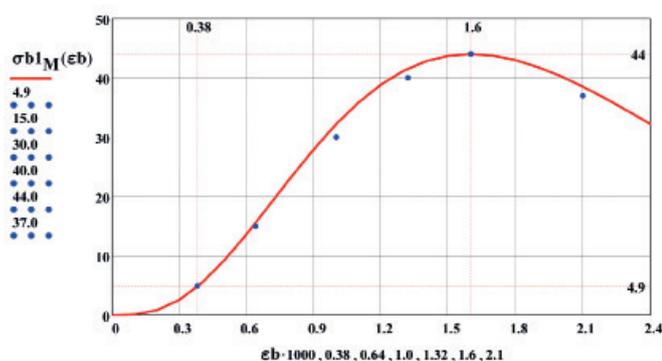


Рис. 6. Визуализация выражения (5) с экспериментальными точками

Литература

1. СП 63.133302.2012. Железобетонные конструкции. – М., 2012.
2. International Federation for Structural Concrete (fib) fib Bulletin 56: Model Code 2010, First complete draft – Volume 2. / CH-1015 Lausanne, Switzerland, Federal Institute of Technology Lausanne – EPFL, 2010. – P. 317.
3. EN 1992-1-2 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1–2.
4. Мурашкин Г.В. Моделирование диаграммы деформирования бетона / Г.В. Мурашкин, В.Г. Мурашкин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1997. – № 10. – С. 4.
5. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций / В.С. Федоров, В.Е. Левитский, И.С. Молчадский, А.В. Александров. – М.: АСВ, 2009. – 408 с.
6. Низина Т.А. Влияние минеральных добавок на реологические и прочностные характеристики цементных композитов / Т.А. Низина, А.В. Балбалин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 2. – С. 148–153.
7. Козлов А.В. Модель деформирования бетона для расчёта с единых позиций нормальноармированных и перearмированных изгибаемых железобетонных элементов : диссертация кандидата технических наук по специальности 05.23.01, – Самара, 2005. – 110 с. : ил.
8. Пищулев А.А. Совершенствование расчёта прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных конструкций с повреждённой сжатой зоной : автореф. дис... канд. техн. наук. / А.А. Пищулев [Место защиты: Сам. гос. архитектур.-строит. акад.]. – Самара, 2010. – 19 с.
9. Панфилов Д.А. Совершенствование методики определения прогибов изгибаемых железобетонных конструкций с учётом трещинообразования : автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.23.01 / Д.А. Панфилов; [Место защиты: Сам. гос. архитектур.-строит. акад.]. – Самара, 2012. – 20 с.
10. Мордовский С.С. Совершенствование расчёта прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов : автореф. дис. канд. техн. наук. / С.С. Мордовский [Место защиты: Сам. гос. архитектур.-строит. акад.]. – Самара, 2013. – 19 с.
11. СНиП 21-01-97*. Пожарная безопасность зданий и сооружений.
12. Методические рекомендации по уточнённом расчёту железобетонных элементов с учётом полной диаграммы сжатия бетона / НИИСК Госстроя СССР. – Киев, 1987. – 25 с.
13. Фёдоров В.С. Эффект повышения деформативности бетона в условиях кратковременного нестационарного нагрева под нагрузкой / В.С. Фёдоров, В.Е. Левитский // Вестник центрального регионального отделения РААСН. – Воронеж–Иваново, 2005. – С. 125–134.
14. Бондаренко В.М. Расчётные модели силового сопротивления железобетона / В.М. Бондаренко, Вл.И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004. – 472 с.

15. *Murashkin G.V.* Application of concrete deformation model for calculation of bearing capacity of reinforced concrete structures [Электронный ресурс] / G.V. Murashkin, V.G. Murashkin // MATEC Web of Conferences 196, 04008 (2018). XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering, France. – С. 7. – Режим доступа: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf_rsp2018_04008/mateconf_rsp2018_04008.html (дата обращения 21.02.2019).

16. *Murashkin G.V.* Durability of Operating Concrete and Reinforced concrete Structures / G.V. Murashkin, V.G. Murashkin // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – Volume 11. – Issue 2. – 2015. – P. 154–159.

Literatura

1. SP 63.133302.2012. ZHelezobetonnye konstruksii. – М., 2012.

4. *Murashkin G.V.* Modelirovanie diagrammy deformirovaniya betona / Murashkin G.V. Murashkin V.G. // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. – 1997. – № 10. – С. 4.

5. Ognestojkost' i požarnaya opasnost' stroitel'nyh konstruksij / V.S. Fedorov, V.E. Levitskij, I.S. Molchadskij, A.V. Aleksandrov. – М. : ASV, 2009. – 408 s.

6. *Nizina T.A.* Vliyanie mineral'nyh dobavok na reologicheskie i prochnostnye karakteristiki tsementnyh kompozitov / T.A. Nizina, A.V. Balbalin // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. – 2012. – № 2. – С. 148–153.

7. *Kozlov A.V.* Model' deformirovaniya betona dlya rascheta s edinyh pozitsij normal'noarmirovannyh i perearmirovannyh

izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov : dissertatsiya kandidata tehnikeskikh nauk po spetsial'nosti 05.23.01, – Samara, 2005. – 110 s. : il.

8. *Pishhulev A.A.* Sovershenstvovanie rascheta prochnosti normal'nyh sechenij izgibaemyh zhelezobetonnyh konstruksij, s povrezhdennoj szhatoj zonoj : avtoref. dis... kand. tehn. nauk. / A.A. Pishhulev [Mesto zashhity: Sam. gos. arhitektur.-stroit. akad.]. – Samara, 2010. – 19 s.

9. *Panfilov D.A.* Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya progibov izgibaemyh zhelezobetonnyh konstruksij s uchedom treshhinoobrazovaniya: avtoreferat dis. ... kandidata tehnikeskikh nauk : 05.23.01 / D.A. Panfilov ; [Mesto zashhity: Sam. gos. arhitektur.-stroit. akad.]. – Samara, 2012. – 20 s.

10. *Mordovskij S.S.* Sovershenstvovanie rascheta prochnosti vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnyh elementov : avtoref. dis. kand. tehn. nauk. / S.S. Mordovskij [Mesto zashhity: Sam. gos. arhitektur.-stroit. akad.]. – Samara, 2013. – 19 s.

11. SNiP 21-01-97*. Požarnaya bezopasnost' zdaniy i sooruzhenij.

12. Metodicheskie rekomendatsii po utochnennomu raschetu zhelezobetonnyh elementov s uchedom polnoj diagrammy szhatiya betona / NIISK Gosstroya SSSR. – Kiev, 1987. – 25 s.

13. *Fedorov V.S.* Effekt povysheniya deformativnosti betona v usloviyah kratkovremennogo nestatsionarnogo nagreva pod nagruzkoj / V.S. Fedorov, V.E. Levitskij // Vestnik tsentral'nogo regional'nogo otdeleniya RAASN. – Voronezh-Ivanovo, 2005. – С. 125–134.

14. *Bondarenko V.M.* Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov. – М. : ASV, 2004. – 472 s.

Мурашкин Василий Геннадьевич (Самара). Заместитель директора по строительству ЗАО «Экология-Сервис» (443099, Самара, ул. Чернореченская, д. 21, оф. 442А). E-mail: murashkin@gradholding.ru.

Murashkin Vasily Gennadievich (Samara). Deputy Director for Construction at "ZAO Ekologiya-Servis" (21, Chernorechenskaya St., off. 442A, Samara, 443030). E-mail: murashkin@gradholding.ru.