

ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА

В.И. Андреев, Л.С. Полякова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: В статье рассмотрено влияние повышенных температур в интервале от 20°C до 800°C на механические свойства бетонов: термическое расширение, модуль упругости, коэффициент поперечной деформации, прочность. Предложены функции, характеризующие зависимости механических характеристик бетона от температуры, а также функции, аппроксимирующие нелинейную диаграмму деформирования бетона при повышенных температурах.

Ключевые слова: нелинейно упругий материал, неоднородность, бетон, повышенные температуры

INFLUENCE OF ELEVATED TEMPERATURES ON MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

Vladimir I. Andreev, Lyudmila S. Polyakova

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

Abstract: The paper considers the influence of elevated temperatures in the range from 20°C to 800°C in the mechanical properties of the concrete the thermal expansion, elastic modulus, shear deformation coefficient, strength. Functions describing the dependences of the mechanical characteristics of concrete on temperature as well as functions approximating the nonlinear diagram deformation of concrete at elevated temperatures are proposed.

Keywords: nonlinearity, inhomogeneity, concrete, elevated temperature

ВВЕДЕНИЕ

В обычных условиях работы бетонные и железобетонные конструкции часто подвергаются воздействиям не силового характера, вызывающим изменения их деформированного состояния. Действие температуры существенно меняет характер работы сооружения. Под влиянием повышенных и отрицательных температур в сооружении возникает неоднородность бетона, обусловленная изменением его свойств.

Проблема расчета железобетонных сооружений с учетом температуры состоит в разработке методов, учитывающих физическую нелинейность деформирования железобетона в условиях существенной неоднородно-

сти и анизотропии материала, а также особенности развития температурно-усадочных и упругих деформаций бетона.

В статье приводится описание влияния повышенных температур на механические свойства бетонов. В основном рассматривается диапазон температур от 20°C до 200°C, так как он охватывает широкую область эксплуатационных режимов работы железобетонных конструкций. При более высоких температурах применяются специальные жаростойкие бетоны.

Воздействие повышенных температур на бетон вызывает температурные деформации, изменение упругих характеристик (модуль

упругости, коэффициент поперечной деформации) и прочностных свойств материала, влияет на общую диаграмму деформирования бетона.

1. ВЫНУЖДЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Воздействие температуры на ненагруженный бетон приводит к возникновению в нем температурных деформаций. Общая величина деформаций ненагруженного бетона при действии повышенных температур включает три вида деформаций – деформации усадки, обратимые и необратимые температурные деформации. Соответственно температурно-усадочные деформации бетона могут быть определены по формуле:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_T^{ir}(T) + \varepsilon_T^r(T) - \varepsilon_{shr}(T), \quad (1)$$

где $\varepsilon_T^{ir}(T)$ и $\varepsilon_T^r(T)$ – соответственно необратимые и обратимые температурные деформации при нагреве бетона до температуры T ; $\varepsilon_{shr}(T)$ – деформации усадки бетона при повышенной температуре T .

Необратимые температурные деформации определяются по формуле:

$$\varepsilon_T^{ir}(T) = \alpha^{ir}(T)\Delta T, \quad (2)$$

где $\alpha^{ir}(T)$ – коэффициент линейных необратимых температурных деформаций; $\Delta T = T - T_0$, где $T_0 = 20^\circ$ – значение нормальной температуры.

В общем случае значение коэффициента α^{ir} зависит от температуры, скорости нагрева и влажности бетона к началу нагрева. Однако для бетона, имеющего при нормальной температуре влажность, близкую к равновесной, коэффициент α^{ir} зависит только от температуры (рисунок 1) и аппроксимируется выражением:

$$\alpha^{ir}(T) = 1,35 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(-0,027\Delta T), \quad (3)$$

В расчетах принимается, что необратимые температурные деформации полностью развиваются в процессе первого кратковременного нагрева, за исключением температур нагрева до 90°C . Для этого диапазона условно принимается, что в процессе первого нагрева развивается 50% необратимых деформаций, остальные – в течение последующих 40 часов изотермических испытаний [1].

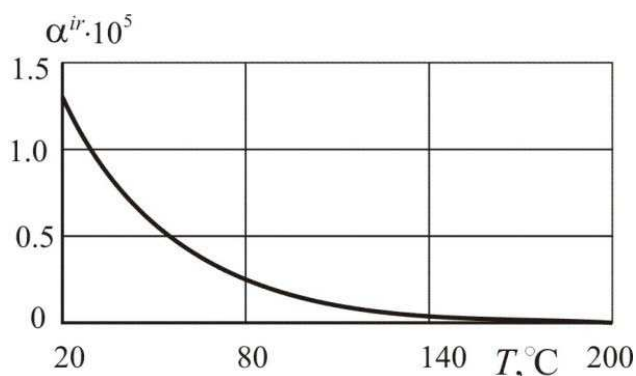


Рисунок 1. Коэффициент линейных необратимых деформаций.

Обратимые температурные деформации характеризуются коэффициентом линейных обратимых температурных деформаций и определяются по формуле:

$$\varepsilon_T^r(T) = \alpha^r(T)\Delta T, \quad (4)$$

Коэффициент обратимой линейной температурной деформации бетона, имеющего влажность, равновесную со средой, зависит только от температуры (рис. 2) и аппроксимируется выражением:

$$\alpha^r(T) = 0,76 \cdot 10^{-5} + 7,5 \cdot 10^{-8} \cdot \exp(0,02\Delta T) \quad (5)$$

Деформации усадки бетона определяются по формуле:

$$\varepsilon_{shr} = -\beta\Delta U \quad (6)$$

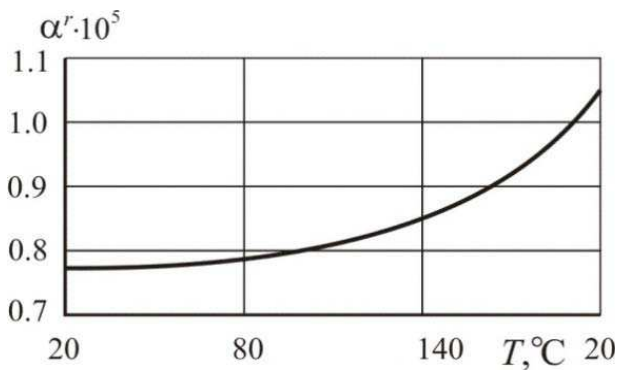


Рисунок 2. Коэффициент линейных обратимых деформаций.

На всем диапазоне повышенных температур зависимость между коэффициентом линейной усадки, температурой и влажностью бетона может быть удовлетворительно аппроксимирована формулой [2]:

$$\beta(T, U) = \beta_0 - 1,37 \cdot 10^4 \cdot \Delta T + 5,6 \cdot 10^{-2} \exp\left(-2,5 \cdot 10^3 \cdot \frac{U}{\Delta T}\right) \quad (7)$$

где β_0 - коэффициент линейной усадки при нормальной температуре (для тяжелого бетона принимается $3 \cdot 10^{-2}$); U - влажность бетона при повышенной температуре T . Таким образом формула (6) для повышенных температур примет вид:

$$\varepsilon_{shr} = -\beta(T, U)\Delta U, \quad (8)$$

Для достоверного определения усадочных деформаций бетона при действии повышенных температур требуется достаточно точная исходная информация о полях распределения влажности в бетоне рассчитываемой конструкции при нормальной и повышенной температурах. Если эта информация отсутствует, можно пользоваться упрощенной методикой расчетного определения усадочных деформаций. В этом случае в формуле (8) параметры, являющиеся функциями изменения влажности бетона, заменяют

новыми параметрами, являющимися функциями времени действия температуры. Подробно методика изложена в [3].

2. МОДУЛЬ УПРУГОСТИ

Модуль упругости тяжелого бетона зависит в основном от температуры нагрева и практически не зависит от длительности ее действия. При первом кратковременном нагреве отмечается резкое уменьшение модуля упругости, которое в зависимости от температуры составляет 20-42%. Длительное изотермическое действие температуры не вызывает дальнейшего изменения модуля упругости. Изменение начального модуля упругости бетона при повышенных температурах показано на рисунке 3 и описывается соотношением:

$$E(T) = E_0 \cdot (T_0 / T)^{0,24} \quad (9)$$

где E_0 - модуль упругости при нормальной температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

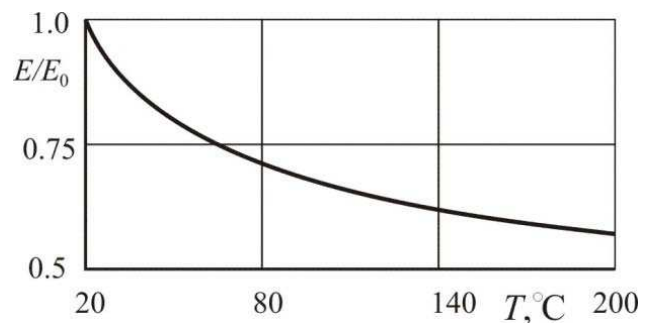


Рисунок 3. Изменение модуля упругости бетона.

3. КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА

Коэффициент поперечных деформаций бетона практически не зависит от температуры и заметно снижается только при температурах, близких к 200°C (рис. 4). Эту зависимость можно описать формулой:

$$\nu(T) = \nu_0 - 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot (T_0 / T)^{-2,5}, \quad (10)$$

где $\nu_0 = 0,24$ - коэффициент Пуассона при нормальной температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

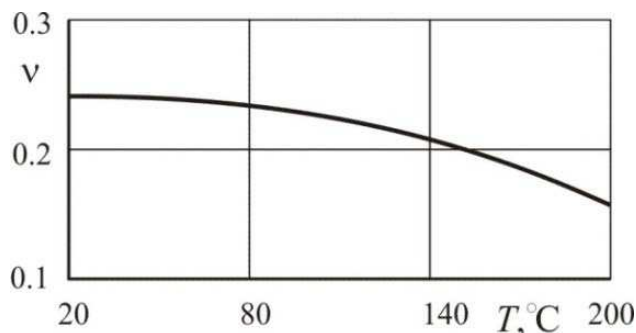


Рисунок 4. Коэффициент поперечных деформаций.

4. ДИАГРАММА ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА

Прочность тяжелого бетона на осевое сжатие при повышенных температурах зависит от температуры нагрева, длительности ее действия и режима испытания. Наибольшее снижение прочности отмечается при первом кратковременном нагреве. Длительное изотермическое действие повышенной температуры по сравнению с кратковременным нагревом приводит к росту прочности бетона. Остывание до нормальной температуры после кратковременного нагрева и длительной изотермической выдержки не вызывает дальнейшего изменения прочности бетона [4]. Для построения методики расчета напряженно-деформированного состояния железобетонных сооружений с учетом температурных воздействий необходимо иметь аналитические зависимости, описывающие полную диаграмму деформирования бетона при повышенных температурах. Диаграмма напряжений $\sigma - \varepsilon$ определяется из опытов на одноосное сжатие, но в общем случае, для описания объемного напряженного состояния, используется диаграмма $\sigma_i - \varepsilon_i$,

связывающая интенсивности напряжений и деформаций. Для преобразования опытных данных деформирования бетона при сжатии в условиях повышенных температур в режиме длительного нагрева, полученных в [1], использовались формулы:

$$\sigma_i = \sigma, \quad \varepsilon_i = \varepsilon - \frac{1 - 2\nu_0}{3E_0} \sigma, \quad (11)$$

Для аппроксимации нелинейной диаграммы деформирования удобно использовать зависимость с тремя константами [5]:

$$\sigma_i = E\varepsilon_i - A\varepsilon_i^\alpha \quad (12)$$

где E - начальный модуль упругости, A - константа, имеющая размерность напряжений, α - показатель степени.

Данная зависимость позволяет достаточно точно аппроксимировать опытные данные и, кроме того, при $\varepsilon_i \rightarrow 0$ автоматически переходит в закон Гука для линейно-упругого материала.

Возникающая в результате воздействия повышенных температур неоднородность бетона учитывается заменой констант E , A , и α на функции $E(T)$, $A(T)$ и $\alpha(T)$. Полученные диаграммы деформирования хорошо аппроксимируются с помощью функций:

$$\begin{aligned} E(T) &= E_0 (T_0 / T)^{k_E} \\ A(T) &= A_0 (T_0 / T)^{k_A} \\ \alpha(T) &= \alpha_0 (T_0 / T)^{k_\alpha} \end{aligned} \quad (13)$$

со следующими значениями коэффициентов:

E_0 , МПа	k_E	A_0 , МПа	k_A	α_0 , МПа	k_α
1199	0,24	115000	1,028	1,821	0,062

На рисунке 5 представлены диаграммы деформирования обычного бетона при повы-

шенных температурах: 1 – кривая деформирования бетона при $T = T_0 = 20^\circ\text{C}$, 2 – при $T = 60^\circ\text{C}$, 3 – при $T = 120^\circ\text{C}$, 4 – при $T = 200^\circ\text{C}$.

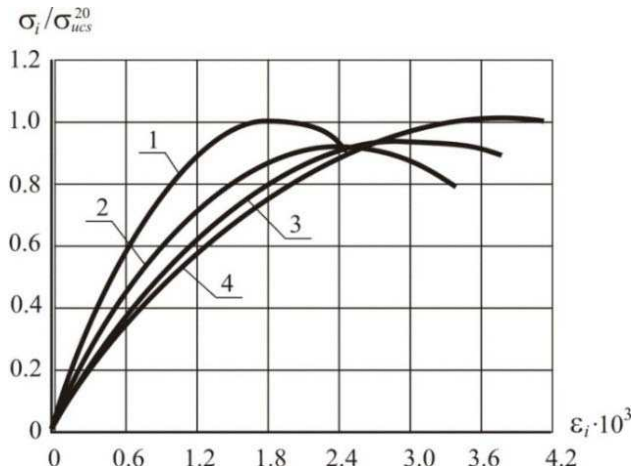


Рисунок 5. Диаграммы деформирования обычного бетона в условиях повышенных температур, σ_{ucs}^{20} - прочность бетона на сжатие при $T = 20^\circ\text{C}$.

Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия температур свыше 200°C , выполняются из жаростойкого бетона. В [6] приведены диаграммы деформирования жаростойких бетонов трех различных составов при температурах до 800°C в режиме длительного нагрева. Для жаростойкого бетона на портландцементе были получены диаграммы $\sigma_i - \epsilon_i$, которые аппроксимируются зависимостью (12) с заменой констант E , A , и α на функции:

$$\begin{aligned} E(T) &= E_0 + k_{E1} \cdot \Delta T^{0,5} + k_{E2} \cdot \Delta T^{1,5}, \\ A(T) &= A_0 + k_{A1} \cdot \Delta T^{1,5} + k_{A2} \cdot \Delta T^{1,6} \\ \alpha(T) &= \alpha_0 + k_{\alpha1} \Delta T^{1,2} + k_{\alpha2} \Delta T^{1,5} \end{aligned} \quad (14)$$

со следующими значениями коэффициентов:

E_0 , МПа	117100
k_{E1}	-5911,3
k_{E2}	4,8606
A_0 , МПа	1826000
k_{A1}	121792
k_{A2}	-666,95
α_0	1,43
$k_{\alpha1} \cdot 10^3$	1,395
$k_{\alpha2} \cdot 10^3$	-2,063

На рисунке 6 представлены диаграммы деформирования жаростойкого бетона при повышенных температурах: 1 – кривая деформирования бетона при $T = T_0 = 20^\circ\text{C}$, 2 – при $T = 300^\circ\text{C}$, 3 – при $T = 800^\circ\text{C}$.

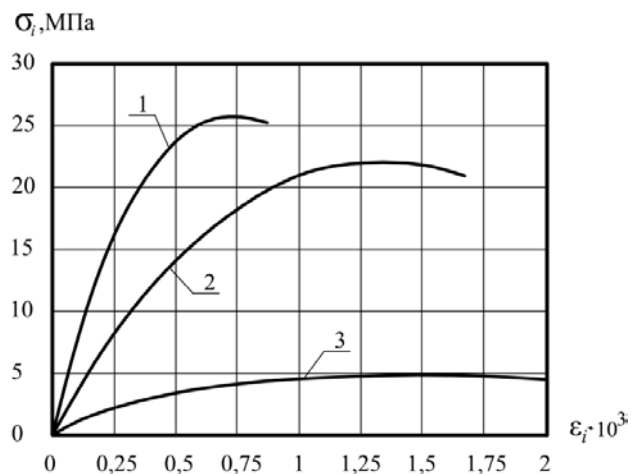


Рисунок 6. Диаграммы деформирования жаростойкого бетона на портландцементе в условиях повышенных температур.

На рисунке 7 представлены диаграммы деформирования обычного и жаростойкого бетонов на одном графике. Для сравнения приведены кривые деформирования бетонов одного класса по прочности на сжатие при температурах $T = 20^\circ\text{C}$ и $T = 200^\circ\text{C}$. На рисунке 7: 1 – кривая деформирования жаростойкого бетона при $T = T_0 = 20^\circ\text{C}$, 2 – то же при $T = 200^\circ\text{C}$, 3 – кривая деформирования обычного бетона при $T = T_0 = 20^\circ\text{C}$, 4 – то же при $T = 200^\circ\text{C}$.

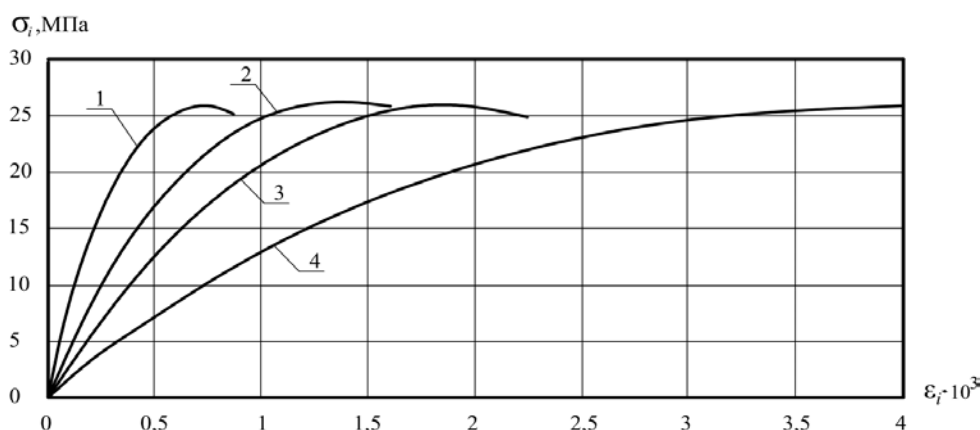


Рисунок 7. Диаграммы деформирования обычного и жаростойкого бетонов.

Из графика видно, что при температурах до 200°C прочность бетонов не снижается, но возрастают предельные деформации, при этом у обычного бетона значения предельных деформаций выше чем у жаростойкого.

При повышении температуры свыше 200°C обычный бетон уже при температуре около 400°C теряет основную часть своей прочностью. При нагреве до 300°C несущая способность жаростойкого бетона снижается незначительно. Нагрев жаростойкого бетона в интервале 300-800°C приводит к постепенному снижению прочности и при $T = 800^{\circ}\text{C}$ остается около 20% начальной прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные зависимости характеристик бетона от температуры можно использовать для расчета бетонных и железобетонных конструкций. Существует большая группа железобетонных инженерных сооружений, подвергающихся в процессе эксплуатации технологическому нагреву и действию наружных температур. К ним относятся дымовые трубы, силосы для хранения горячих продуктов, резервуары для нефти и нефтепродуктов, грануляционные башни и ряд других сооружений. Жаростойкие бетоны и конструкции из них применяются при строительстве туннельных печей и футеровке вагонеток на предприятиях строительных материалов, фундаментов под

промышленные печи и дымовые трубы, боровов и дымовых труб, коксовых батарей, полов горячих цехов промышленных предприятий и т.п. Температурные воздействия для рассматриваемых групп инженерных сооружений часто являются осесимметричными. Постоянные и длительно действующие нагрузки также для многих сооружений носят осесимметричный характер. В [7] предложен численный метод решения осесимметричных задач с учетом физической нелинейности и неоднородности материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кричевский А.П.** Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия. – М.: Стройиздат, 1984. – 149 с.
2. **Карпенко Н.И., Ерышев В.А., Латышева Е.В., Бондаренко А.С.** Деформации железобетонного элемента с учетом усадочных деформаций // Вестник волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура, 2013, с. 344-357.
3. **Андреев В.И.** Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел. – М.: Издательство АСВ. 2002. – 288 с.

4. **Карпенко Н.И.** Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
5. **Лукаш П.А.** Основы нелинейной строительной механики. – М.: Стройиздат, 1978. – 208 с.
6. **Ушаков А.В.** Основные закономерности деформирования обычного и жаростойких бетонов при нагреве. Дисс. канд. технических наук. – Волгоград, 2006. – 212 с.
7. **Андреев В.И., Полякова Л.С.** Физически нелинейные задачи для неоднородных толстостенных оболочек // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering / Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций, Volume 12, Issue 4, 2016, pp. 36-40.
5. **Lukash P.A.** Osnovy Nelineynoy Stroitel'noy Mekhaniki [Fundamentals of Nonlinear Construction Mechanics]. Moscow, Stroiizdat, 1978, 208 pages.
6. **Ushakov A.V.** Osnovnyye Zakonomernosti Deformirivaniya Obychnykh i Zharostoykikh Betonov pri Nagreve [Basic Regularities of Deformation of Ordinary and Heat-resistant Concrete During Heating]. Diss. Cand. Technical Sciences, Volgograd, 2006, 212 pages.
7. **Andreev V.I., Polyakova L.S.** Fizicheski Nelineynyje Zadachi dlya Neodnorodnykh Obolochek [Physically Nonlinear Problems for Inhomogeneous Thick-Walled Shells]. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. Volume 12, Issue 4, 2016, pp. 36-40.

REFERENCES

1. **Krichevsky A.P.** Raschet Zhelezobetonnykh Inzhenernykh Sooruzheniy na Temperaturnyye Vozdejstviya [Calculation of Reinforced Concrete Engineering Structures for Temperature Effects]. Moscow, Stroiizdat, 1984, 149 pages.
2. **Karpenko N.I., Eryshev V.A., Latysheva E.V., Bondarenko A.S.** Deformatsii Zhelezobetonnoogo Elementa s Uchetom Usadochnykh Deformatsiy [Deformations of a Reinforced Concrete Element with Allowance for Shrinkage Deformations]. Bulletin of the Volgograd State Architectural and Construction University. Series: Construction and Architecture, 2013, pp. 344-357.
3. **Andreyev V.I.** Nekotoryye Zadachi i Metody Mekhaniki Neodnorodnykh Tel [Some Problems and Methods of Mechanics of Inhomogeneous Bodies]. Moscow, Publisher ASV, 2002, 288 pages.
4. **Karpenko N.I.** Obshchiye Modeli Mekhaniki Zhelezobetona [General Models of Mechanics of Reinforced Concrete]. Moscow, Stroyizdat, 1996, 416 pages.

Андреев Владимир Игоревич, академик РААСН, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой сопротивления материалов, НИУ МГСУ, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: asv@mgsu.ru.

Полякова Людмила Сергеевна, магистр кафедры сопротивления материалов, НИУ МГСУ, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: l.poliakova@inbox.ru

Vladimir I. Andreev, Full Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dr.Sc., Professor, Head of the Department of Strength of Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26, Yaroslavl'skoe Shosse, Moscow, 129337, Russia; e-mail: asv@mgsu.ru.

Lyudmila S. Polyakova, MA student the Department of Strength of Materials, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26, Yaroslavl'skoe Shosse, Moscow, 129337, Russia; e-mail: l.poliakova@inbox.ru.