

УДК 624.012.082:692.2

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-139-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-139-147)

EDN: NKFBOS

К ВОПРОСУ О КОЭФФИЦИЕНТЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВЛАЖНОЙ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.А. ТИТАЕВ^{1,2,✉}, канд. техн. наукИ.А. ЧЕРНЫЙ^{1,2}Б.С. СОКОЛОВ¹, канд. техн. наукД.В. ТИТАЕВ³

¹ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Каширское шоссе, д. 31, г. Москва, 115409, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Каменная кладка является конструктивно неоднородным материалом (композитным), что обуславливает ортотропность ряда ее физико-механических характеристик, одна из которых – коэффициент термической деформации. Статья посвящена анализу коэффициента термической деформации каменной кладки в условиях ее работы в различных температурно-климатических условиях. В работе выполнен обзор исследований поведения кладки при перепадах температуры, в том числе при различной влажности.

Цель. Проанализировать поведение каменной кладки при замораживании. Сопоставляя результаты исследований увлажненных образцов каменной кладки, получить зависимость коэффициента термической деформации от ее влажности при отрицательных температурах.

Материалы и методы. Основой для исследования является материал М.А. Мурого, опубликованный в работе «Температурные деформации влажной кладки», и некоторые его ранее не опубликованные данные. При выполнении исследований применялся регрессионный анализ.

Результаты. Получены графические и математические зависимости коэффициента термической деформации каменной кладки в виде кусочно-линейных функций при отрицательных температурах, учитывающие влажность материала.

Выводы. Полученные в данной статье формулы коэффициентов температурной деформации наглядно показывают зависимость данного коэффициента от влажности при замораживании. Представленные зависимости в виде кусочно-линейных функций позволяют их использовать при расчетах напряженно-деформированного состояния каменных конструкций с применением современных программных комплексов.

Широкий диапазон значений коэффициентов термической деформации кладки, представленный в литературных источниках, указывает на фрагментарность исследований, основывающихся на использовании керамических камней одного производителя. Ввиду важности этой характеристики для определения напряженно-деформированного состояния кладки следует выполнить масштабные исследования со систематизацией результатов при логически обоснованном максимальном количестве варьируемых параметров кладки, а по результатам исследований внести изменения в нормы проектирования и конструирования каменных конструкций.

Ключевые слова: коэффициент термической деформации, кладка при замерзании, влажность массовая

Для цитирования: Титаев В.А., Черный И.А., Соколов Б.С., Титаев Д.В. К вопросу о коэффициенте термической деформации влажной каменной кладки при отрицательных температурах. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):139–147. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-139-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-139-147)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность автору работы «Температурные деформации влажной кладки» Михаилу Алексеевичу Мурому за предоставленные материалы лабораторных исследований для написания данной статьи.

Поступила в редакцию 22.05.2024

Поступила после рецензирования 17.06.2024

Принята к публикации 20.06.2024

ON THE COEFFICIENT OF LINEAR THERMAL EXPANSION OF WET MASONRY AT FREEZING TEMPERATURES

V.A. TITAEV^{1,2,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

I.A. CHERNY^{1,2}

B.S. SOKOLOV¹, Cand. Sci. (Engineering)

D.V. TITAEV³

¹ Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

³ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye Shosse, 31, Moscow, 115409, Russian Federation

Abstract

Introduction. Stone masonry is a structurally heterogeneous (composite) material; therefore, a number of its physical and mechanical characteristics are orthotropic, including the coefficient of linear thermal expansion. The article analyses the coefficient of linear thermal expansion of stone masonry under the conditions of its operation in different temperature and climatic conditions, including different humidity.

Aim. To obtain the dependence of the coefficient of linear thermal expansion on masonry humidity at freezing temperatures by comparing the results of studies of wet masonry samples.

Materials and methods. The study is based on the data of M.A. Mury published in his work "Temperature deformations of wet brickwork" and some of his previously unpublished data. Regression analysis was used to perform the research.

Results. There were obtained graphical and mathematical dependences of the coefficient of thermal expansion of masonry in the form of piecewise linear functions at freezing temperatures, with account of material humidity.

Conclusions. The presented dependences can be used in calculations of the stress-strain state of masonry structures with the use of modern program complexes. Published data on the coefficient of linear thermal

expansion of masonry show a wide range of their values, which indicates fragmentary research based on the use of ceramic stones from a single manufacturer. Therefore, large-scale research with systematization of the results with a logically justified maximum number of varying parameters of masonry should be carried out, with subsequent amendments to the norms of design and construction of masonry structures based on the results of the research.

Keywords: coefficient of linear thermal expansion, masonry at freezing, mass humidity

For citation: Titaev V.A., Cherny I.A., Sokolov B.S., Titaev D.V. On the coefficient of linear thermal expansion of wet masonry at freezing temperatures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):139–147. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-139-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-139-147)

Authors contribution statement

All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements

The authors would like to thank the author of the work "Temperature deformations of wet brickwork", Mikhail A. Murym, for providing laboratory research materials used in this paper.

Received 22.05.2024

Revised 17.06.2024

Accepted 20.06.2024

Каменная кладка является конструктивно неоднородным материалом, в котором основной объем занимает керамический камень, имеющий весьма разнообразный минеральный состав, в котором присутствуют кристаллические новообразования, стеклофаза, остатки исходных тугоплавких компонентов, характеризующиеся коэффициентами термического расширения. Чем более неоднороден минералогический состав камня, тем больше вероятность появления начальных микротрещин в керамическом камне при перепадах температуры в процессе его работы в составе кладки. Микротрещины в камне могут появиться уже в период остывания после термической обработки в процессе его изготовления (при нарушении технологии изготовления).

Любой строительный материал, включая каменную кладку, испытывает деформации (изменяет объем и линейные размеры) при нагреве или охлаждении. Величина этих деформаций зависит от коэффициента теплового расширения – физической величины, характеризующейся относительным изменением линейных размеров каменной кладки с изменением температуры на 1 °C (K).

Смысл коэффициента линейной термической деформации (КЛТД) характеризует выражение:

$$\alpha_t = \frac{l_T - l_0}{l_T(T - T_0)} = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dT}, \quad (1)$$

где l_0 – исходный размер образца;

l_T – размер образца после нагрева;

T_0 – исходная температура;
 T – конечная температура нагрева.

Значения КЛТД для кладки приведены в российских и зарубежных нормах: СП 15.13330.2020 [1], СП 327.1325800.2017 [2], EN 1996-1-1 [3]. Исследованиям КЛТД каменной кладки посвящены работы [4–6] и др.

Для удобства сравнения значений КЛТД кладки в воздушно-сухом состоянии данные из различных источников сведены в табл. 1. Ввиду того, что каменная кладка является конструктивно неоднородным материалом с явно выраженными ортотропными свойствами, приведены значения КЛТД поперек и вдоль рядов кладки.

В данной статье использованы материалы лабораторных исследований КЛТД кирпичных кладок, приведенные в работе [6], а также материалы, в нее не включенные.

Каменная кладка является двухкомпонентным композитным материалом. Для определения его средневзвешенного значения КЛТД воспользуемся формулой, предложенной Г. И. Горчаковым в работе [7] для пористого материала, применительно к каменной кладке, включающей два разнородных материала (кирпич и кладочный раствор):

$$\alpha_{dry}^x = \frac{\alpha_{tb} \times V_b \times K_b + \alpha_{tm} \times V_m \times K_m}{V_b \times K_b + V_m \times K_m}, \tag{2}$$

где α_{tb} , α_{tm} – КЛТД кирпича и раствора;
 V_b , V_m – объем, занимаемый кирпичами и раствором в образце кладки;
КТД – модуль объемной деформации кирпича;

$K_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\vartheta_m)}$ – модуль объемной деформации раствора кладки;
 $K_b = \frac{E_b}{3(1 - 2\vartheta_b)}$ – модуль объемной деформации раствора кладки;
 E_b , E_m – модули деформации кирпича и раствора;
 ϑ_b , ϑ_m – коэффициенты Пуассона кирпича и раствора.

Подставляя значения полученных механических и геометрических характеристик лабораторных образцов из эксперимента в работе [6], получим:

$\alpha_{tb} = 5,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ из [8], $\alpha_{tm} = 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ по данным работы [8]; $V_b = 0,1014 \text{ м}^3$, $V_m = 0,0209 \text{ м}^3$;
 $E_b = 4000 \text{ МПа}$, $E_m = 10\,000 \text{ МПа}$; $\vartheta_b = 0,15$, $\vartheta_m = 0,2$; $K_b = \frac{4000}{3(1 - 2 \times 0,15)} = 1905 \text{ МПа}$,
 $K_m = \frac{10\,000}{3(1 - 2 \times 0,2)} = 5555 \text{ МПа}$;

Таблица 1

Коэффициент линейной термической деформации (КЛТД)

Table 1

Coefficient of linear thermal expansion (CLTE)

КЛТД, 10 ⁻⁶ °C ⁻¹	Работа [4]	Работа [6]		Работа [5]	СП 15.13330.2020 [1]	СП 327.1325800.2017 [2]	EN 1996-1-1 [3]
		полноте- лый	щеле- вой				
α_{dry}	6,0	7,2	6,5	6,6	5	6,5	4–8
α_{dry}^*	4,5	7,4	7,2				

$$\alpha_{dry}^x = \frac{5,5 \times 10^{-6} \times 0,1014 \times 1905 + 10 \times 10^{-6} \times 0,0209 \times 5555}{0,1014 \times 1905 + 0,0209 \times 5555} = 7,19 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Рассчитанное значение КЛТД практически совпадает с экспериментальными данными из работы [6] для кладки из полнотелого керамического кирпича (табл. 1), что может служить подтверждением достоверности результатов экспериментальных исследований автора.

Для пористых материалов, таких как каменная кладка или бетон, их КЛТД при увлажнении с последующим замораживанием не является неизменным.

Многие исследователи КЛТД бетона при его замораживании при различных значениях влажности отмечают, что графики зависимости деформаций при его замораживании носят криволинейный характер. Обширные исследования свойств замороженного бетона проведены и представлены в работе [9], исследованиям бетонов при замораживании посвящены труды ряда других исследователей.

Криволинейный характер развития деформаций бетона при замораживании объясняется фазовым переходом воды, находящейся в порах и капиллярах, из одного агрегатного состояния в другое. Рост кристаллов водяного льда сопровождается увеличением его объема, а также изменением соотношения и миграцией влаги в различных фазах (лед, переохлажденная вода и пар) в порах. При этом процессы миграции влаги наряду с температурой замораживания существенно изменяют соотношение указанных фазовых состояний в каждый момент времени. То есть термонапряженное состояние замораживаемого бетона является нестационарным. Кроме того, при определенных соотношениях влажности и отрицательной температуры бетона КЛТД является отрицательным. То есть при охлаждении линейные размеры бетонного образца могут увеличиваться. Покажем в качестве примера приведенный в СП 52-105-2009 [10] рисунок с графиками для определения КЛТД (рис. 1), по которым можно определить значения КЛТД при замораживании и оттаивании для различных значений влажности бетона при разных температурах.

Исследований каменной кладки при отрицательной температуре крайне мало. Работа автора М. А. Мурого [6] позволяет судить о значительных изменениях КЛТД для кладок из различных камней на цементно-песчаном растворе при различных значениях ее влажности и отрицательных температурах. На рис. 2 показаны лабораторные образцы кладки из силикатных и керамических камней, на которых проводились исследования КЛТД. Графическая интерпретация

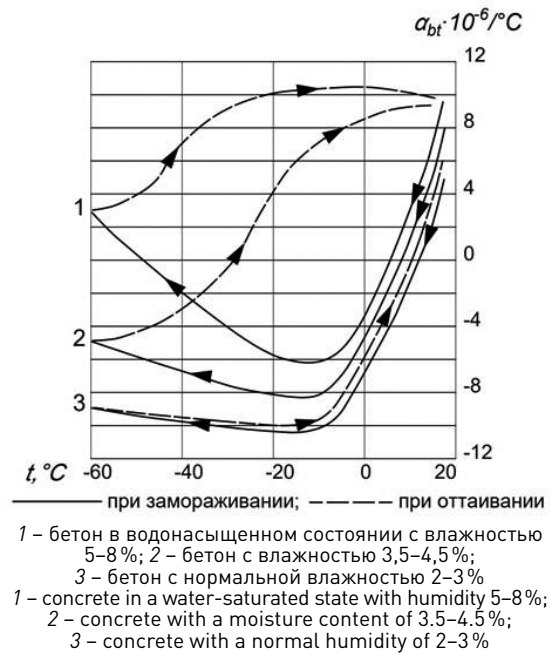


Рис. 1. КЛТД бетона на портландцементе с силикатным заполнителем

Fig. 1. CLTE of concrete on Portland cement with silicate aggregate



Рис. 2. Вид лабораторных образцов для исследования КЛТД, индикаторы часового типа
Fig. 2. Type of laboratory samples for CLTE research, dial indicators

результатов исследований КЛТД кладки из керамических полнотелых и щелевых кирпичей на цементно-песчаном растворе показана в табл. 2.

При статистической обработке результатов экспериментальных данных получены универсальные кусочно-линейные функции для определения КЛТД каменной кладки из полнотелого и щелевого керамического кирпича. В табл. 2 представлены функции КЛТД двух переменных (w – влажности и T – температуры). Учтен тот факт, что кладка является конструктивно-ортотропным материалом. Функции КЛТД вдоль рядов и поперек рядов кладки различны.

Исследования КЛТД в работе [6] были ограничены техническими возможностями при замораживании образцов и ограничивались температурой минус 20 °С. Проявления эффекта гистерезиса при определении КЛТД (при полном цикле замораживания и оттаивания) кладки, который имеется у бетона, не выявлено. Но это не означает, что он не будет выявлен при замораживании кладки до более низких температур и исследованиях кладки из камней других материалов и других заводов-производителей.

Вывод

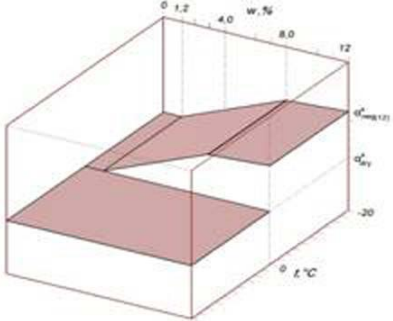
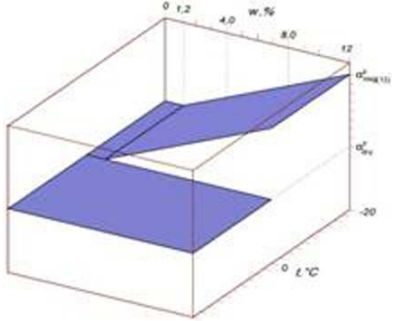
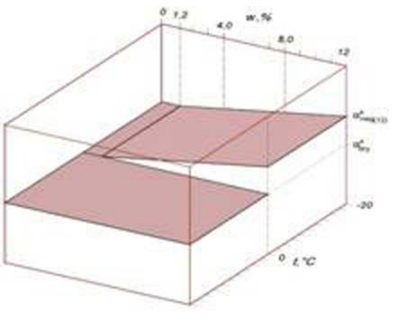
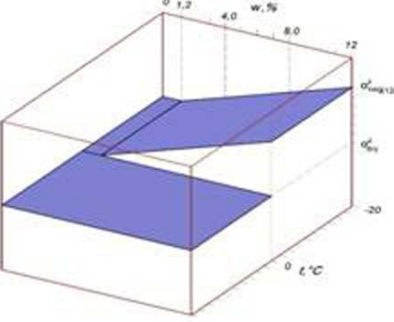
На основании данных экспериментальных исследований образцов каменной кладки, приведенных в работе [6], получены графические и эмпирические математические зависимости КЛТД в виде кусочно-линейных функций двух переменных для замораживаемой кладки при ее влажности в диапазоне от воздушно-сухой до $w = 12\%$. Данные функции позволяют задавать КЛТД каменных конструкций в явном виде при расчетах на термические воздействия с использованием современных программных комплексов для математического анализа.

Таблица 2

КЛТД кладки из полнотелых и щелевых керамических кирпичей

Table 2

CLTE of masonry made of solid and slotted ceramic bricks

Тип	Коэффициент линейной термической деформации (КЛТД), °C ⁻¹	
	Вдоль рядов кладки (по X)	Поперек рядов кладки (по Z)
Кирпич керамический щелевой		
	$\alpha_{tw}^x = \begin{cases} \alpha_{neg}^x, & T < 0 \\ \alpha_{dry}^x, & T \geq 0 \end{cases}$ где $\alpha_{neg}^x = \alpha_{dry}^x \begin{cases} 1, & w = 1,2 \\ 1 + \frac{w-1,2}{11,3(3)}, & 1,2 < w \leq 8 \\ 1,6 + \frac{w-8}{80}, & 8 < w \leq 12 \end{cases}$	$\alpha_{tw}^z = \begin{cases} \alpha_{neg}^z, & T < 0 \\ \alpha_{dry}^z, & T \geq 0 \end{cases}$ где $\alpha_{neg}^z = \alpha_{dry}^z \begin{cases} 1, & w = 1,2 \\ 1 + \frac{w-1,2}{11,74}, & 1,2 < w \leq 12 \end{cases}$
Кирпич керамический полнотелый		
	$\alpha_{tw}^x = \begin{cases} \alpha_{neg}^x, & T < 0 \\ \alpha_{dry}^x, & T \geq 0 \end{cases}$ где $\alpha_{neg}^x = \alpha_{dry}^x \begin{cases} 1, & w = 1,2 \\ 1 + \frac{w-1,2}{28,3}, & 1,2 < w \leq 12 \end{cases}$	$\alpha_{tw}^z = \begin{cases} \alpha_{neg}^z, & T < 0 \\ \alpha_{dry}^z, & T \geq 0 \end{cases}$ где $\alpha_{neg}^z = \alpha_{dry}^z \begin{cases} 1, & w = 1,2 \\ 1 + \frac{w-1,2}{17,3}, & 1,2 < w \leq 12 \end{cases}$
где w – массовая влажность кладки в процентах; $\alpha_{tw}^z, \alpha_{tw}^x$ – коэффициенты линейной термической деформации кладки с влажностью w поперек и вдоль рядов кладки соответственно; $\alpha_{dry}^z, \alpha_{dry}^x$ – коэффициенты линейной термической деформации кладки в воздушно-сухом состоянии (w ≈ 1,2%), °C⁻¹, поперек и вдоль рядов кладки соответственно.		

Список литературы

1. СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции. Москва: Минстрой России; 2020.
2. СП 327.1325800.2017. Стены наружные с лицевым кирпичным слоем. Правила проектирования, эксплуатации и ремонта. Москва: Минстрой России; 2020.
3. EN 1996-1-1: (Eurocodes). Design of masonry structures. General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Brussels; 2005.
4. *Зимин С.С.* Напряженно-деформированное состояние лицевого слоя многослойных каменных стен при климатических температурных воздействиях [диссертация]. Санкт-Петербург; 2020.
5. *Ишук М.К.* Анализ напряженно-деформированного состояния кладки лицевого слоя наружных стен. Жилищное строительство. 2008;(4):23–28.
6. *Мурый М.А.* Температурные деформации влажной кирпичной кладки. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2008;(1):79–85.
7. *Горчаков Г.И.* Коэффициенты температурного расширения и температурные деформации строительных материалов. Москва: Изд-во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР; 1968.
8. *Кожевников И.Г., Новицкий Л.А.* Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. 2-е изд. Москва: Машиностроение; 1982.
9. *Мазур Б.М.* Температурные деформации бетонов при низких отрицательных температурах и их влияние на долговечность железобетона [диссертация]. Москва; 1964.
10. СП 52-105-2009. Железобетонные конструкции в холодном климате и на вечномёрзлых грунтах. Москва: ФГУП «НИЦ «Строительство»; 2009.

References

1. SP 15.13330.2020. Masonry and reinforced masonry structures. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2020. (In Russian).
2. SP 327.1325800.2017. Exterior masonry walls with brick veneer. Rules of design, operation and repair. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2020. (In Russian).
3. EN 1996-1-1: (Eurocodes). Design of masonry structures. General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Brussels; 2005.
4. *Zimin S.S.* Stress-strain state of the front layer of multilayer stone walls under climatic temperature influences [dissertation]. Saint Petersburg; 2020. (In Russian).
5. *Ishchuk M.K.* Analysis of the stress-strain state of the masonry of the front layer of external walls. Zhilishchnoe Stroitel'stvo = Housing Construction. 2008;(4):23–28. (In Russian).
6. *Mury M.A.* Temperature deformations of wet brickwork. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Journal of Construction and Architecture. 2008;(1):79–85. (In Russian).
7. *Gorchakov G.I.* Thermal expansion coefficients and temperature deformations of building materials. Moscow: Publishing House of the Committee of Standards, Measures and Measuring Instruments under the USSR Council of Ministers; 1968. (In Russian).
8. *Kozhevnikov I.G., Novitsky L.A.* Thermophysical properties of materials at low temperatures. Handbook. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1982. (In Russian).
9. *Mazur B.M.* Temperature deformation of concrete at low negative temperatures and their influence on the durability of reinforced concrete [dissertation]. Moscow; 1964. (In Russian).
10. SP 52-105-2009. Concrete structures for cold climate and permafrost soil. Moscow: FSUE Research Center of Construction; 2009. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Александрович Титаев[✉], канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций, НИУ МГСУ, Москва

e-mail: titaev@bk.ru

тел.: +7 (499) 174-74-92

Vitaly A. Titaev[✉], Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of the Thin-Walled and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Associate Professor, Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

e-mail: titaev@bk.ru

tel.: +7 (499) 174-74-92

Иван Александрович Черный, инженер лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; магистрант Института промышленного и гражданского строительства, НИУ МГСУ, Москва

e-mail: kron_975@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-74-00

Ivan A. Cherny, Engineer of the Laboratory for Thin-Walled and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Master's student of the Institute of Industrial and Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

e-mail: kron_975@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-74-00

Борис Сергеевич Соколов, канд. техн. наук, заведующий лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: moo-shell@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-74-80

Boris S. Sokolov, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory for Thin-Walled and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: moo-shell@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-74-80

Денис Витальевич Титаев, аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва

e-mail: titaev-d@bk.ru

тел.: +7 (499) 324-77-77

Denis V. Titaev, Postgraduate student, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow

e-mail: titaev-d@bk.ru

tel.: +7 (499) 324-77-77

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author