



УДК: 539.3

DOI: 10.52409/20731523_2022_2_37

EDN: BYNQBR



Определение характеристик вязкоупругой модели стеклопластика по результатам изгиба труб квадратного сечения

Р.А. Каюмов¹, Ф.Р. Шакирзянов¹, Л.Р. Гимранов¹, А.Р. Гимазетдинов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г.Казань, Российская Федерация

Аннотация: В работе приводятся результаты экспериментов на трехточечный изгиб трубчатых образцов из пултрузионного композита, предложен один из простейших вариантов ядра ползучести при сдвиге этого материала, разработан метод идентификации характеристик этого ядра путем решения прямых и обратных задач деформирования балок в виде тонкостенных труб. Приводятся полученные этим методом сдвиговые характеристики предложенной вязкоупругой модели и сравнение расчетных и экспериментальных результатов.

Цель исследования – разработка методики определения сдвиговых характеристик вязкоупругой модели деформирования стеклопластика по результатам экспериментов на трехточечный изгиб тонкостенных труб. Для ее достижения было необходимо выполнить следующие задачи: эксперименты, выбрать вариант соотношений наследственной теории упругости, разработать метод решения прямой задачи изгиба балок с учетом поперечного сдвига и на ее основе разработать метод решения обратной задачи для определения сдвиговых характеристик.

Результаты. Проведены эксперименты на трехточечный изгиб труб квадратного сечения. Предложена методика идентификации характеристик ядра ползучести при сдвиге композитных материалов, армированных однонаправленно, на основе решения прямых и обратных задач деформирования тонкостенных труб, изготовленных из исследуемого материала.

Выводы. Значимость полученных результатов состоит в том, что механические характеристики вязкоупругой модели для пултрузионных стеклопластиков, полученные по предложенной методике их идентификации, позволяют получать хорошее согласование результатов аналитических расчетов с экспериментами. И методика проведения испытаний, и методика идентификации достаточно просты для использования на практике. Полученная модель наследственной теории упругости позволяет оценивать влияние вязкоупругих деформаций на напряженно-деформированное состояние элементов из стеклопластика.

Ключевые слова: стеклопластик, вязкоупругая модель, изгиб, механические характеристики, идентификация.

Для цитирования: Р.А. Каюмов, Ф.Р. Шакирзянов, Л.Р. Гимранов, А.Р. Гимазетдинов, Определение характеристик вязкоупругой модели стеклопластика по результатам изгиба труб квадратного сечения // Известия КГАСУ 2022 № 2(60), С.37-44, DOI: 10.52409/20731523_2022_2_37, EDN: BYNQBR

Determination of the characteristics of a viscoelastic fiberglass model based on the results of bending square section pipes

R.A. Kayumov¹

F.R. Shakirzyanov¹, L.R. Gimranov¹, A.R. Gimazetdinov¹,

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract :*Problem statement.* The paper presents the results of experiments on three-point bending of tubular samples made of pultrusion composite, one of the simplest variants of the creep core during shear of this material is proposed, a method for identifying the characteristics of this core by solving direct and inverse problems of deformation of beams in the form of thin-walled pipes is developed. The shear characteristics of the proposed viscoelastic model obtained by this method are presented and the calculated and experimental results are compared.

The purpose of the study is to develop a methodology for determining the shear characteristics of a viscoelastic model of fiberglass deformation based on the results of experiments on three-point bending of thin-walled pipes. To achieve it, it was necessary to perform the following tasks: experiments, choose a variant of the relations of the hereditary theory of elasticity, develop a method for solving the direct problem of bending beams taking into account transverse shear and, based on it, develop a method for solving the inverse problem to determine shear characteristics.

Results. Experiments on three-point bending of square-section pipes have been carried out. A method is proposed for identifying the characteristics of the creep core during shear of composite materials reinforced unidirectionally, based on solving direct and inverse problems of deformation of thin-walled pipes made of the material under study.

Conclusions. The significance of the obtained results lies in the fact that the mechanical characteristics of the viscoelastic model for pultrusion fiberglass obtained by the proposed method of their identification make it possible to obtain a good agreement of the results of analytical calculations with experiments. Both the test procedure and the identification method are quite simple to use in practice. The resulting model of the hereditary theory of elasticity allows us to evaluate the effect of viscoelastic deformations on the stress-strain state of fiberglass elements.

Keywords: fiberglass, viscoelastic model, bending, mechanical characteristics, identification.

For citation: R.A. Kayumov, F.R. Shakirzyanov, L.R. Gimranov, A.R. Gimazetdinov, Determination of the characteristics of a viscoelastic fiberglass model based on the results of bending square section pipes //News KSUAE 2022 №2 (60), p.37-44, DOI: 10.52409/20731523_2022_2_37, EDN: BYHQBR

1. Введение

Современное развитие многих отраслей промышленного производства характеризуется увеличением объема и расширением номенклатуры применяемых полимерных слоистых композиционных материалов, значительная часть которых изготавливается из угле- и стеклопластиков[1]. Эти материалы обладают уникальным комплексом физико-механических свойств, к которым следует отнести сравнительно высокую удельную прочность и жесткость[2].

Отличительными чертами этих материалов является анизотропия механических свойств всего материала и каждого его слоя, а также тем, что процессы производства композиционного материала и детали из него часто совмещены по времени[3-5]. Перечисленные особенности обуславливают возможность за счет рационального расположения слоев получить большую прочность и жесткость элементов конструкций при сохранении их массы или уменьшить массу при сохранении их прочности и жесткости[6,7]. Таким образом, наличие методов определения механических

характеристик композиционных материалов (в том числе и сдвиговых характеристик в вязкоупругой модели деформирования) имеет важное значение при расчете элементов конструкций из различных типов композитов[8].

Целью исследования является получение методики определения сдвиговых характеристик вязкоупругой модели деформирования стеклопластика по результатам экспериментов на трехточечный изгиб тонкостенных труб.

Для достижения этой цели было необходимо выполнить следующие задачи:

- провести испытания образцов из композитных материалов на трехточечный изгиб с пошаговым измерением нагрузки и прогиба;
- по результатам анализа экспериментальных данных выявить проявление у пултрузионного стеклопластика свойство ползучести и подобрать вариант соотношений наследственной теории упругости;
- разработать метод решения прямой задачи изгиба балок с учетом поперечного сдвига и на ее основе разработать метод решения обратной задачи для определения сдвиговых характеристик стеклопластика.

2. Материалы и методы.

При определении механических характеристик композитных материалов обычно проводят испытания на плоских образцах [9-13]. В данной работе образцы изготавливались иным методом, а именно, путем вырезания труб поперек армирования. После изготовления образцы выдерживались не менее 24 часов при температуре 24 градуса и влажности около 45%. Испытания проводились при температуре 24 градуса и влажности 45%.

Образцы в виде труб квадратного сечения испытывались на трехточечный изгиб. При нагружении осуществлялось пошаговое измерение нагрузки и прогиба.

Согласно ГОСТ число образцов было не менее 3. При проведении испытаний образцов стеклопластиковых композитных материалов соблюдались следующие ГОСТы:

ГОСТ 12423-66 (СТ СЭВ 885-78) Пластмассы. Условия кондиционирования и испытаний образцов.

ГОСТ 14359-69 Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования.

ГОСТ 25.601-80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей.

ГОСТ 25.604-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах.

Проведенные экспериментальные исследования образцов из пултрузионного стеклопластика дают следующие жесткостные характеристики:

модуль упругости при растяжении вдоль волокон $E = 30,2$ ГПа;

начальный модуль упругости при сдвиге G_{12} в плоскости 1-2: $G_{12} = 2,73$ ГПа [10].

Ниже приводятся результаты экспериментов, которые проводились на универсальной испытательной машине ИР 5082. (см.рис.1).

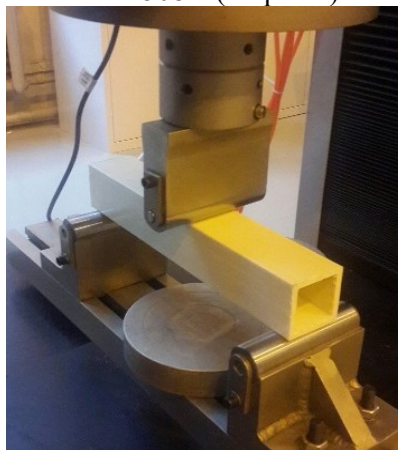


Рис.1 Общий вид проведения испытания.
Fig.1 General view of the test.

При обработке результатов были получены значения перемещений в различные моменты времени. (см. рис.2).

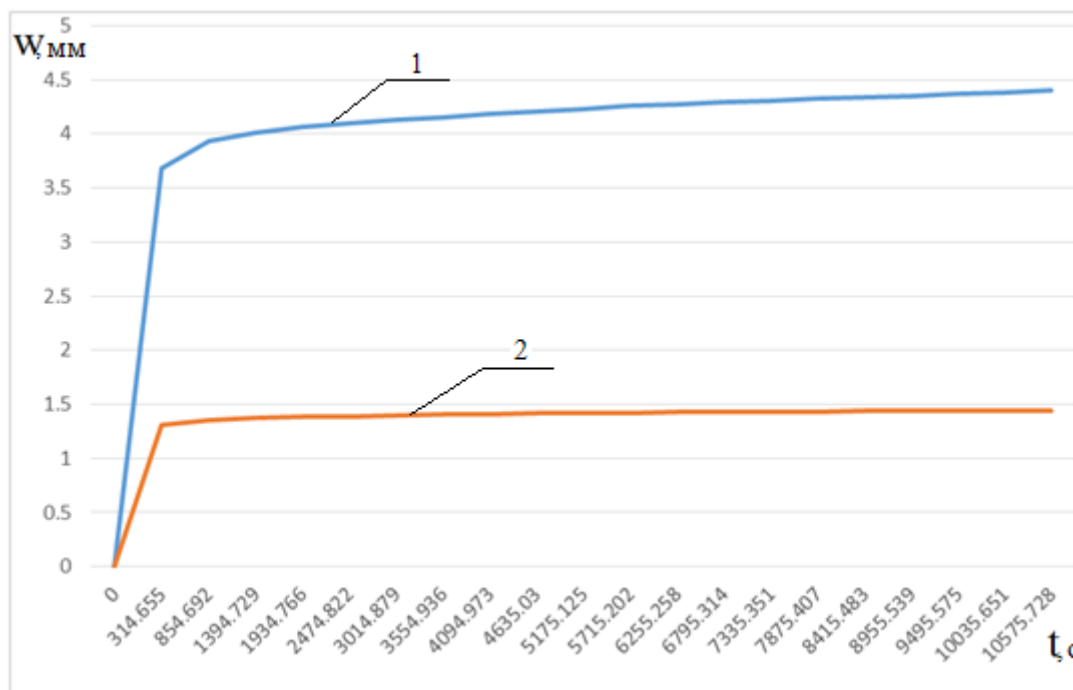


Рис.2 Зависимость время-перемещение (1-при $P_1=15\text{ кН}$, 2-при $P_2=5\text{ кН}$, t - сек)

Fig.2 Time-displacement dependence (1-at $P_1=15\text{ kN}$, 2-at $P_2=5\text{ kN}$, t - sec)

В общем случае зависимости между компонентами тензоров деформаций и компонентами тензора напряжений даже в случае плоского напряженного состояния в качестве аргументов будут содержать не менее трех инвариантов компонент напряжений и векторов, определяющих положение осей ортотропии. Для определения этих зависимостей требуется проводить сложные эксперименты и применять специальные методы их анализа. Поэтому часто используют различные подходы для их упрощения путем введения гипотез, в том числе, их математического анализа (см., например, [12-14]), основанных на использовании особенностей свойств композитных материалов. Здесь используются следующие упрощающие предположения. Во-первых, как и в [12,13], считается, что неупругие деформации возникают только при сдвиге (в осях ортотропии). Во-вторых, предлагается обобщение гипотезы Качанова [15], согласно которому упругие и неупругие деформации развиваются независимо друг от друга и зависят только от уровня напряжений.

Рассмотрим задачу определения вязкоупругих характеристик на сдвиг путем анализа результатов испытаний на трехточечный изгиб короткой балки в виде трубы квадратного сечения. Общий прогиб будет состоять из двух слагаемых [10] - прогиба от изгибающего момента и прогиба от сдвига под действием поперечной силы.

$$w_{\max} = w^{\text{изг}} + w^{\text{сдв}} \quad (1)$$

$$w^{\text{изг}} = \frac{Pl^3}{48EJ} \quad (2)$$

Где l - расстояние между опорами. Прогиб от сдвига можно разложить на две составляющие – упругую и вязкоупругую:

$$w^{\text{сдв}} = w^{\text{упруг}} + w^{\text{в}} = \frac{Pla}{4G_{12}A} + \frac{\gamma^v l}{2} \quad (3)$$

Где, P – нагрузка, A – площадь сечения, γ^v – неупругая часть деформации сдвига. Коэффициент a зависит от формы сечения, который в нашем случае [10] имеет значение $a=1,878$.

Для деформации γ^v примем теорию нелинейной вязкоупругости в виде:

$$\gamma^v = B \int_0^t \frac{\tau^n}{(t-\theta)^\alpha} \cdot d\theta \quad (4)$$

На этапе нагружения считаем, что

$$\tau = \theta \tau_{\max} / t_1 \quad (5)$$

Тогда

$$\gamma_1^v(t_1) = B \int_0^{t_1} \frac{(\tau_{\max} \frac{\theta}{t_1})^n}{(t_1 - \theta)^\alpha} \cdot d\theta \quad (6)$$

После интегрирования получим:

$$\gamma_1^v = B \left(\frac{\tau_{\max}}{t_1} \right)^n \frac{t_1^{1-\alpha+n} \cdot \Gamma(1-\alpha) \cdot \Gamma(1+n)}{\Gamma(2-\alpha+n)} \quad (7)$$

Где $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

На этапе выдержки при $\tau = \tau_{\max}$ получим:

$$\gamma^v = \gamma_1^v(t_1) + B(\tau_{\max})^n \int_{t_1}^t \frac{d\theta}{(t-\theta)^\alpha} = \gamma_1^v(t_1) + B(\tau_{\max})^n \left[\frac{(t-t_1)^{1-\alpha}}{1-\alpha} \right] \quad (8)$$

Для идентификации параметров B, n, α запишем выражение для приращений прогибов в разные моменты времени t_i :

$$\Delta w^{\text{эксн}} = w(t_i) - w(t_1) = [\gamma^v(t_i) - \gamma^v(t_1)] l, \quad (9)$$

Система уравнений (9) относительно B, n, α решается методом минимизации ее квадратичной невязки.

3. Результаты.

Решение задачи идентификации B, n, α при нагрузке $P_1=15\text{кН}$ и $P_2=5\text{кН}$ дает следующие значения искомых коэффициентов:

$$B=8.34 \times 10^{-3} \text{сек}^{\alpha-1} \cdot \text{см}^{2n} \cdot \text{кН}^{-n}, \quad n=1.584, \quad \alpha=0.914$$

Использование этих параметров приводит к следующей картине (см.рис.3), отражающей результаты сравнения эксперимента и расчетов, проведенных с использованием модели (4):

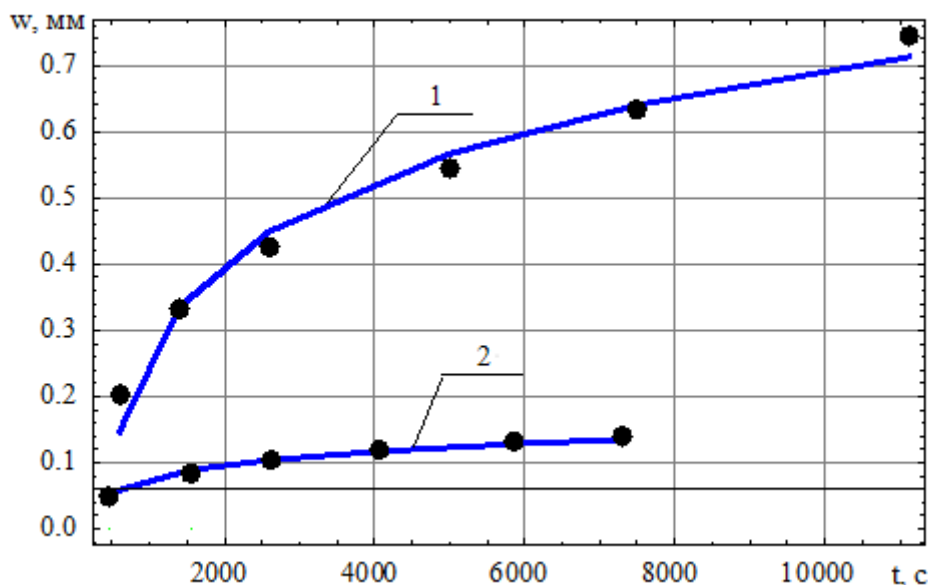


Рис.3 График согласования результатов эксперимента и модели деформирования. По оси ординат отложено время t в секундах, по ординате – вязкоупругая часть прогиба w^v в мм (1-при $P_1=15$ кН, 2-при $P_2=5$ кН, t - сек.)

Fig.3 The graph of the agreement of the experimental results and the deformation model. Along the ordinate axis, the time t in seconds is postponed, along the ordinate, the viscoelastic part of the deflection in mm. (1-at $P_1= 15$ kN, 2-at $P_2= 5$ kN, t - sec)

Как видно из рис.3, полученные коэффициенты дают достаточно хорошее согласование эксперимента с аналитическими расчетами.

4. Обсуждение

Для определения сдвиговых характеристик обычно используют эксперименты на плоских образцах крестообразного сечения[5]. При этом приходится использовать достаточно непростое оборудование, как для нагружения, так и для тензометрирования[6]. Предложенная методика значительно проще, причем замеры прогибов осуществляются с хорошей точностью. На основе анализа экспериментов для длинных и коротких трубчатых образцов удастся получить жесткостные характеристики E_1 , G_{12} . Выдержка трубчатых образцов под нагрузкой в течение определенного времени позволяет определить для композита и реологические характеристики наследственной теории упругости при сдвиговой деформации. Полученные графики согласования имеют хорошую сходимость результатов эксперимента и модели деформирования.

5. Заключение

1) Приведены результаты испытаний на трехточечный изгиб коротких труб квадратного сечения при двух значениях нагрузок и данные их обработки.

2) По результатам анализа экспериментальных данных выявлено, что пултрузионный стеклопластик проявляет свойство ползучести при трехточечном изгибе тонкостенных труб. Появление этого эффекта объясняется наличием вязких деформаций поперечного сдвига, сравнимых с линейными деформациями волокон вдоль оси тонкостенной трубы. Для моделирования этого процесса при сдвиге на основе теории вязкоупругости предложен вариант ядра ползучести с тремя параметрами.

3) Разработаны методика решения прямых задач деформирования балок трубчатого сечения и основанная на ней методика идентификации характеристик этого ядра, которая сведена к задаче минимизации квадратичной невязки результатов численных расчетов и экспериментальных данных. Выявлено хорошее согласование этих данных с результатами аналитических расчетов, в которых использовались полученные в результате решения задачи идентификации вязкоупругие характеристики.

Список литературы/ References

1. Гарипов А. И. Численное исследование закритической работы стержней кольцевого поперечного сечения при внецентренном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5(82). С. 87-93. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-87-93. [Garipov A. I. Numerical investigation of post-critical resistance of hollow circular cross-section bars under bending and axial compression // Vestnik grazhdanskih ingenerov. 2020. № 5(82). P. 87-93. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-87-93.]
2. Peng J. L., Ho C. M., Chan S. L., Chen W. F. Stability study on structural systems assembled by system scaffolds // Journal of Constructional Steel Research. 2017. V. 137, P. 135-151. DOI: 10.1016/J.JCSR.2017.06.004.
3. Mercier C., Khelil A., Al Mahmoud F., Blin-Lacroix J. L., Pamies A. Experimental investigations of buckling behaviour of steel scaffolds // Structures. 2021. V. 33. P. 433-450. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2021.04.045.
4. Kayumov R. A., Shakirzyanov F. R. Large Deflections and Stability of Low-Angle Arches and Panels During Creep Flow // Adv. Struct. Mater. 2021. V. 141. P. 237-248. DOI:10.1007/978-3-030-54928-2_18.
5. Pignataro M., Rizzi N., Luongo A. Stability, bifurcation, and postcritical behaviour of elastic structures. Amsterdam: Elsevier Science, 1991. 358 p.
6. Zheng Y., Guo Z. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplok steel tubular scaffold // Journal of Constructional Steel Research. 2021. V. 177. DOI: 10.1016/J.JCSR.2020.106415.
7. Beale R., André J. Design Solutions and Innovations in Temporary Structures // Târgoviște: IGI Global, 2017. 503 p.
8. Вольмир А.С. Устойчивость упругих систем. М.: Физматгиз, 1963. 880 с. [Vol'mir A.S. Stability of elastic systems. M.: Physmathgis, 1963. 880 p.]
9. Башаров Ф.Ф., Низамеев В.Г.. Evaluation of bearing capacity of a beam on an elastic foundation using the methods of the theory of limiting balance, издательство: EDP Sciences, France, За рубежом, Academia. Архитектура и строительство, номер: 274, 2021, 1046-1054 с. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127403029>.
10. Каюмов Р. А., Тазюков Б. Ф., Мухамедова И. З., Шакирзянов Ф. Р. Большие прогибы вязкоупругих панелей // Известия вузов. Математика. 2019, №11, С. 80-86. [Kayumov R. A., Tazyukov B. F., Muhamedova I. Z., Shakirzyanov F. R. Large deflections of viscoelastic panels // Russian Mathematics. 2019. 63(11). P. 71-76.]
11. Liu H., Jia L., Wen S., Liu Q., Wang G., Chen Z. Experimental and theoretical studies on the stability of steel tube-coupler scaffolds with different connection joints // Engineering Structures. 2016. V. 106. P. 80-95. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2015.10.015.
12. Vega-Posada C., Areiza-Hurtado M., Aristizabal-Ochoa J. D. Large-deflection and post-buckling behavior of slender beam-columns with non-linear end-restraints // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2011. V. 46. P. 79-95. DOI: 10.1016/J.IJNONLINMEC.2010.07.006.
13. Areiza-Hurtado M., Aristizabal-Ochoa J. D. Second-order analysis of a beam-column on elastic foundation partially restrained axially with initial deflections and semirigid connections // Structures. 2019. V. 20. P. 134-146. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2019.03.010.
14. Giraldo-Londoño O., Monsalve-Giraldo J. S., Aristizabal-Ochoa J. D. Large-deflection and postbuckling of beam-columns with non-linear semi-rigid connections including shear and axial effects // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2015. V. 77. P. 85-95. DOI: 10.1016/J.IJNONLINMEC.2015.07.009.
15. Pieńko M., Błazik-Borowa E. Experimental studies of ringlock scaffolding joint // Journal of Constructional Steel Research. 2020. V. 173. DOI: 10.1016/J.JCSR.2020.106265.
16. Kayumov R. A. Postbuckling behavior of compressed rods in an elastic medium // Mechanics of Solids. 2017. V. 52. № 5. P. 575-580. DOI: 10.3103/S0025654417050120.

Информация об авторах.

Рашид Абдулхакович Каюмов, доктор физико-математических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация

Email: kayumov@rambler.ru

Фарид Рашитович Шакирзянов, кандидат физико-математических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация

Email: faritbox@mail.ru

Линур Рафаилович Гимранов, заведующий кафедрой, кандидат технических наук, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация

Email: leenuur@gmail.com

Айваз Расимович Гимазетдинов, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: aivazaivaz1313@gmail.com

Information about the authors.

Rashit A. Kayumov, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: kayumov@rambler.ru

Farid R. Shakirzyanov, Candidate of physical and mathematical sciences, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: faritbox@mail.ru

Linur R. Gimranov, Candidate of technical sciences, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: leenuur@gmail.com

Aivaz R. Gimazetdinov, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: aivazaivaz1313@gmail.com