

## РОЛЬ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ В ДОЛГОВРЕМЕННОЙ РАБОТЕ МОСТОВ

*А. В. Макаров, А. А. Васильченко, Х. И. Магомедов*

**Макаров Александр Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: + 7 (978) 33-45-60; e-mail: pr.makarov@mail.ru;

**Васильченко Анжелика Алексеевна**, старший преподаватель кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: + 7 (903) 370-03-29; e-mail: t766om@gmail.com;

**Магомедов Холода Ибрагимович**, магистрант, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: + 7 (920) 373-54-89; e-mail: holodamagomedov81@gmail.com

В статье рассматриваются вопросы соответствия используемых в мостостроении опорных частей железобетонных балочных мостов, имеющих в своем составе деформирующиеся полимеры. Исследования в этой области мостостроения не проводились, поэтому результаты имеют практическую ценность и представляют научную новизну. В случаях, когда возможности запроектированной опорной части не соответствуют реальным перемещениям, в конструкциях развиваются напряжения, на которые они не рассчитывались. Схема для расчета балки предполагает свободные угловые и линейные перемещения торцевых сечений. В работе определены перемещения торцов балки от грузов разными методами: используя дифференциальное уравнение изогнутой оси и методом Мора. Приведены факторы, влияющие на деформацию опорной части, расчет этих деформаций, используя различные алгоритмы. Вычислены величины деформаций для мостовой железобетонной балки разрезного пролетного строения длиной 18 м.

**Ключевые слова:** мосты, мостовая балка, опорная часть, регулируемая опорная часть, сдвиговые деформации, угловое смещение, линейное смещение, смятие.

## ROLE OF SUPPORTING PARTS IN LONG-TERM OPERATION OF BRIDGES

*A. V. Makarov, A. A. Vasilchenko, Kh. I. Magomedov*

**Makarov Aleksandr Vladimirovich**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Construction and Operation of Transport Facilities, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation; phone: + 7 (978) 33-45-60; e-mail: pr.makarov@mail.ru;

**Vasilchenko Anzhelika Alekseyevna**, Senior Lecturer at the Department of Construction and Operation of Transport Facilities, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation; phone: + 7 (903) 370-03-29; e-mail: t766om@gmail.com;

**Magomedov Kholoda Ibragimovich**, graduate student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation; phone: + 7 (920) 373-54-89; e-mail: holodamagomedov81@gmail.com

The article discusses the issues of compliance of the supporting parts of reinforced concrete beam bridges containing deformable polymers used in bridge construction. Research in this area of bridge construction has not been carried out and the results have practical value and represent scientific novelty. In cases where the capabilities of the designed support part do not correspond to real movements, stresses develop in structures for which they were not designed. The scheme for calculating the beam assumes free angular and linear movements of the end sections. The work determines the displacement of the ends of the beam from the loads using different methods: using the differential equation of a curved axis and Mohr's method. The factors influencing the deformation of the supporting part and the calculation of these deformations using various algorithms are presented. The values of deformations for a reinforced concrete bridge beam of a split span structure 18 meters long were calculated.

**Keywords:** bridges, bridge beam, supporting part, adjustable supporting part, shear deformations, angular displacement, linear displacement, crushing.

Важной конструктивной частью пролетных строений мостов являются их опорные части. Виды и конструкции опорных частей определяются главным образом системой моста и величиной его пролетов. Под действием физических факторов пролетное строение изменяет свое состояние, что сопровождается перемещением его торцевых сечений. Эти перемещения должны обеспечивать опорные части мостового сооружения. Исследование соответствия возможностей опорной части реальным смещением торцов балок является актуальной проблемой. Цель исследования выяснить насколько используемые в мостах опорные части обеспечивают перемещения торцов балок. Задачами являются: определение величины линейного смещения от температурного градиента, угол поворота сечения от действия изгибающих моментов и поперечных сил. Опорные

частей мостов классифицируются разными авторами по-разному, выделяя интересующие исследователей признаки [1]. Здесь рассматривается главный признак – принцип работы, обеспечивающий смещение торцов балки. В зависимости от этого опорные части делятся на следующие основные типы: деформируемые ОЧ, системы скольжения и опорные части качения (катковые и валковые). В мостовых сооружениях балочных систем (путепроводы, эстакады, мосты) используют простые в монтаже и дешевые резинометаллические опорные части РОЧ, а также их модификации. Такие конструктивные элементы используют в мостовых сооружениях небольших пролетов. На деформирующуюся опорную часть воздействует временная нагрузка и температурные перепады.

Пролетные строения балочных мостов, как наиболее распространенные, должны отвечать требованиям не только надежности, но и экономичности. Поиск исследователей направлен на использование современных подходов в области проектирования мостов [2], совершенствование расчетов несущих конструкций [3], и использовании новых материалов и форм конструкций при строительстве и реконструкции [4, 5].

Расчетная схема мостовых балок – балка на шарнирных опорах, обеспечивающих поворот и линейное горизонтальное перемещение одного или двух торцевых сечений конструкции. Если опорные части не позволяют в полной мере обеспечить свободные перемещения, то в опорных зонах железобетонной балки будут действовать изгибающие моменты (от действия временной нагрузки) и растягивающие усилия (от изменений температуры), на которые балка не рассчитывалась. Возникающие усилия приведут к образованию поперечных сначала микротрещин, далее значительных трещин и раннему износу конструкций балок и ригеля, представленных на рисунке 1 [6–9].



Рис. 1. Примеры разрушений: а – торца балки; б – е ригеля

Деформирующиеся опорные части обеспечивают перемещения торцов, опертых на них балок за счет физических свойств эластомеров (резины), являющихся их конструктивными элементами, за счет изменения формы, длины или объема эластомера под перемещающимся грузом. Причем рабочие характеристики опорной части – способность деформироваться не должна зависеть от температуры окружающего воздуха. Наиболее используемыми являются резинометаллические опорные части (РОЧ), представленными на рисунке 2, и состоящая из чередующихся слоев резины (2) и стальных пластин (1), склеенных в процессе вулканизации. РОЧ является не регулируемой опорной частью и не может выставляться на заданную температуру, что ограничивает ее применение.

Слой резины обжимаются под нагрузкой способствуют повороту верхней грани опорной части, как показано на рисунке 2. При температурном воздействии верхняя фибра РОЧ смещается относительно нижней также за счет деформирования слоев эластомера.

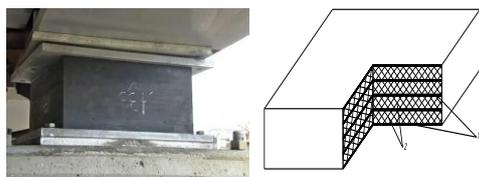


Рис. 2. Резинометаллическая опорная часть: а – вид РОЧ; б – конструкция

Исследование работы резиновых опорных частей имеет практическую ценность и составляет научную новизну.

Вычислим поворот торцевой грани разрезной балки пролета моста интегрированием дифференциального уравнения изогнутой оси:

$$y'' = \frac{M}{EI} \quad (1)$$

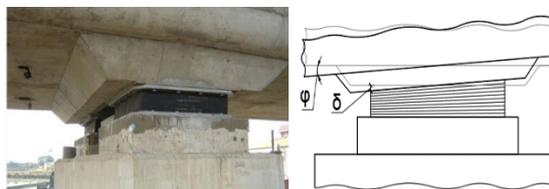


Рис. 3. Работа опорной части смятие: а – вид; б – схема;  $\varphi$  – поворот опорного сечения;  $\delta$  – величина смятия полимера

Балка длиной  $l$  и нагруженная равномерной нагрузкой  $q$  в процессе деформации оказывает давление на РОЧ (рис. 3). Нагрузка  $q$  здесь представляет собой полную нагрузку и состоит из  $q_{\text{пост}}$  – собственного веса,  $q_a$  – равномерно распределенной полосовой нагрузки АК и  $q_{\text{АТ}}^{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентной тележечной нагрузки. Схема для расчета балки представлена на рисунке 4.

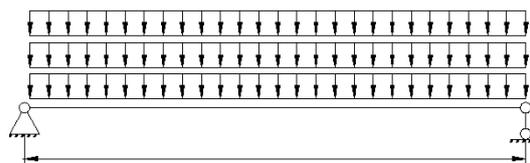


Рис. 4. Расчетная система разрезной балки

Выражение изгибающего момента в текущем сечении запишется в виде (2):

$$M = \frac{q \cdot l}{2} \cdot x - \frac{q \cdot x^2}{2} = \frac{q}{2} \cdot (l \cdot x - x^2), \quad (2)$$

$$\text{где } q = q_{\text{пост}} + q_a + q_{\text{АТ}}^{\text{ЭКВ}}. \quad (3)$$

Уравнение угла поворота оси балки постоянного поперечного сечения будет иметь вид:

$$y' = \frac{1}{EI} \cdot \int M dx = \frac{1}{EI} \cdot \int \frac{q}{2} \cdot (l \cdot x - x^2) dx = \frac{q}{2EI} \cdot \left( \frac{l \cdot x^2}{2} - \frac{x^3}{3} \right) + C, \quad (4)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования. Определим ее из граничного условия: поворот равен нулю в среднем сечении балки.

$$x = \frac{l}{2}; y' = 0 \Rightarrow 0 = \frac{q}{2 \cdot EI} \cdot \left( \frac{l^3}{8} - \frac{l^3}{24} \right) + C \Rightarrow C = -\frac{q \cdot l^3}{24EI}. \quad (5)$$

Уравнение угла поворота примет вид:

$$y' = \frac{q}{2EI} \cdot \left( \frac{l \cdot x^2}{2} - \frac{x^3}{3} \right) - \frac{q \cdot l^3}{24EI} = \frac{q}{2EI} \cdot \left( \frac{l \cdot x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \frac{l^3}{12} \right), \quad (6)$$

а величина поворота торцевого сечения балки составит:

$$\varphi = y'_{x=l} = \frac{q \cdot l^3}{24EI}. \quad (7)$$

Заметим, что применение дифференциального уравнения изогнутой оси позволяет учесть только изгибающий момент. Определим поворот торцевого сечения балки с учетом обоих действующих силовых факторов  $M$  и  $Q$  по методу Мора.

$$\varphi = \int \frac{M_p \cdot M_1}{EI} dx + \int \frac{Q_p \cdot Q_1 \cdot \eta}{GA} dx. \quad (8)$$

Запишем функцию момента и поперечной силы для однопролетной балки, представленной на рисунке 4.

$$M_p = \frac{q \cdot x}{2} \cdot (l - x); \quad (9)$$

$$Q_p = \frac{q \cdot l}{2} - q \cdot x. \quad (10)$$

Функция момента и поперечной силы при единичном нагружении в сечении  $x$  запишется в виде:

$$M_1 = \left(1 - \frac{l}{x}\right); \quad Q_1 = \frac{M}{l}. \quad (11)$$

Поворот торца балки от воздействия изгибающего момента (первое слагаемое (8)) составит:

$$\begin{aligned} \varphi_M &= \int_0^l \frac{1}{EI} \cdot \frac{q \cdot x}{2} \cdot (l - x) \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right) dx = \\ &= \frac{q}{2 \cdot l \cdot EI} \cdot \int_0^l x \cdot (l - x)^2 dx = \frac{q \cdot l^3}{24EI}. \end{aligned} \quad (12)$$

Поворот торца балки от действия поперечной силы (вторая часть выражения (8)) примет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_Q &= \int_0^l \frac{1}{GA} \cdot \left(\frac{ql}{2} - qx\right) = \frac{q}{lGA} \int_0^l \left(\frac{l}{2} - x\right) dx = \\ &= \frac{q}{lGA} \left(\frac{l}{2}x - \frac{x^2}{2}\right) \Big|_0^l = \frac{q}{lGA} \left(\frac{l^2}{2} - \frac{l^2}{2}\right) = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, торцевое сечение балки от воздействия на нее поперечной силы не поворачивается и окончательно поворот будет

$$\varphi = \varphi_M = \frac{q \cdot l^3}{24EI} \quad (14)$$

как и в случае применения дифференциального уравнения изогнутой оси.

Резиновые слои имеются и в других плоских опорных частях (рис. 5). В опорных частях стаканного типа полимерный слой обеспечивает за счет его смятия поворот торца железобетонной балки, а линейное смещение происходит за счет скольжения крышки стакана по фторопластовым пластинам. Эта опорная часть является регулируемой, может выставляться на температуру окружающей среды. Достоинством описанных опорных частей является их устойчивая работа при землетрясениях, что увеличивает безопасность и надежность функционирования транспортных сооружений в сейсмически активных зонах и при других экстремальных воздействиях [10–13].

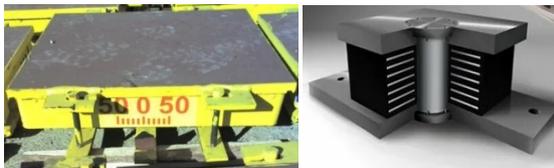


Рис. 5. Опорные части с резиновыми слоями: а – стаканного типа, б – антисейсмическая

Деформация опорной части, вызванная температурным воздействием представлена на рисунке 5. В этом случае конструкция воспринимает сдвиговые усилия. Величина линейного смещения, обеспечиваемое опорной частью, определяется

наибольшим температурным градиентом  $\Delta T$ , длиной мостовой балки  $l$  и коэффициентом линейного расширения железобетона  $\alpha$  по формуле  $\Delta_T = \gamma_T \cdot \alpha \cdot l \cdot \Delta T$ . РОЧ обеспечивает такое смещение за счет деформаций смятия и сдвига полимера.

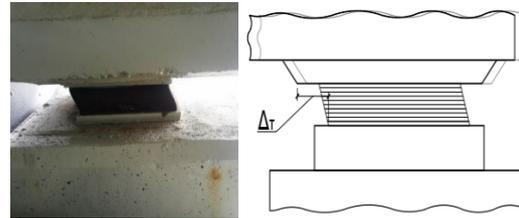


Рис. 6. Линейная деформация РОЧ: а – вид; б – схема

Для оценки эффективности РОЧ определим ее линейную деформацию, вызванную перемещением торцевого сечения балки пролетного строения путепровода, представленного в [14–16] с пролетом – 18 м. Габарит моста – 11,5 м, тротуары по 1 м. Пролетное строение выполнено из восьми тавровых балок. Постоянная нагрузка на погонный метр крайней балки – 20,351 кН/м. Временная нагрузка, состоящая из полосовой и тележечной, с учетом соответствующих коэффициентов поперечной установки следующая:

$$\begin{aligned} q_{вр} &= q_A \cdot \eta_A + q_{AT}^{ЭКВ} \cdot \eta_{AT} = \\ &= 14 \cdot 0,381 + 31,72 \cdot 0,448 = 19,54 \text{ кН/м}. \end{aligned}$$

Полная нагрузка на крайнюю балку составит:

$$q = q_{пост} + q_{вр} = 39,89 \text{ кН/м}.$$

Подставим значения в формулу (14) и определим максимальный поворот торца балки:

$$\varphi = \frac{39,89 \cdot 16^3}{24 \cdot 0,052 \cdot 27 \cdot 10^3} = 0,00485 \text{ рад}.$$

Из рисунка 2 видно, что  $tg\varphi \approx \varphi$ , тогда  $\delta = 30 \cdot 0,00485 = 0,15$  см. Опорная часть обеспечивает подобные небольшие деформации.

Для определения линейного смещения торца этой же балки подсчитаем сдвиговую деформацию слоев полимера при температурном перепаде  $\Delta T = 71$  °С; для железобетона  $\alpha = 0,000012$  °С<sup>-1</sup>:

$$\Delta_T = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 0,000012 \cdot 1800 \cdot 71 = 0,93 \text{ см}.$$

Деформация каждого слоя резины составляет 3 мм., что обеспечивается используемыми в мостостроении опорными частями РОЧ.

### Выводы

1. Резинометаллические опорные части угловые перемещения в продольном, а линейные в продольном и поперечном направлении, что важно для широких пролетных строений.

2. Опорные части с резиновым слоем вполне обеспечивают перемещения пролетных строений с пролетами до 30 м.

3. Отказ в работе опорных частей может быть вызван старением полимера и уменьшением его эластичности.

### Список литературы

1. Макаров А. В. Рекомендации по подбору опорных частей с целью увеличения срока службы мостового строения / А. В. Макаров, В. С. Карпов // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 1. – Режим доступа: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4079](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4079), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
2. Makarov A. Optimal ratio of spans of continuous bridges / A. Makarov, S. Kalinovsky, N. Ermilova, A. Churakov // E3S Web of Conferences. Construction the Formation of Living Environment FORM 2021 : 24th International Scientific Conference. – 2021. – С. 03001.



3. Душко О. В. Bar structures calculation by the method of discrete elements with generalized unknowns in aggressive environments / О. В. Душко, Г. В. Воронкова, С. С. Рекунов // International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (IC-CATS 2020) : IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (6–12 September 2020, Sochi, Russia). – IOP Publishing, 2020. – Vol. 962, № 2. – 7 p. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/962/2/022073/pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
4. Makarov A. Design features of bimetallic bridges / A. Makarov, S. Kalinovsky // E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. – 2019. – С. 06001.
5. Калиновский С. А. Роль мостов в повышении качества городской среды и создании архитектурного ансамбля города / С. А. Калиновский, А. В. Макаров, Д. А. Гурова, И. В. Шестопалов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 1 (39). – С. 90–94
6. Макаров А. В. Обследование мостовых сооружений с помощью современного оборудования / А. В. Макаров, Е. В. Крошнева, А. Ф. Файзаалиев, М. А. Павлова, Д. М. Лепехина // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 7. – С. 10. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7095>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
7. Рекунов С. С. Об оценке надежности и восстановлении эксплуатационных качеств мостовых сооружений / С. С. Рекунов // Транспортные сооружения. – 2016. – Т. 3, № 2. – С. 7.
8. Makarov A. V. Some aspects of the bridges' functional qualities restoration / A. V. Makarov, S. A. Kalinovsky, T. V. Ereshchenko, M. A. Pavlova // IOP Conference Series. Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development Materials Science and Engineering : International Scientific Conference. – 2021. – С. 012069.
9. Rune E. Assessing the validity of road safety evaluation studies by analysing causal chains / E. Rune // Accident Analysis and Prevention. – 2003. – № 35 (5). – С. 741–748.
10. Pshenichkina V. A. Research of the dynamical system “beam – stochastic base” / V. A. Pshenichkina, G. V. Voronkova, S. S. Rekunov // Procedia Engineering. – 2016. – Т. 150. – С. 1721–1728.
11. Пшеничкина В. А. Stochastic Process Simulation of Soil Displacement in Calculations of Seismic Resistant Buildings / В. А. Пшеничкина, С. С. Рекунов, Р. И. Баженов // IOP Conference Series. FarEastCon–2019 : Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference (1–4 October 2019, Russky Island, Russian Federation). – Far Eastern Federal University; Vladivostok Branch of Russian Customs Academy, 2020. – Chapter 2, vol. 753. – 7 p. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/3/032089/meta>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
12. Рекунов С. С. Исследование вопросов надежности сооружений разных типов при экстремальных воздействиях. часть первая / С. С. Рекунов, А. А. Чураков // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 2 (44). – С. 57–61.
13. Макаров А. В. Безопасность транспортных сооружений в чрезвычайных ситуациях / А. В. Макаров // Безопасность в образовательных и социоприродных системах : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 16–17 мая 2014 г. – Элиста : Калм. ун-т, 2014. – С. 240–242.
14. Кулаев Е. А. Реконструкция моста через реку Олень Волгоградской области / Е. А. Кулаев, Г. В. Воронкова // Инженерный Вестник Дона, – 2017. – № 2. – Режим доступа: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4168](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4168), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
15. Воронкова Г. В. Применение модели линейно деформируемого стохастического полупространства для расчета системы «балка – неоднородное основание» / Г. В. Воронкова, В. А. Пшеничкина // Наукоедение. – 2014. – № 5 (24). – С. 27.
16. Николенко М. А. Анализ причин появления дефектов, влияющих на несущую способность искусственных сооружений, на примере моста км 1009+279 (правый) автомобильной дороги М-4 «Дон» / М. А. Николенко, Ю. В. Головань // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4. – Режим доступа: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3800/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3800/), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.

© А. В. Макаров, А. А. Васильченко, Х. И. Магомедов

**Ссылка для цитирования:**

Макаров А. В., Васильченко А. А., Магомедов Х. И. Роль опорных частей в долговременной работе мостов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2023. № 4 (46). С. 5–8.

УДК 624.042.7

DOI 10.52684/2312-3702-2023-46-4-8-13

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО НАГРУЖЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ. ЧАСТЬ 1**

**А. В. Синельщиков, Р. А. Завьялов**

**Синельщиков Алексей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Российская Федерация; e-mail: laex@bk.ru;

**Завьялов Роман Александрович**, магистрант, Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Российская Федерация; e-mail: 39bazaz@gmail.com

Приведены результаты сравнительного анализа частот и форм колебаний протяженного в плане промышленного здания с учетом влияния дополнительного нагружения здания поднимаемым кранами рабочим грузом. Сделан вывод о существенном влиянии дополнительного внешнего нагружения на величину и распределение собственных частот колебаний здания.

**Ключевые слова:** собственные частоты и формы колебаний, промышленное здание, внешнее нагружение.

**INFLUENCE OF EXTERNAL LOAD ON CHANGES IN NATURAL FREQUENCIES AND FORMS OF VIBRATIONS OF INDUSTRIAL BUILDINGS. PART 1**

**A. V. Sinelshchikov, R. A. Zavyalov**

**Sinelshchikov Aleksey Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation; e-mail: laex@bk.ru;

**Zavyalov Roman Aleksandrovich**, undergraduate student, Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russian Federation; e-mail: 39bazaz@gmail.com