

Научная статья

УДК 624.074

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-1/114-120>

Напряжённое состояние торцового опорного ребра стальных балок с вертикально гофрированной стенкой

Николай Леонидович Тишков✉, Анатолий Николаевич Степаненко,
Анастасия Сергеевна Фомина

Тихоокеанский государственный университет,

Хабаровск, Российская Федерация

✉ n.tishkov87@gmail.com

Аннотация. В работе оценивается напряжённое состояние торцового опорного ребра стальной двутавровой балки с тонкой поперечно-гофрированной стенкой. Представлены конечно-элементные модели исследуемых балок с возможными вариантами отклонения стенки от оси опорного ребра, а также основные результаты и анализ численного моделирования, который реализован с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР». Произведён сравнительный анализ полученных результатов.

Ключевые слова: гофрированные конструкции, гофр, поперечно-гофрированная стенка, двутавр, напряжённое состояние

Для цитирования: Тишков Н.Л., Степаненко А.Н., Фомина А.С. Напряжённое состояние торцового опорного ребра стальных балок с вертикально гофрированной стенкой // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 1(62). С. 114–120.

Original article

Stress state of the end support rib of steel beams with a vertically corrugated wall

Nikolay L. Tishkov✉, Anatoly N. Stepanenko, Anastasiya S. Fomina

Pacific National University,

Khabarovsk, Russian Federation

✉ n.tishkov87@gmail.com

Abstract. The work evaluates the stress state of the end support rib of a steel I-beam with a thin transversely corrugated wall. Finite element models of the studied beams with possible options for deflection of the wall from the axis of the supporting rib are presented, as well as the main results and analysis of numerical modeling, which is implemented using the “LIRA-SAPR” software package. A comparative analysis of the results obtained was carried out.

Keywords: corrugated structures, corrugation, transversely corrugated wall, I-beam, stress state

For citation: Tishkov N.L., Stepanenko A.N., Fomina A.S. Stress state of the end support rib of steel beams with a vertically corrugated wall. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 1(62), pp. 114–120. (In Russ.).

Введение

При изготовлении стальных балок с гофрированной стенкой в месте крепления её с опорным торцовым ребром возможны случаи отклонения стенки от середины ребра, что приведёт к усложнению его напряжённого состояния. При этом нужно понимать, что работа балок

с гофрированной стенкой имеет некоторые особенности по сравнению с классическими плоскостенчатыми [1–6]. Напряжённое состояние опорного ребра гофрированной балки усложняется и наличием в её приопорных зонах вторичных усилий [2–4]. В связи с этим возникает необходимость исследовать напряжённое состояние опорного ребра гофрированной балки.

Для достижения поставленной цели – исследовать напряжённое состояние опорного ребра гофрированной балки со смещением прикрепления стенки к его оси – решены следующие задачи:

- 1) созданы модели балок с гофрированной и плоской стенками в программном комплексе «ЛИРА-САПР»;
- 2) произведены расчёты и оценка напряжённо-деформированного состояния моделей при одинаковых граничных условиях, свойствах материалов и нагрузках;
- 3) проведён сравнительный анализ результатов исследования.

Методы и результаты исследования

Для исследования влияния возможного смещения прикрепления гофрированной стенки балки с оси её опорного ребра на его напряжённое состояние проведён численный эксперимент на 7-ми моделях балок с вертикально гофрированной (модели БГ1–БГ7) и 1-ой – с плоской (модель БП) стенками.

Все опытные балки приняты одной длины ($L=3660$ мм), одного сечения и с одинаковыми опорными рёбрами (пояса $t_f \times b_f=10 \times 120$ мм, стенка $t_w \times h_w=4 \times 400$ мм, опорное ребро $t_{o.p.} \times b_{o.p.}=12 \times 120$ мм). Профиль гофров стенок гофрированных балок принят трапециевидальным. Размеры для балки БГ1 приведены на рис. 1.

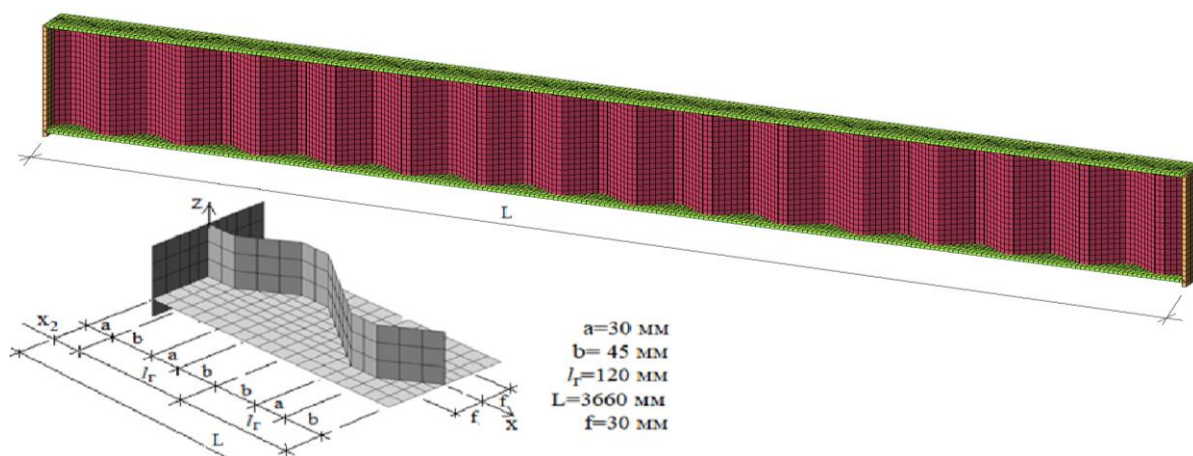


Рис. 1. Модель балки БГ1, фрагмент опорной части начала модели балки БГ1

Fig. 1. Model of beam BG1, fragment of the supporting part of the beginning of the model of beam BG1

Расчётные модели балок собраны из оболочечных конечных элементов (типа КЭ41 – стенки и опорные рёбра всех балок и пояса балки БП и типа КЭ41 и КЭ42 – пояса всех гофрированных балок). Шаг узлов сетки конечных элементов балок БП и БГ1 по направлению оси балки (ось x) принят равным 15 мм, в балках БГ2–БГ7 он за счёт удаления начальных элементов первой волны гофров становится больше на коэффициент удлинения k_{xi} , равный:

$$k_{xi} = L_{BG1} / (L_{BG1} - x_i) = 3660 / (3660 - x_i), \quad (1)$$

где x_i – длина удаляемой части первой волны гофров стенки, равная: для БГ2 – 30 мм; для БГ3 – 75 мм; для БГ4 – 105 мм; для БГ5 – 150 мм; для БГ6 – 195; для БГ7 – 225 мм.

Все балки нагружаются одинаковыми сосредоточенными силами $P=0,1$ т, приложенными с шагом l_r в 27 средних узлах ширины верхнего пояса в симметричных сечениях гофрированных балок. Для балки БГ1 (и балки БП) первая сила P приложена в сечении, удалённом от правого опорного ребра на $a+2l_r=30+2 \times 120=270$ мм (далее с шагом $l_r=120$ мм – остальные

26 сил). Для остальных балок (БГ2–БГ7) силы прикладываются аналогично, но с учётом удлинения размеров гофров они частично смещаются к левому опорному ребру и повышают в нём сжимающее опорное усилие Q и средние напряжения в его нижнем сечении ($\sigma_{\text{средн}}$), которые для любой балки определяются условиями:

$$Q = 27 P k_{xi} / 2, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{средн}} = Q / (b_{o.p.} \cdot t_{o.p.}). \quad (3)$$

С использованием ПК «ЛИРА-САПР» расчётом для левых опорных рёбер моделей опытных балок получены картины сжимающих напряжений (σ_y) для их поперечных сечений, определены максимальные ($\sigma_{\text{макс}}$) и средние по ширине рёбер напряжения ($\sigma_{\text{средн}}$) и величина смещения (e_Q) равнодействующих усилий в их нижних сечениях (рис. 2). Установлено, что ширина зоны с напряжением больше $\sigma_{\text{средн}}$ в нижних сечениях моделей балок и близка к половине ширины опорного ребра ($b_{\text{перегр}} = (0,43 \dots 0,49) b_{o.p.}$), а её высота близка к четверти его ширины ($h_{\text{перегр}} = (0,23 \dots 0,28) b_{o.p.}$).

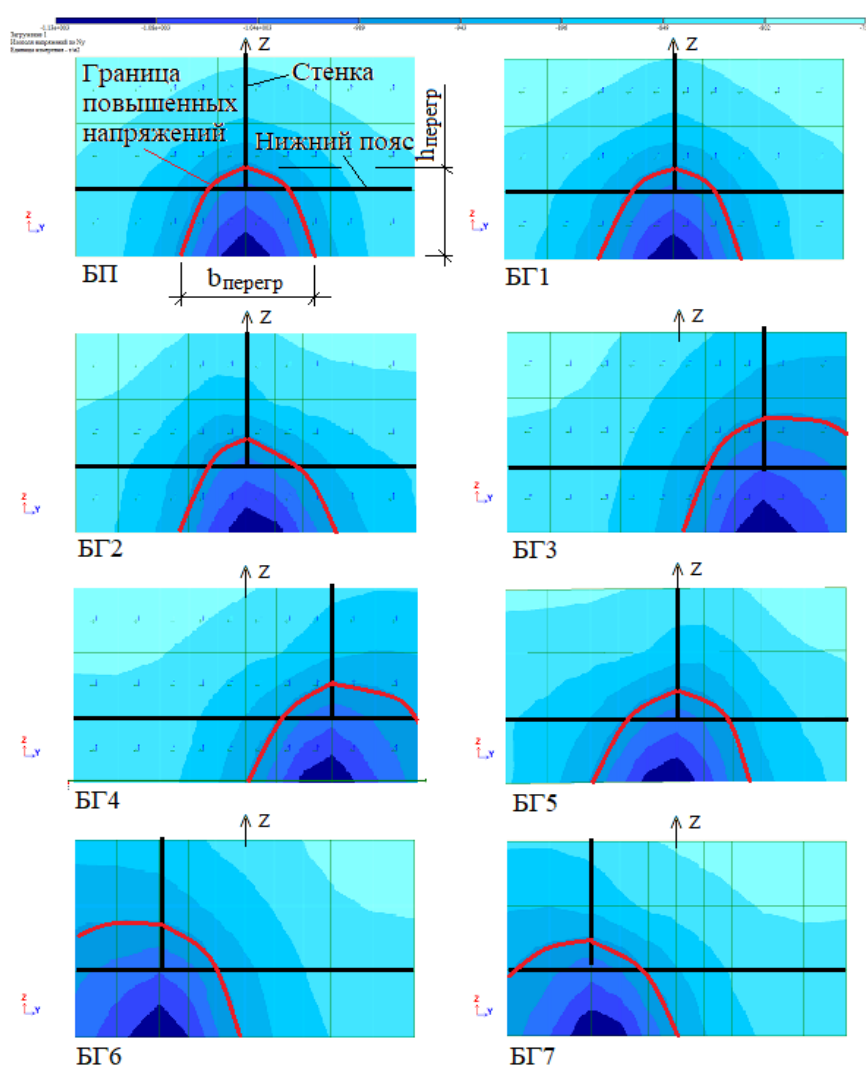


Рис. 2. Фрагменты изополей сжимающих напряжений нижних зон опорных рёбер моделей опытных балок

Fig. 2. Fragments of isofields of compressive stresses of lower zones of support ribs of experimental beam models

Расчётом также установлено полное совпадение экспериментальных величин Q и $\sigma_{\text{средн}}$ с вычисленными их значениями по (2, 3) и определены экспериментально коэффициент местного повышения сжимающих напряжений ($k_{\sigma, \text{макс}}$) и относительный эксцентриситет смещения

равнодействующих сжимающих усилий в нижних сечениях опорных рёбер (e_{Qf}):

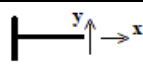
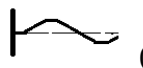
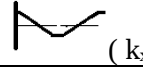
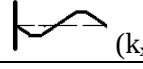
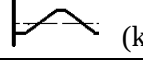
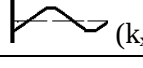
$$k_{\sigma, \max} = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{средн}}; \quad (4)$$

$$e_{Qf} = e_Q / f. \quad (5)$$

Основные результаты расчёта представлены в табл. 1, наиболее характерные картины сжимающих напряжений (σ) в левых опорных рёбрах отдельных балок и эпюры этих напряжений в нижних горизонтальных сечениях рёбер приведены на рис. 3–5.

Таблица 1 / Table 1

Результаты численного эксперимента
Results of the numerical experiment

№ балки	Сопряжение стенки с опорным ребром	$b_{\text{перезр}},$ см	$h_{\text{перезр}},$ см	$Q, \text{ Т}$	$\sigma_{\text{средн}},$ Т/М^2	$\sigma_{\text{макс}},$ Т/М^2	$k_{\sigma, \max}$	$e_Q,$ см	e_{Qf}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
БП	 ($k_x = 1$)	2,8	5,2	1,350	937,5	1130	1,205	0	0
БГ1	 ($k_{x1} = 1$)	2,8	5,2	1,350	937,5	1109	1,183	0,021	0,007
БГ2	 ($k_{x2} = 1,008264$)	2,8	5,2	1,361	945,1	1124	1,189	0,056	0,019
БГ3	 ($k_{x3} = 1,0209205$)	2,9	5,6	1,378	956,9	1174	1,227	0,437	0,146
БГ4	 ($k_{x4} = 1,029536$)	3,0	5,9	1,390	965,3	1188	1,231	0,384	0,128
БГ5	 ($k_{x5} = 1,042735$)	2,7	5,1	1,408	977,7	1160	<u>1,186</u>	0,032	0,011
БГ6	 ($k_{x6} = 1,056277$)	3,0	5,6	1,426	990,3	1203	1,215	0,400	0,133
БГ7	 ($k_{x7} = 1,065502$)	2,8	5,9	1,438	998,6	1220	1,222	0,346	0,115

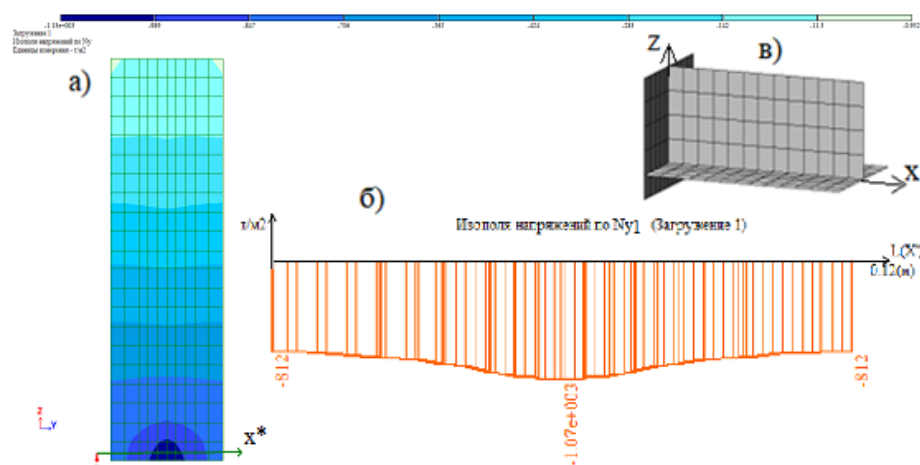


Рис. 3. Результаты численного эксперимента для балки БП:

а – изополя сжимающих напряжений; б – эпюра сжимающих напряжений для нижнего сечения ребра; в – фрагмент нижней части опорного узла балки

Fig. 3. Results of a numerical experiment for the BP beam:

а – compressive stress isofields; б – diagram of compressive stresses for the lower section of the rib; в – fragment of the lower part of the beam support assembly

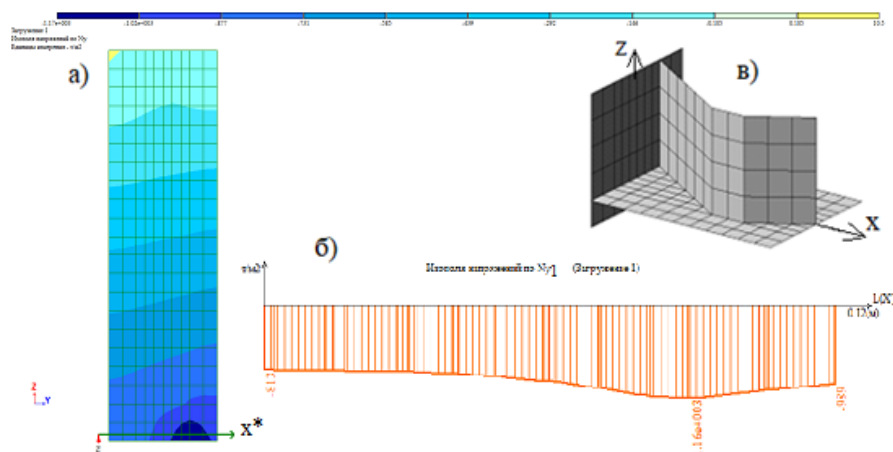


Рис. 4. Результаты численного эксперимента для балки БГ4:
а – изополя сжимающих напряжений; б – эпюра сжимающих напряжений
для нижнего сечения ребра; в – фрагмент нижней части опорного узла балки

Fig. 4. Results of a numerical experiment for the BG4 beam:
 а – compressive stress isofields; б – diagram of compressive stresses for the lower section of the rib;
 в – fragment of the lower part of the beam support assembly

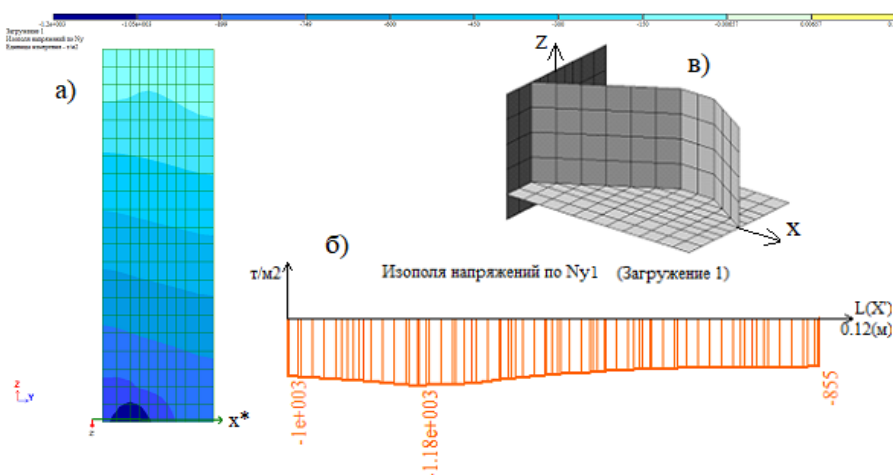


Рис. 5. Результаты численного эксперимента для балки БГ7:
а – изополя сжимающих напряжений; б – эпюра сжимающих напряжений для нижнего
сечения ребра; в – фрагмент нижней части опорного узла балки

Fig. 4. Results of a numerical experiment for the BG7 beam:
 а – compressive stress isofields; б – diagram of compressive stresses for the lower section of the rib;
 в – fragment of the lower part of the beam support assembly

По результатам расчётов можно сделать следующие выводы:

В нижних сечениях торцовых опорных рёбер стальных балок сжимающие напряжения по их ширине распределяются неравномерно и примерно на половине ширины ребра ($b_{перер} = (0,42 \dots 0,49)b_{o.p.}$) они превышают средние ($\sigma = Q/(t_{o.p.} b_{o.p.})$) с максимальным отклонением на линии крепления стенки до 18–23 %. При симметричном опорном сечении балки оно меньше (до 20 %) и больше при максимальном смещении стенки с оси балки (для гофрированных балок).

Закключение

Представляется, что при допущении в расчётах работы торцового опорного ребра стальной балки на смятие в соответствии с СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» пренебрегать наличием значительной зоны повышенных напряжений (выше средних на 18–23 %) опасно, поэтому можно рекомендовать их учитывать коэффициентом условия работы $\gamma_c = 0,85$ –

при расчётах торцового опорного ребра стальной балки с симметричным опорным сечением и 0,8 – для гофрированных балок с максимально смещённой стенкой в опорном сечении.

В гофрированных балках со смещённой с её оси стенкой в опорном сечении равнодействующая напряжений нижнего сечения опорного ребра смещается в сторону смещения стенки до 0,15*f*. Это следует иметь в виду при расчёте конструкций, поддерживающих гофрированную балку со смещённой стенкой в опорном сечении.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Н.Л. Тишков – интерпретация результатов, анализ результатов численного эксперимента, выводы по результатам исследований, ответственность за целостность всех частей статьи; А.Н. Степаненко – проблематика, постановка задачи исследований, общее руководство, обобщение результатов; А.С. Фомина – создание расчётных моделей в ПК «ЛИРА-САПР», проведение численного эксперимента.

N.L. Tishkov – interpretation of results, analysis of the results of a numerical experiment, conclusions based on research results, responsibility for the integrity of all parts of the article; A.N. Stepanenko – problems, formulation of research problems, general guidance, generalization of results; A.S. Fomina – creation of computational models in the LIRA-SAPR PC, conducting a numerical experiment.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Остриков Г.М., Максимов Ю.С., Долинский В.В. Исследование несущей способности стальных двутавровых балок с вертикально гофрированной стенкой // Строительная механика и расчет сооружений. 1983. № 1. С. 68–70.
2. Степаненко А.Н. Экспериментальные исследования алюминиевых балок с волнистой стенкой // Строительная механика и строительные конструкции. Хабаровск: ХПИ, 1971. С. 133–142.
3. Тишков Н.Л., Степаненко А.Н. Дополнительные изгибно-крутящие усилия и напряжения в арочном двутавровом стержне с гофрированной стенкой с экспериментальной оценкой нормальных напряжений в поясах // Строительство и реконструкция. Орёл, 2016. № 4(66). С. 36–44.
4. Aschinger R., Lindner J. Zu besonderheiten bei Trapezstegträgern // Stahlbau. 1997. № 66(3). P. 136–142.
5. Elgaaly M., Seshadri A. Depicting the behaviour of girders with corrugated webs up to failure using non-linear finite element analysis // Advances Engineering Software. 1992. № 29. P. 195–208.
6. Kövesdi B., Jáger B., Dunai L. Bending and shear interaction behavior of girders with trapezoidally corrugated webs // Journal of Constructional Steel Research. 2016. № 121. P. 383–397.

REFERENCES

1. Ostrikov G.M., Maksimov Yu.S., Dolinsky V.V. Study of the load-bearing capacity of steel I-beams with a vertically corrugated wall. *Structural mechanics and calculation of structures*, 1983, no. 1, pp. 68–70. (In Russ.).
2. Stepanenko A.N. Experimental studies of aluminum beams with a wavy wall. *Structural mechanics and construction structures*. Khabarovsk: KhPI. 1971. P. 133–142. (In Russ.).
3. Tishkov N.L., Stepanenko A.N. Additional bending-torsional forces and stresses in an arched I-beam with a corrugated wall with an experimental assessment of normal stresses in the chords. *Construction and reconstruction*, 2016, no. 4(66), pp. 36–44. (In Russ.).
4. Aschinger R., Lindner J. Zu besonderheiten bei Trapezstegträgern. *Stahlbau*, 1997, no. 66(3), pp. 136–142.
5. Elgaaly M., Seshadri A. Depicting the behaviour of girders with corrugated webs up to failure using non-linear finite element analysis. *Advances Engineering Software*, 1992, no. 29, pp. 195–208.
6. Kövesdi B., Jáger B., Dunai L. Bending and shear interaction behavior of girders with trapezoidally corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, no. 121, pp. 383–397.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Тишков Николай Леонидович – кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы промышленного и гражданского строительства, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Российская Федерация).

✉ n.tishkov87@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2891-4926>

Nikolay L. Tishkov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Construction, Pacific National University (Khabarovsk, Russian Federation).

Степаненко Анатолий Николаевич – доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник Высшей школы Промышленного и гражданского строительства, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Российская Федерация).

✉ 000419@pnu.edu.ru

Anatoly N. Stepanenko, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior Scientific Employee of the Department of Industrial and Civil Engineering, Pacific National University (Khabarovsk, Russian Federation).

Фомина Анастасия Сергеевна – студент, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Российская Федерация).

✉ afomina425@gmail.com

Anastasiya S. Fomina, Student, Pacific National University (Khabarovsk, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 15.10.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 03.02.2025.

Принята к публикации / Accepted: 18.03.2025.