

Научная статья
УДК 624.014
<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-1/79-85>

Оценка локального снижения напряжений в поясах балок двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой

Николай Леонидович Тишков✉, Анатолий Николаевич Степаненко

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия
✉ n.tishkov87@gmail.com

Аннотация. В работе оценивается локальное снижение нормальных напряжений в области контакта поперечно-гофрированной стенки и поясных листов сварной двутавровой балки. Доказана неспособность воспринимать тонким гофрированным листом нормальные усилия в направлении поперек гофров. Представлены конечно-элементные модели исследуемых фрагментов тавров, а также основные результаты и анализ численного моделирования, который реализован с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР». Произведен сравнительный анализ полученных результатов.

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

Для цитирования: Тишков Н.Л., Степаненко А.Н. Оценка локального снижения напряжений в поясах балок двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 1(58). С. 79–85.

Original article

Assessment of local stress reduction in the chords of I-beams with a thin transversely corrugated wall

Nikolay L. Tishkov✉, Anatoly N. Stepanenko

Pacific National University, Khabarovsk, Russia
✉ n.tishkov87@gmail.com

Abstract. The work evaluates the local reduction in normal stresses in the area of contact between the transversely corrugated wall and the flange sheets of a welded I-beam. The inability of a thin corrugated sheet to absorb normal forces in the direction across the corrugations has been proven. Finite element models of the studied tee fragments 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. Assessment of local stress reduction in the chords of I-beams with a thin transversely corrugated wall. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 1(58), pp. 79–85. (In Russ.).

Введение

Объемно профилированные конструкции, в частности двутавровые балки с тонкой гофрированной стенкой, получили распространение в строительстве в силу своей высокой

эксплуатационной надежности и экономической эффективности [1, 3, 5]. Работа гофрированных балок принципиально отличается от классических плоскостенчатых. Гофрированная стенка не способна воспринимать усилия в направлении поперек гофров, хотя сечением поперечно-гофрированной стенки воспринимается все перерезывающее усилие, при этом касательные напряжения по высоте стенки распространяются практически равномерно [4–6, 8, 10, 11]. Пояса балки воспринимают весь изгибающий момент, при этом нормальные напряжения в поясах распределяются неравномерно, что вызвано дополнительными изгибно-крутящими усилиями в тонкостенном пространственном стержне [2, 5, 6–9].

При моделировании работы стальных балок с вертикально гофрированной стенкой (например, с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР) в их поясах, в местах примыкания к стенкам (в отличие от поясов балок с плоскими стенками), появляются зоны пониженных нормальных напряжений. Для фрагмента равномерно нагруженной по длине балки с сечением поясов $t_f \times b_f = 10 \times 120$ мм, сечением стенки $t_w \times h = 4 \times 400$ мм и размерами полувысоты гофра трапецеидального профиля $f \times l/2 = 30 \times 120$ мм картина распределения нормальных напряжений в поперечных сечениях (рис. 1) демонстрирует заметное снижение нормальных напряжений в сечениях поясов около линии соединения их с гофрированной стенкой. Наибольшее отклонение этих напряжений от средних по ширине пояса оказывается в сечениях по вершинам гофров (для представленной модели балки около 16%) и несколько меньшее (около 11%) – в симметричных сечениях. В связи с этим возникает необходимость исследовать напряженное состояние зоны контакта гофрированной стенки и поясов.

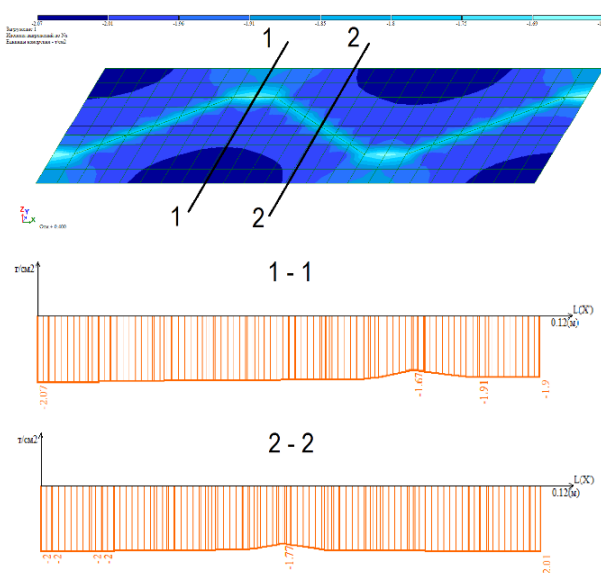


Рис. 1. Изополя нормальных напряжений N_x в сечениях верхнего пояса гофрированной балки и эпюры для характерных сечений

Fig. 1. Isofields of normal stresses N_x in sections of the upper chord of a corrugated beam and diagrams for characteristic sections

Цели и задачи

Для достижения поставленной цели – исследовать напряженное состояние зоны контакта гофрированной стенки и пояса – решены следующие задачи:

- 1) доказана неспособность воспринимать гофрированным листом нормальные усилия в направлении поперек гофров;
- 2) созданы модели тавров с гофрированной и плоской стенками в программном комплексе ЛИРА-САПР;
- 3) произведены расчеты и оценка напряженно-деформированного состояния тавровых моделей при одинаковых граничных условиях, свойствах материалов и нагрузках;
- 4) проведен сравнительный анализ результатов исследования.

Методы и результаты исследования определяемого напряжения

Представляется, что крайние зоны тонкой гофрированной стенки, не способной воспринимать изгибающий момент в ее плоскости, при жестком соединении с поясами частично «вовлекаются» в совместную работу с ними при их сжатии или растяжении и «местно» их разгружают.

Неспособность воспринимать гофрированным листом нормальные усилия в направлении поперек гофров подтверждается условием равновесия фрагмента гофра (полугофра) шириной 1 см (рис. 2):

$$2 \cdot M_z = 2 \cdot f \cdot \sigma_x \cdot t_w$$

Если принять $\sigma_{x,max} = \sigma_x + \frac{M_z}{W_w} = \sigma_x + \frac{\sigma_x \cdot f \cdot t_w \cdot 6}{t_w^2} \leq R_y$, то получим возможную предельную

величину нормального напряжения в сечении стенки $\sigma_x = \frac{R_y}{1 + 6 \cdot f / t_w}$. К примеру, для $f=30$ мм

и $t_w=4$ мм $\sigma_x = \frac{R_y}{1 + 6 \cdot 30 / 4} = 0,022 \cdot R_y$. Такой малой величиной напряжений (2,2% от расчетного сопротивления материала балки – R_y) в практических расчетах можно пренебречь и считать, что гофрированная стенка не способна воспринимать продольные усилия поперек гофров.

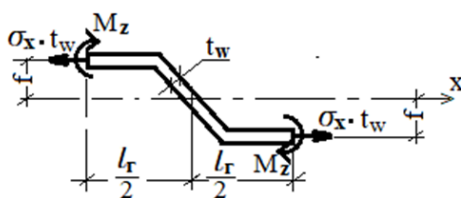


Рис. 2. Расчетная схема полугофра

Fig. 2. Calculation diagram of the half-corrugation

В целях проверки правильности данного предположения об участии в совместной работе с поясами (на сжатие и растяжение) небольших участков гофрированной стенки, жестко прикрепленной к ним и частично разгружающей пояса около линии соединения их со стенкой, проведен численный эксперимент в программном комплексе ЛИРА-САПР со следующими конечно-элементными моделями:

- 3 модели (№ 1–3) сварных растянутых стержней таврового сечения с плоской стенкой (рис. 3);
- 5 моделей (№ 4–8) сварных растянутых стержней таврового сечения с гофрированной стенкой (рис. 3).

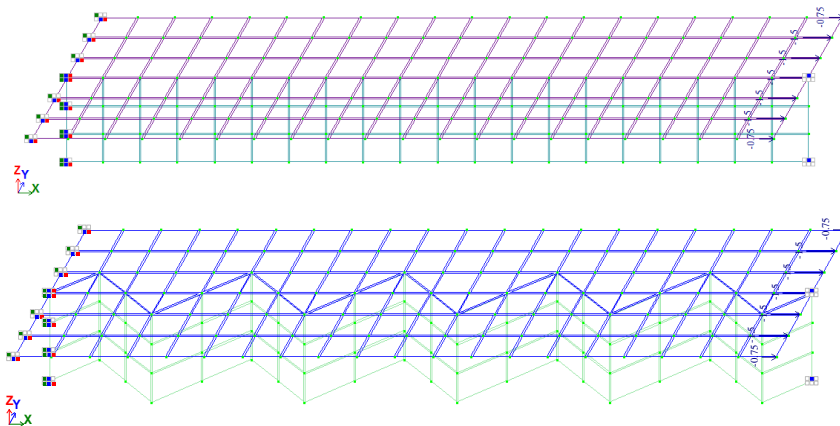


Рис. 3. Конечно-элементные тавровые модели с плоской и гофрированной стенками

Fig. 3. Finite element T-bar models with flat and corrugated walls

Создание моделей производилось при помощи пластинчатых конечных элементов типа КЭ-41 и КЭ-42 с постоянными (одинаковыми) во всех направлениях параметрами упругости (модуль упругости $E=2,06 \cdot 10^4$ кН/см², коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$). Полки всех моделей растягиваются равномерно по их ширине одинаковым усилием величиной 9 т, приложенным к 7 узлам. У модели № 2 дополнительно линейно-неравномерно растягивается стенка с затуханием усилия у свободной кромки до нуля. Основные результаты эксперимента представлены на рис. 4, 5 и в таблице.

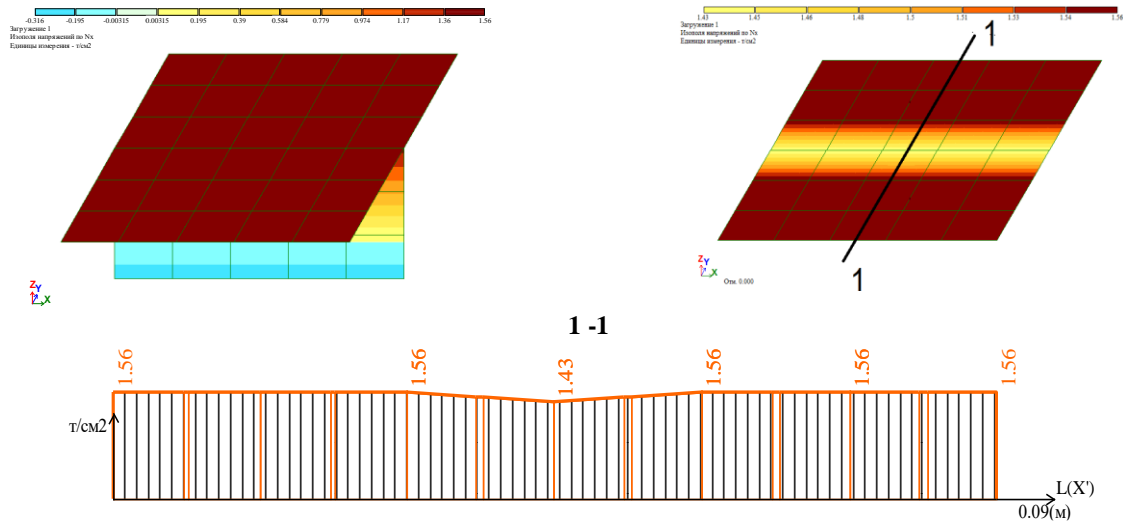


Рис. 4. Изополя нормальных напряжений ($N_x=\sigma_x$) в элементах фрагмента модели тавра с плоской стенкой (отдельно для пояса) и эпюра нормальных напряжений в поперечном сечении пояса

Fig. 4. Isofields of normal stresses ($N_x=\sigma_x$) in the elements of a fragment of a model of a tee with a flat wall (separately for the belt) and a diagram of normal stresses in the cross section of the belt

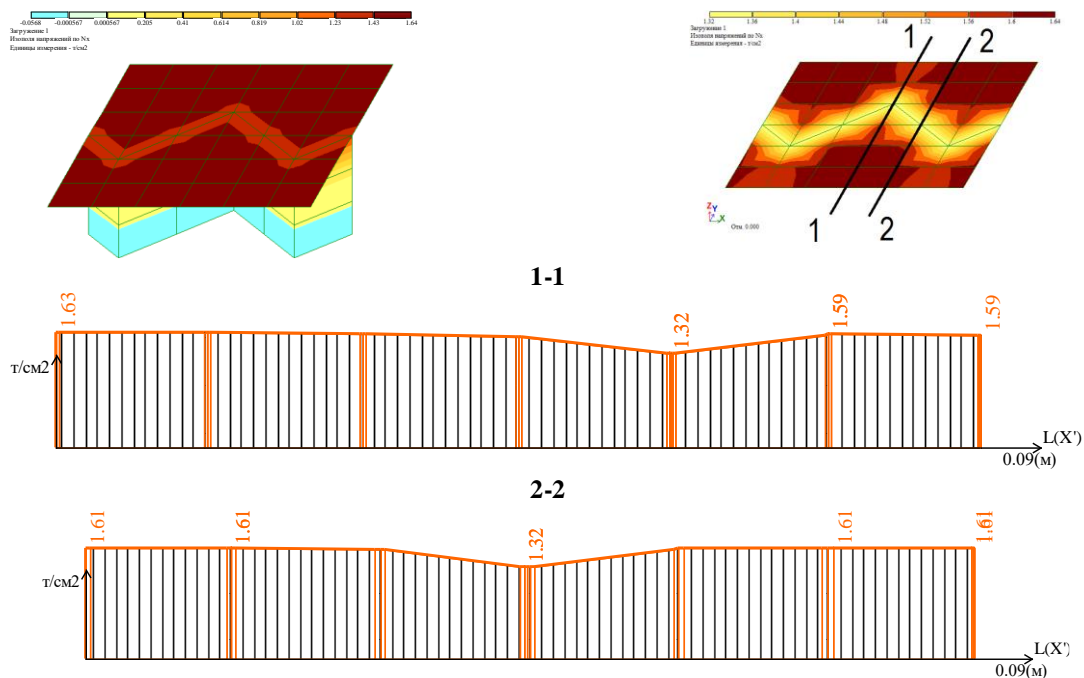


Рис. 5. Изополя нормальных напряжений ($N_x=\sigma_x$) в элементах фрагмента модели тавра с гофрированной стенкой (отдельно для пояса) и эпюры нормальных напряжений в поперечном сечении пояса

Fig. 5. Isofields of normal stresses ($N_x=\sigma_x$) in the elements of a fragment of a model of a tee with a corrugated wall (separately for the belt) and diagrams of normal stresses in the cross section of the belt

**Результаты расчета опытных моделей стержней из сварных тавров
с растянутой полкой**
Calculation results for experimental models of welded tee rods with a stretched flange

№	Размеры сечений пояса, стенки и профиля гофра, мм	$N_{x,средн},$ Т/см ²	K_w	$N_{x,min},$ Т/см ²	K_{Nf}
1	Полка: $t_{fi}=6, b_{fi}=90$ Стенка плоская: $t_{wt}=3, h_{wt}=45$	1,541	0,924	1,43	0,928
2	Полка: $t_{fi}=6, b_{fi}=90$; Стенка плоская нелинейно растянута: $t_{wt}=3, h_{wt}=45$	1,664	0,998	1,63	0,979
3	Полка: $t_{fi}=6, b_{fi}=90$ Стенка плоская: $t_{wt}=6, h_{wt}=45$	1,446	0,867	1,35	0,934
4	Полка: $t_{fi}=6, b_{fi}=90$; Стенка гофрированная: $t_{wt}=3, h_{wt}=45$ Гофры треугольные: $f_i=15, l_z=40$	$\frac{1,593}{1,597}$	$\frac{0,956}{0,958}$	$\frac{1,36}{1,36}$	$\frac{0,854}{0,952}$
5	Полка: $t_{fi}=6, b_{fi}=90$ Стенка гофрированная: $t_{wt}=6, h_{wt}=45$ Гофры треугольные: $f_i=15, l_z=40$	$\frac{1,564}{1,566}$	$\frac{0,938}{0,939}$	$\frac{1,32}{1,32}$	$\frac{0,844}{0,843}$
6	Полка: $t_{fi}=6, b_{fi}=90$ Стенка гофрированная: $t_{wt}=3, h_{wt}=45$ Гофры треугольные: $f_i=15, l_z=80$	$\frac{1,581}{1,566}$	$\frac{0,948}{0,939}$	$\frac{1,41}{1,39}$	$\frac{0,892}{0,888}$
7	Полка: $t_{fi}=6, b_{fi}=90$ Стенка гофрированная: $t_{wt}=3, h_{wt}=45$ Гофры треугольные: $f_i=10, l_z=40$	$\frac{1,583}{1,586}$	$\frac{0,950}{0,951}$	$\frac{1,38}{1,40}$	$\frac{0,872}{0,883}$
8	Полка: $t_{fi}=6, b_{fi}=90$ Стенка гофрированная: $t_{wt}=3, h_{wt}=45$ Гофры треугольные: $f_i=20, l_z=40$	$\frac{1,614}{1,604}$	$\frac{0,968}{0,962}$	$\frac{1,35}{1,33}$	$\frac{0,836}{0,829}$
9	Полка: $t_{fi}=6, b_{fi}=90$ Стенки нет	1,667	–	–	–
<p>В графах 3-6 приведены значения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - средние по ширине пояса нормальные напряжения $N_{x,средн}$; - коэффициент снижения нормальных напряжений от наличия в сечении тавра стенки $K_w=N_{x,средн}/N_{x,средн,9}$, где $N_{x,средн,9}=1,667$ т/см² – среднее напряжение в полке тавра без стенки; - значения минимальных нормальных напряжений в поясе $N_{x,min}$ (в месте контакта стенки и пояса); - коэффициент дополнительного снижения нормальных напряжений $K_{Nf}=N_{x,min}/N_{x,средн}$. <p><i>Для тавров с гофрированной стенкой значения приведены для двух сечений: в числителе – по вершине гофра, в знаменателе – по середине грани гофра.</i></p>					

По результатам выполненных расчетов опытных тавров можно сделать следующие выводы:

- при растяжении только полки тавра с плоской стенкой ненагруженная стенка включается в совместную работу с полкой, заметно снижая средние напряжения в полке (более 7%) и дополнительно (на 6–7%) понижая напряжения по линии контакта со стенкой, при этом увеличение сечения стенки тавра приводит к дополнительному снижению среднего напряжения в полке и почти не разгружает его в зоне поясных швов;

- одновременное растяжение элементов сечения тавра при нелинейном нагружении его плоской стенки (с уменьшением нагрузки к ее свободной кромке) не понижает средние напряжения в полке и несущественно (до 2%) снижает местное напряжение в полке (в зоне прикрепления стенки);

- гофрированная стенка только частично включается в совместную работу с растянутой полкой и поэтому незначительно (на 3–6%) снижает среднее напряжение в ней, но дополнительно и существенно (на 11–17%) понижает нормальные напряжения по линии контакта ее со стенкой. Это понижение заметно растет с увеличением высоты и уменьшением длины полуволны гофров стенки тавра;

- представляется, что снижение напряжений в зоне сварного поясного соединения у верхнего пояса дополнительно обезопасит работу мостовых и особенно подкрановых балок.

Заключение

Таким образом, крайние зоны тонкой гофрированной стенки при жестком соединении с поясами вовлекаются в совместную работу с ними и локально их разгружают. Это снижает напряжения в зоне контакта гофрированной стенки с поясами и дополнительно повышает надежность гофрированных конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дмитриева Т.Л., Уламбаяр Х. Использование балок с гофростенкой в современном проектировании // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2015. № 4(15). С. 132–139. EDN: VHDRER
2. Егоров П.И. Дополнительные изгибно-крутящие усилия в двутавровом стержне с поперечным непрерывным трапецидальным профилем гофров в стенке // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 10. С. 34–35.
3. Максимов Ю.С., Остриков Г.М. Стальные балки с тонкой гофрированной стенкой – эффективный вид несущих конструкций производственных зданий // Промышленное строительство. 1984. № 4. С. 10–11.
4. 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.
5. Степаненко А.Н. Экспериментальные исследования алюминиевых балок с волнистой стенкой // Строительная механика и строительные конструкции. Хабаровск: ХПИ, 1971. С. 133–142.
6. Тишков Н.Л., Степаненко А.Н. О дополнительных усилиях в поясах стальных балок с тонкими поперечно гофрированными стенками // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2014. № 4(35). С. 49–52. EDN: TEQREJ
7. Abbas H.H., Sauce R., Driver R.G. Simplified analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders un-der in-plane moment and shear // Engineering Structures. 2007. № 29. P. 2816–2824.
8. Aschinger R., Lindner J. Zu besonderheiten bei Trapezzstegträgern // Stahlbau. 1997. № 66(3). P. 136–142.
9. Chan C. L., Khalid Y.A., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Finite element analysis of corrugated web beams under bending // Journal of constructional steel webs. 2002. № 58. P. 1391–1406.
10. 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.
11. Huang L., Hikosaka H., Komine K. Simulation of accordion effect in corrugated steel web with concrete flanges // Comput. 2004. № 82. P. 2061–2069.

REFERENCES

1. Dmitrieva T.L., Ulambayar X. Use of sin beams in modern design. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost.* 2015, no. 4(15), pp. 132–139. (In Russ.).
2. Egorov P.I. Additional bending and twisting stresses in a double-t bar with a cross continuous trapezoidal section of crimps in a web. *Industrial and civil engineering.* 2007, no. 10, pp. 34–35. (In Russ.).
3. Maksimov Yu.S., Ostrikov G.M. Steel beams with a thin corrugated wall – an effective type of load-bearing structures of industrial buildings. *Industrial construction.* 1984, no. 4, pp. 10–11. (In Russ.).
4. 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.).
5. Stepanenko A.N. Experimental studies of aluminum beams with a wavy wall. *Structural mechanics and construction structures.* Khabarovsk, KhPI Publ., 1971. P. 133–142. (In Russ.).
6. Tishkov N.L., Stepanenko A.N. Additional efforts in the belts of steel beams with thin corrugated walls. *Bulletin of PNU.* 2014, no. 4(35), pp. 49–52. (In Russ.).
7. Abbas H.H., Sauce R., Driver R.G. Simplified analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders un-der in-plane moment and shear. *Engineering Structures.* 2007, vol. 29, pp. 2816–2824.

8. Aschinger R., Lindner J. Zu besonderheiten bei Trapezstegträgern. *Stahlbau*. 1997, no. 66(3), pp. 136–142.
9. Chan C. L., Khalid Y.A., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Finite element analysis of corrugated web beams under bending. *Journal of constructional steel webs*. 2002, vol. 58, pp. 1391–1406.
10. 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, vol. 29, pp. 195–208.
11. Huang L., Hikosaka H., Komine K. Simulation of accordion effect in corrugated steel web with concrete flanges. *Comput.* 2004, vol. 82, pp. 2061–2069.

Информация об авторах

Тишков Николай Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Высшая школа промышленного и гражданского строительства, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Россия), n.tishkov87@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2891-4926>

Степаненко Анатолий Николаевич – доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Высшая школа промышленного и гражданского строительства, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Россия), 000419@pnu.edu.ru

Information about the authors

Nikolay L. Tishkov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the High School of Industrial and Civil Construction, Pacific National University (Khabarovsk, Russia), n.tishkov87@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2891-4926>

Anatoly N. Stepanenko, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the High School of Industrial and Civil Construction, Pacific National University (Khabarovsk, Russia), 000419@pnu.edu.ru

Вклад авторов

Н.Л. Тишков – создание расчетных моделей в ПК «ЛИРА-САПР», проведение численного эксперимента, 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. Все авторы – утверждение окончательного варианта статьи.

Contribution of the authors

N.L. Tishkov – creation of computational models in the LIRA-SAPR software package, carrying out a numerical experiment, interpretation of the 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, statement of research problems, general guidance, generalization of results. All authors approved the final version of the manuscript.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 15.11.2023; одобрена после рецензирования 28.11.2023; принята к публикации 15.03.2024.

Information about the article

The article was submitted: November 15, 2023; approved after reviewing: November 28, 2023; accepted for publication: March 15, 2024.