

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 2. С. 123–131.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (2): 123–131.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.014

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-123-131

EDN: KGRKTU

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ВЫТЯЖКОЙ НИЖНЕГО ПОЯСА

Николай Леонидович Тишков, Анастасия Сергеевна Фомина

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Рациональное распределение материалов в конструкциях является актуальной научно-технической задачей. Гофрированные и предварительно напряжённые стальные конструкции зарекомендовали себя как эффективные и надежные. Данная работа направлена на совершенствование конструктивных решений балок двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой за счет создания предварительного напряжения в нижнем поясе.

Цель исследования – изучение работы стальной двутавровой балки с тонкой гофрированной стенкой, предварительно напряженной вытяжкой нижнего пояса.

В настоящей работе представлены конечно-элементные модели балок с гофрированными и плоской стенками (модель с плоской стенкой; базовая модель с поперечно-гофрированной стенкой; модель с нисходящими гофрами – угол наклона образующих гофров 20°; модель с восходящими гофрами – угол наклона образующих гофров 20°). Приведен способ задания предварительного напряжения на нижний пояс моделей балок при помощи отрицательного температурного воздействия. В ходе осуществленного численного эксперимента с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР» получены изополя распределения напряжений и деформированные схемы, выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния рассматриваемых моделей.

Выводы. По результатам проведенного исследования установлено: картина распределения нормальных напряжений в поясах гофрированных балок с предварительным напряжением и без него под действием внешней нагрузки имеет незначительные отличия; предварительное напряжение дает значительные выгибы конструкций, при этом наибольший выгиб показывает гофрированная балка с восходящими гофрами.

Ключевые слова: двутавровая балка, гофрированная стенка, предварительное напряжение, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов

Для цитирования: Тишков Н.Л., Фомина А.С. Анализ напряженно-деформированного состояния стальных гофрированных двутавровых балок, предварительно напряженных вытяжкой нижнего пояса // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 123–131. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-123-131. EDN: KGRKTU

ORIGINAL ARTICLE

**STRESS-STRAIN STATE OF STEEL CORRUGATED I-BEAMS
PRESTRESSED BY FLANGE DRAWING****Nikolay L. Tishkov, Anastasia S. Fomina***Pacific National University, Khabarovsk, Russia*

Abstract. The material distribution in structures is an urgent scientific and technical problem. Corrugated and prestressed steel structures are efficient and reliable.

Purpose: The aim of this paper is to study the operation of steel I-beam with a thin corrugated wall, prestressed by flange drawing.

Methodology/approach: Finite element modeling of beams with corrugated and flat walls (models with flat wall, transversely corrugated wall, downward corrugation at an angle of inclination 20 degrees, ascending corrugation at an angle of inclination 20 degrees). The proposed method is used for prestressing the lower beam flange using negative temperature effects. Numerical experiments in LIRA-SAPR software allow to obtain the stress distribution isofields and deformation patterns. A comparative analysis of the stress-strain state.

Research findings: The normal stress distribution over flanges of corrugated beams with and without prestress under the external load has low difference. Prestress produces significant deflections of structures and the greatest deflection of the beam with ascending corrugations.

Keywords: I-beam, corrugated wall, prestressing, stress-strain state, finite element method

For citation: Tishkov N.L., Fomina A.S. Stress-strain state of steel corrugated I-beams prestressed by flange drawing. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 123–131. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-123-131. EDN: KGRKTU

Введение

Исследования в области пролетных гофрированных конструкций в России берут свое начало с испытаний В.Н. Горновым (1936 г.) балок с тонкой поперечно-гофрированной стенкой. За более чем 80 лет работа балок двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой достаточно изучена и доказана высокая эффективность их применения, но это не останавливает ученых, которые делают попытки в развитии оценки напряженно-деформированного состояния [1, 2, 3, 4, 5], совершенствуют конструктивные решения [6, 7, 8], комбинируют материалы [9, 10].

Настоящая работа направлена на совершенствование конструктивных решений балок двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой за счет попытки внедрения предварительного напряжения в нижнем поясе. Такая технология предполагает поэтапное изготовление: вытяжка нижнего поясного листа до напряжений, близких к пределу текучести стали; сварка нижнего пояса (в растянутом состоянии) с тавровой заготовкой с гофрированной стенкой; снятие растягивающих усилий с нижнего пояса. Сами по себе предварительно напряженные стальные конструкции достаточно изучены и обладают рядом достоинств [11, 12]. Таким образом, объединение двух эффективных конструктивных решений может оказаться перспективным направлением.

Предметом исследования является изучение напряженно-деформированного состояния стальной двутавровой балки с тонкой гофрированной стенкой, предварительно напряженной вытяжкой нижнего пояса.

Цели и задачи

Цель работы: исследование работы стальной двутавровой балки с тонкой гофрированной стенкой, предварительно напряженной вытяжкой нижнего пояса.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Созданы конечно-элементные модели стальных балок с гофрированными и плоской стенками в программном комплексе «ЛИРА-САПР».
2. Произведен расчет и оценка напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов при трех вариантах загрузки (в том числе с моделированием предварительного напряжения).
3. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов исследования.

Моделирование и результаты расчета

Для оценки напряженно-деформированного состояния балок, предварительно напряженных вытяжкой нижнего пояса, использовался программный комплекс «ЛИРА-САПР», в котором были созданы модели четырех балок. Рассматриваемые модели имеют одинаковые параметры поперечного сечения и гофрирования, граничные условия, нагрузки и свойства материалов. Задача решалась в упругой постановке.

Параметры моделей:

- расчетная схема – однопролетная шарнирно опертая балка;
- пролет – 6 м;
- поперечное сечение: высота стенки – 50 см, толщина гофрированной стенки – 0,2 см, толщина плоской стенки – 0,2 см, толщина поясов – 0,8 см, ширина поясов – 20 см;
- параметры гофрирования стенки: длина полуволны – 12 см, высота полуволны – 2 см, профиль гофров – треугольный;
- материал: нижний и верхний пояса – сталь С345, стенка – сталь С245.

Виды загрузки моделей:

- равномерно распределенная нагрузка интенсивностью 800 кг/м (приложена к верхнему поясу в пределах контакта стенки и пояса);
- температурное воздействие, равное $-145,714^{\circ}\text{C}$ (приложено к нижнему поясу);
- равномерно распределенная нагрузка и температурное воздействие.

Виды моделей балок:

- модель с плоской стенкой (рис. 1, а);
- базовая модель (рис. 1, б) – угол наклона образующих гофров 0° от плоскости поперечного сечения;
- модель с восходящими гофрами (рис. 1, в) – угол наклона образующих гофров 20° ;
- модель с нисходящими гофрами (рис. 1, г) – угол наклона образующих гофров 20° .

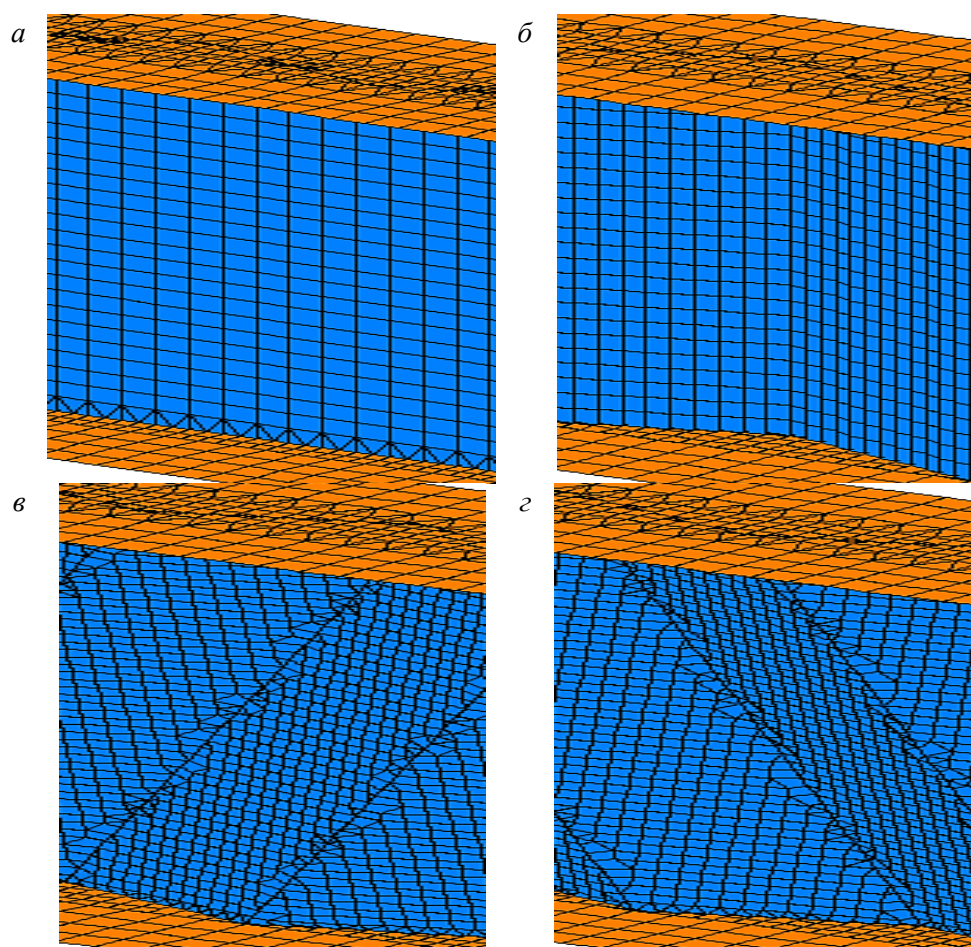


Рис. 1. Фрагменты конечно-элементных моделей балок:

a – модель с плоской стенкой; *б* – базовая модель; *в* – модель с восходящими гофрами; *г* – модель с нисходящими гофрами

Fig. 1. FEMs of beams:

a – flat wall; *b* – corrugated wall; *c* – ascending corrugation; *d* – downward corrugation

Для моделирования предварительного напряжения в нижнем поясе балки по всей длине задана нагрузка в виде температурного воздействия T .

Величина температурного воздействия T должна иметь такое значение, при котором растягивающие нормальные напряжения σ имеют значения:

$$\sigma = 0,9R_y, \quad (1)$$

где $R_y = 340$ МПа – расчетное сопротивление стали С345, определяемое по СП 16.13330.2017, прил. В.

По закону Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

где $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости стали; ε – относительные деформации.

Относительная величина изменения линейных размеров от температурных воздействий определяется как

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где $\alpha = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ – коэффициент линейного расширения стали; Δt – температурный перепад.

Из выражения (2) с учетом (1) и (3) получено значение Δt :

$$\Delta t = \frac{0,9R_y}{E \cdot \alpha} = -145,714 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Таким образом, во втором нагружении для моделирования предварительного напряжения задано температурное воздействие со следующими характеристиками: $\alpha = 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\Delta t = -145,714 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Деформированные схемы конечно-элементных моделей от температурного воздействия представлены на рис. 2.

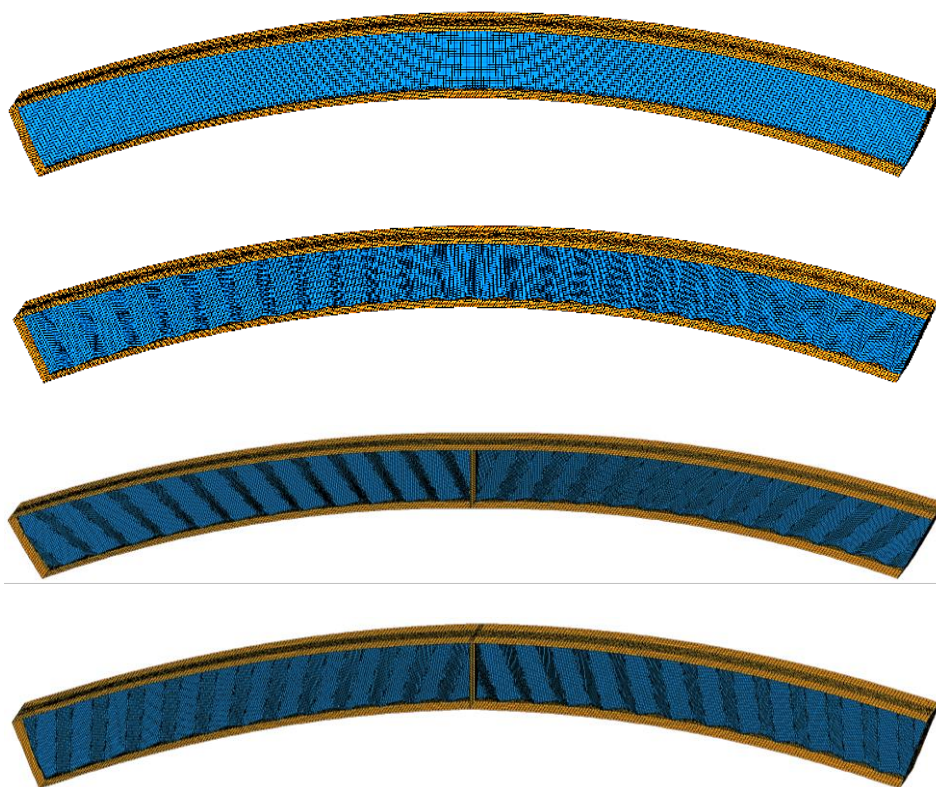


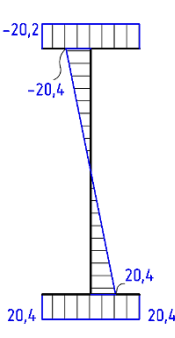
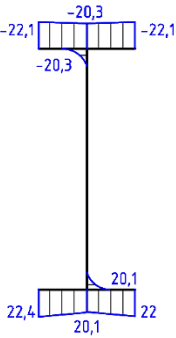

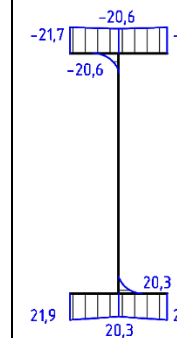
Рис. 2. Деформированные схемы конечно-элементных моделей от температурного воздействия
Fig. 2. FEMs of deformations at temperature influence

Основные результаты расчета моделей балок при равномерно распределенной нагрузке представлены в табл. 1 (для поперечных сечений, отнесённых от середины пролета на величины $h/5$).

Таблица 1
Результаты расчета балок от равномерно распределенной нагрузки

Table 1

Strength analysis of beams at uniformly distributed load

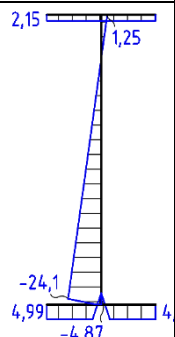
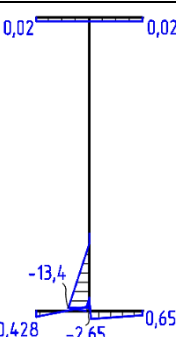

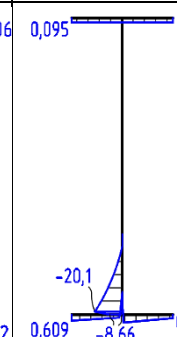
Контролируемый параметр	Балка с плоской стенкой	Базовая модель	Балка с нисходящими гофрами	Балка с восходящими гофрами
Нормальные напряжения в середине пролета, кН/см^2				
Прогиб в середине пролета, мм	-17,2	-18,7	-19,4	-19,3

Основные результаты расчета моделей балок при температурном воздействии представлены в табл. 2.

Таблица 2
Результаты расчета балок от температурного воздействия

Table 2

Strength analysis of beams at temperature effect

Контролируемый параметр	Балка с плоской стенкой	Базовая модель	Балка с нисходящими гофрами	Балка с восходящими гофрами
Нормальные напряжения в середине пролета, кН/см^2				
Прогиб в середине пролета, мм	+11,9	+12,9	+11,5	+14,4

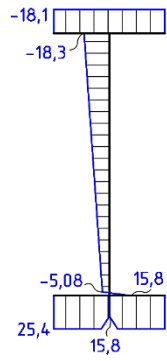
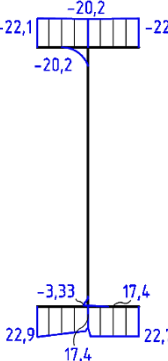
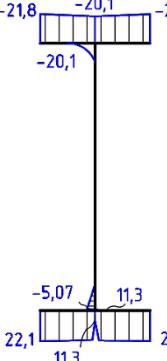
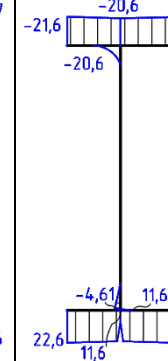
Основные результаты расчета моделей балок при одновременном действии равномерно распределенной нагрузки и температурного воздействия представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета балок от равномерно распределенной нагрузки и температурного воздействия

Table 3

Strength analysis of beams at uniformly distributed load and temperature effect

Контролируемый параметр	Балка с плоской стенкой	Базовая модель	Балка с нисходящими гофрами	Балка с восходящими гофрами
Нормальные напряжения в середине пролета, кН/см ²				
Прогиб в середине пролета, мм	-5,28	-5,8	-7,9	-5,03

Выводы

На основании анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

– распределения нормальных напряжений в поясах гофрированных балок с предварительным напряжением и без него под действием внешней нагрузки имеют незначительные отличия (сжимающие напряжения в верхнем поясе имеют одинаковые значения, а в нижнем – отличаются на 3–4 %). Это вызвано особенностью работы гофрированных стенок, которые не способны воспринимать нормальные напряжения поперек гофров, поэтому наблюдается незначительный (по сравнению с плоскостенчатыми) прирост нормальных напряжений в нижнем поясе от предварительного напряжения;

– предварительное напряжение дает значительные выгибы конструкций, при этом наибольший выгиб показывает гофрированная балка с восходящими гофрами;

– за счет предварительного напряжения суммарный прогиб в гофрированных балках оказался меньше, чем прогиб в балках без преднапряжения, что дает возможность снизить строительную высоту перекрытия и увеличить пролет.

В ходе анализа результатов проведенного численного эксперимента установлено, что эффективность предварительного напряжения тонкостенных

гофрированных балок заключается в возможности снижения суммарной деформации конструкций без существенного изменения картины распределения нормальных напряжений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Надольский В.В., Вихляев А.И. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 6. С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706
2. Макеев С.А., Силина Н.Г. Разработка методики уточненного расчета гофробалок на общую устойчивость // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 12. С. 52–60. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.52-60
3. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 6. С. 676–687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687
4. Степаненко А.Н., Тишков Н.Л., Гузеев А.Ю. О размерах участков тонкой поперечно-гофрированной стенки стальной двутавровой балки, работающей на продольные усилия // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 3 (42). С. 43–50.
5. Denan F., Shoong K.K., Hashim N.S., Ken C.W. Nonlinear analysis of triangular web profile steel section under bending behavior // Lecture Notes in Civil Engineering. 2019. № 9. P. 463–472.
6. Тишков Н.Л., Степаненко А.Н., Шипелев И.Л., Устименко М.Б. Совершенствование конструкции стальной двутавровой балки с тонкой поперечно-гофрированной стенкой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 104–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-104-111
7. Митрофанов С.В., Митрофанов В.А. Работа балки с гофрированной стенкой с различными профилями гофрирования // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 9 (61). С. 87–92.
8. Холопов И.С., Лукин А.О., Козырев П.Н. Совершенствование конструкции балки с гофрированной стенкой // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре : сборник статей / под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, В.П. Попова. Самара : Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. С. 68–71.
9. Грачев В.А. Экспериментальное исследование металлодеревянной балки двутаврового сечения с поперечно-гофрированной стенкой // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство : сборник статей. Самара : Самарский государственный технический университет, 2019. С. 41–49.
10. Тишков Н.Л., Степаненко А.Н., Захарова Я.Ю. Обоснование оптимального профиля поперечно-гофрированной стенки металлодеревянной двутавровой балки // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 2 (47). С. 75–81. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-2-8
11. Кравчук В.А., Левина Г.В. Эффективность предварительно напряженных стальных тонкостенных балок // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 1 (40). С. 45–54.
12. Кравчук В.А., Кравчук Е.В. Развитие исследований предварительно напряженных строительных металлических конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 86–92.

REFERENCES

1. Nadolsky V.V., Vikhlyayev A.I. FEM of load-bearing capacity of beams with corrugated wall under localized load. *Vestnik MGSU*. 2022; 17 (6): 693–706. DOI 10.22227/1997-0935.2022.6.693-706 (In Russian)
2. Makeev S.A., Silina N.G. Methodology development for refined strength analysis of corrugated beam. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; (12): 52–60. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.52-60 (In Russian)
3. Saiyan S.G., Paushkin A.G. Numerical parametric study of stress-strain state of I-beams with various types of corrugated walls. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (6): 676–687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687 (In Russian)

4. Stepanenko A.N., Tishkov N.L., Guzeev A.Yu. Dimensions of sections of thin transversely corrugated wall of steel I-beam operating at longitudinal forces. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; 3 (42): 43–50. (In Russian)
5. Denan F., Shoong K.K., Hashim N.S., Ken C.W. Nonlinear analysis of triangular web profile steel section under bending behavior. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2019; (9): 463–472.
6. Tishkov N.L., Stepanenko A.N., Shipilev I.L., Ustimenko M.B. Structural improvement of steel I-beam with thin transversely corrugated wall. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22 (2): 104–111. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-104-111 (In Russian)
7. Mitrofanov S.V., Mitrofanov V.A. Beam operation with various corrugation profiles. *Stroitel'stvo i tekhnologicheskaya bezopasnost'*. 2017; 9 (61): 87–92. (In Russian)
8. Kholopov I.S., Lukin A.O., Kozyrev P.N. Improved design of corrugated wall beam. In: *Coll. Papers "Traditions and Innovations in Construction and Architecture"*. M.I. Bal'zannikov, K.S. Galitskov, V.P. Popov, Eds., Samara, 2015. Pp. 68–71. (In Russian)
9. Grachev V.A. Experimental study of a metal-wood beam of I-section with a transversely corrugated wall. In: *Coll. Papers "Traditions and Innovations in Construction and Architecture"*, Samara, 2019. Pp. 41–49. (In Russian)
10. Tishkov N.L., Stepanenko A.N., Zakharova Ya.Yu. Justification of the optimum profile of transversely corrugated wall of metal-wood I-beam. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2021; 2 (47): 75–81. DOI 10.24866/2227-6858/2021-2-8 (In Russian)
11. Kravchuk V.A., Levina G.V. Efficiency of prestressed steel thin-walled beams. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016; 1 (40): 45–54. (In Russian)
12. Kravchuk V.A., Kravchuk E.V. Development of research into prestressed metal structures. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2019; 6 (77): 86–92.

Сведения об авторах

Тишков Николай Леонидович, канд. техн. наук, Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, n.tishkov87@gmail.com

Фомина Анастасия Сергеевна, студентка, Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, afomina425@gmail.com

Authors Details

Nikolay L. Tishkov, PhD, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, n.tishkov87@gmail.com

Anastasia S. Fomina, Student, Pacific National University, 136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia, afomina425@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.12.2023
Одобрена после рецензирования 18.03.2024
Принята к публикации 19.03.2024

Submitted for publication 06.12.2023
Approved after review 18.03.2024
Accepted for publication 19.03.2024