

Научная статья
 УДК 624.046.3
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-138-149>
 EDN: HWSGNK



ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ СВАРНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК С ПОПЕРЕЧНО-ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ СОРТАМЕНТА ZEMAN

С. А. Макеев^{*1}, Н. Г. Силина², М. А. Ступин³

¹ Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск, Россия

² ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», г. Москва, Россия

³ АО «Судостроительный завод им. Б. Е. Бутомы», г. Керчь, Россия

makeev608079@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2915-982X>

n.silina@stako.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8717-8597>

79620503150@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9892-150X>

^{*}ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Сварные двутавровые балки с поперечно-гофрированной стенкой при загрузке в плоскости стенки рассчитываются на общую устойчивость в соответствии с п. 20.6.3.11 СП 294.1325800.2017, Изм. 2 от 15.06.2021 г. Здесь рассчитывается на общую продольную устойчивость из плоскости стенки балки отдельно взятый центрально сжатый пояс балки как шарнирно опертый по концам элемент. При этом не учитывается совместная работа сжатого пояса со стенкой, опорными ребрами, растянутым поясом.

Цель работы. Показать расчетным путем на примерах шести балок, что если в сравнении с расчетом по СП 294.1325800.2017 учесть совместную работу сжатого пояса со стенкой, опорными ребрами, растянутым поясом, то расчетная критическая нагрузка общей потери устойчивости гофробалки будет больше. И это увеличение тем существенней, чем меньше высота гофробалки. При этом авторы ограничились рассмотрением балок с соотношением размеров и критических нагрузок, обеспечивающих при потере общей устойчивости работу стали в упругой стадии.

Материалы и методы. Расчетным путем исследована общая устойчивость серии разрезных балок с поперечно-гофрированной стенкой тремя способами: по СП 294.1325800.2017, в ПК ЛИРА-САПР путем моделирования балок оболочечными элементами, включая пояса, стенки и опорные ребра и по СП 16.13330.2017, считая эквивалентную по критерию «общая устойчивость» сварную двутавровую балку с плоской стенкой.

Результаты исследования. Приведены данные расчета критических нагрузок первой формы потери общей устойчивости шести разрезных балок сортамента Zeman высотой 333, 500, 750, 1000, 1250, 1500 мм пролетом 6,0 м тремя способами с загрузкой верхнего пояса, равномерно распределенной нагрузкой в плоскости стенки без раскрепления сжатого пояса в пролете и раскреплением опорных сечений из плоскости стенки и от поворота относительно оси балок.

Обсуждение и выводы. Для балок с высотой стенки 333 мм учет совместной работы сжатого пояса со стенкой, растянутым поясом, опорными ребрами показал увеличение критической нагрузки в сравнении с расчетом по СП 294.1325800.2017 на 24%. При увеличении высоты балок до 900–1000 мм разница значений критических нагрузок, вычисленных с учетом совместной работы элементов балки и по СП 294.1325800.2017, нелинейно снижается до 3%. А для гофробалок с высотой 1000–1500 мм эта разница составляет менее 3%, что показывает возможность выполнения расчетов балок с поперечно-гофрированной стенкой сортамента Zeman с высотой 1000–1500 мм на общую устойчивость с достаточной для инженерных расчетов точностью по СП 294.1325800.2017.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сварная двутавровая балка, балка с поперечно-гофрированной стенкой, общая устойчивость балки из плоскости стенки

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

© Макеев С. А., Силина Н. Г., Ступин М. А., 2023



Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 04.11.2022; одобрена после рецензирования 09.01.2023; принята к публикации 20.02.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Макеев С. А., Силина Н. Г., Ступин М. А. Исследование общей устойчивости сварных двутавровых балок с поперечно-гофрированной стенкой сортамента ZEMAN // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 138-149. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-138-149>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-138-149>

EDN: HWSGNK

INVESTIGATION OF THE OVERALL STABILITY OF WELDED I-BEAMS WITH A CROSS-CORRUGATED WALL OF THE ZEMAN RANGE

Sergey A. Makeyev^{*1}, Natalia G. Silina², Mikhail A. Stupin³

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

²ZAO Melnikov Central R&D Institute of Construction Material Structures, Moscow, Russia

³B. E. Butoma Shipbuilding Plant JSC, Kerch, Russia

makeev608079@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2915-982X>

n.silina@stako.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8717-8597>

79620503150@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8717-8597>

^{*}corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Welded I-beams with a transversely corrugated wall when loaded in the wall plane are calculated for overall stability in accordance with paragraph 20.6.3.11 of СП 294.1325800.2017, change 2 from 06/15/2021. Here, a separate centrally compressed girder belt is calculated for overall longitudinal stability from the plane of the beam wall as an element pivotally supported at the ends. This does not take into account the joint work of the compressed belt with the wall, supporting ribs, stretched belt.

The authors set a goal to show by calculation using the examples of six beams that if, in comparison with the calculation according to СП 294.1325800.2017, the joint work of the compressed belt with the wall, support ribs, stretched belt is taken into account, then the calculated critical load of the total loss of stability of the corrugator will be greater. And this increase is the more significant, the lower the height of the corrugator. At the same time, the authors limited themselves to considering beams with a ratio of sizes and critical loads that ensure the operation of steel in the elastic stage with loss of overall stability.

Materials and methods. The general stability of split beams with a transversely corrugated wall was studied by calculation in three ways: according to СП 294.1325800.2017, in the LIRA-CAD PC by modelling beams with shell elements, including belts, walls and support ribs, and according to СП 16.13330.2017, considering a welded I-beam with a flat wall equivalent to the criterion of general stability.

The results of the study. The data of calculation of critical loads of the first form of loss of general stability of six split beams of the Zeman range with height are given 333, 500, 750, 1000, 1250, 1500 with a span of 6.0 m in three proposed ways with loading of the upper belt with a uniformly distributed load in the wall plane without loosening the compressed belt in the span and loosening the support sections from the wall plane and from rotation relative to the axis of the beams.

Discussion and conclusions. For beams with a wall height of 333 mm, taking into account the joint work of the compressed belt with the wall, stretched belt, support ribs showed an increase in critical load in comparison with the calculation according to СП 294.1325800.2017 by 24%. With an increase in the height of the beams to 900-1000 mm, the difference in the values of critical loads calculated taking into account the joint work of the beam elements and according to СП 294.1325800.2017 non-linearly decreases to 3%. And for corrugated rollers with a height of 1000-1500 mm, this difference is less than 3%, which shows that it is possible to perform calculations of beams with a transversely corrugated wall of the Zeman range with heights of 1000-1500 mm for overall stability with sufficient accuracy for engineering calculations according to СП 294.1325800.2017.

© Makeyev S. A., Silina N. G., Stupin M. A., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

KEYWORDS: welded I-beam, a beam with a transversely corrugated wall, the overall stability of the beam from the wall plane

The article was submitted 04.11.2022; approved after reviewing 09.01.2023; accepted for publication 20.02.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Makeyev S. A., Silina N. G., Stupin M. A. Investigation of the overall stability of welded i-beams with a cross-corrugated wall of the zeman range. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 138-149. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-138-149>

ВВЕДЕНИЕ

Сварные двутавровые балки с поперечно-гофрированной стенкой (далее – гофробалки) находят применение в качестве элементов стальных каркасов, конструкций зданий и сооружений начиная с 60-х годов прошлого века. Эффективность применения гофробалок показана в работах [1, 2, 3, 4, 5, 6]. При этом находят применение гофробалки как с синусоидальным профилем стенки¹, так и с профилем треугольной, трапециевидной² и других форм [7, 8]. Известно применение изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов с поперечно-гофрированными стенками в мостостроении, кораблестроении³, гидротехнических сооружениях [9, 10].

В соответствии с существующими нормативными документами (СП 16.13330.2017, СП 294.1325800.2017) изгибаемые балки, в том числе гофробалки, следует рассчитывать на общую устойчивость.

Так, в п. 20.6.3.11 СП 294.1325800.2017, Изм. 2 от 15.06.2021, рассчитывается на общую продольную устойчивость из плоскости стенки балки не гофробалка как таковая, а отдельно взятый центрально сжатый пояс балки как шарнирно опертый по концам элемент. При этом не учитывается наличие стенки, опорных ребер, растянутого пояса. Авторы считают, что если в расчете по СП 294.1325800.2017 учесть наличие стенки, опорных ребер, растянутого пояса, то несущая способность гофробалки по критерию «общая устойчивость» определенным образом повысится.

Цель работы. Показать расчетным путем, что если в указанном расчете по СП 294.1325800.2017 учесть совместную работу сжатого пояса со стенкой, опорными ребрами, растянутым поясом, то расчетная критическая нагрузка будет больше. И это увеличение тем существенней, чем меньше высота гофробалки.

При этом авторы ограничились рассмотрением балок с соотношением размеров и критических нагрузок, обеспечивающих при потере общей устойчивости работу стали в упругой стадии.

Для достижения поставленной цели в статье даны три разных способа расчета на общую устойчивость при изгибе в плоскости стенки серии из шести гофробалок сортамента австрийской компании Zeman⁴ разной высоты: WTB-333, WTB-500, WTB-750, WTB-1000, WTB-1250, WTB-1500.

Сортамент гофробалок компании Zeman был выбран для анализа вследствие того, что эта компания является крупнейшим производителем гофробалок в Европе, а также лидером по изготовлению и распространению автоматизированных линий⁵ по производству гофробалок собственного производства.

Следует акцентировать внимание на том, что в отличие от Эйлера, рассматривавшего устойчивость идеальных систем, расчеты общей продольной устойчивости при центральной сжатии стержней, расчеты общей устойчивости балок по СП 16.13330.2017 и СП 294.1325800.2017 проводятся по эмпирическим зависимостям, учитывающим несовер-

¹ <https://patents.google.com/patent/RU2767006C1/ru> (дата обращения: 13.09.2022)

² <file:///C:/Users/User/Downloads/autoref-issledovanie-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-stalnykh-balok-i-kolonn-iz-dvutavra-s.pdf> (дата обращения: 13.09.2022)

³ <http://library.nsa.ru/Ю.А.%20Шиманской%20Справочник%20по%20строительной%20механике%20корабля%201.pdf> (дата обращения: 13.09.2022)

⁴ https://alfacelik.com.tr/wp-content/uploads/2017/10/e_sinbeam.pdf (дата обращения: 13.09.2022)

⁵ <http://www.modul-proekt.ru/zeman.html> (дата обращения: 13.09.2022)

шенства реальных конструкций (случайные эксцентриситеты, начальные искривления, погиби оси, п. 7.1.7 СП 294.1325800.2017).

Первый способ. Расчет гофробалок на общую устойчивость в конечно-элементном ПК «ЛИРА-САПР» как оболочечных пространственных систем по Эйлеру (идеальные системы). Здесь учитывается совместная работа всех элементов гофробалок (сжатый, растянутый пояса, гофрированная стенка, опорные ребра).

Второй способ. Расчёт гофробалок на общую устойчивость по СП 294.1325800.2017, п. 20.6.3.11, Изм. 2 от 15.06.2021. Здесь рассчитывается на общую продольную устойчивость из плоскости стенки балки отдельно взятый центрально сжатый пояс балки как шарнирно опертый по концам элемент. При этом продольная сжимающая сила в расчетном поясе определяется как $N = M/h$, где M – максимальный изгибающий момент в средней трети длины балки между точками раскрепления пояса из плоскости стенки, h – расстояние между центрами тяжести сечений поясов. Такой расчет дает заниженное значение критической нагрузки ввиду того, что не учитывает поддерживающий эффект от наличия гофрированной

стенки, наличия опорных ребер, растянутого пояса [11, 12].

Третий способ. Расчёт гофробалок на общую устойчивость по п. 8.4.1, Приложение 0 Ж, СП16.13330.2017 по авторскому алгоритму. Здесь, как и в первом способе, учитывается совместная работа всех элементов гофробалок (сжатый, растянутый пояса, гофрированная стенка, опорные ребра).

Так как СП16.13330.2017 регламентирует расчёт сварных двутавровых балок с плоской стенкой, расчёт гофробалок предложено выполнять следующим образом:

1) построение оболочечных конечно-элементных моделей двух сварных двутавровых балок с равными габаритами и размерами поллок, одна из которых имеет гофрированную стенку заданной толщины, а вторая плоскую;

2) подбор путем последовательных численных расчётов, толщины стенки балки с плоской стенкой, при которой гофробалка и балка с плоской стенкой имеют одинаковую, с заданной точностью, нагрузку первой формы потери общей устойчивости; далее такая балка с плоской стенкой называется эквивалентной балкой;

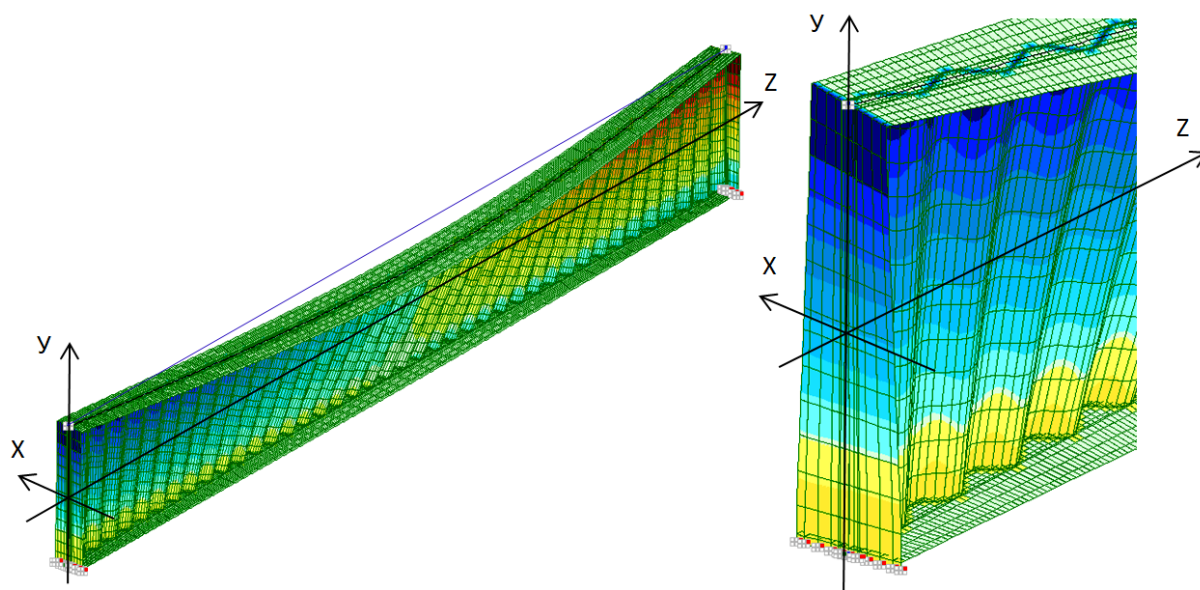


Рисунок 1 – Первая форма общей потери устойчивости гофробалки с укрупненным видом на деформации опорного ребра
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – The first form of the general loss of stability of the corrugator with an enlarged view of the deformation of the support rib
Source: compiled by the authors.

3) расчет несущей способности эквивалентной балки на общую устойчивость по п. 8.4.1 СП16.13330.2017, Приложение Ж как сварной двутавровой балки с плоской стенкой.

Таким образом, третьим способом рассчитывались не гофробалки, а эквивалентные двутавровые балки с плоской стенкой, имеющие равные исследуемым гофробалкам несущие способности по критерию «общая устойчивость».

Для пояснения термина «поддерживающий эффект» от совместной работы элементов гофробалки при выходе сжатого пояса из плоскости стенки при расчете по СП 294.1325800.2017 приведен рисунок 1, где представлена первая форма потери устойчивости произвольной гофробалки.

На рисунке 1 отчетливо видно, что при выходе сжатого пояса из плоскости стенки:

- включаются в работу стенки с нижним поясом, которые препятствуют выходу сжатого пояса из плоскости стенки, то есть поддерживают сжатый пояс;

- включаются в работу опорные ребра, которые, поворачиваясь относительно вертикальной оси Y , также препятствуют выходу сжатого пояса из плоскости стенки, то есть тоже поддерживают сжатый пояс.

Таким образом, сжатый пояс в расчетной схеме по СП 294.1325800.2017 на самом деле имеет упругое опирание по концам – опоры отдельно взятого сжатого пояса имеют угловую жесткость относительно оси Y в местах соединения сжатого пояса с опорными ребрами. При этом в пролете сжатый пояс поддерживается стенкой и растянутым поясом за счет совместной работы.

Таблица 1
Параметры исследуемых гофробалок
Источник: составлено авторами.

Table 1
Parameters of the studied welded I-beam
Source: compiled by the authors.

Тип гофры	Высота (амплитуда) гофры f , мм	Период гофры A , мм	Толщина полки t_p , мм	Ширина полки, мм	Толщина стенки t_w , мм	Пролет балки l_{ep} , мм	Толщина опорного ребра, мм
Синусоидальный	± 20	145	10	200	2,5	6200	8

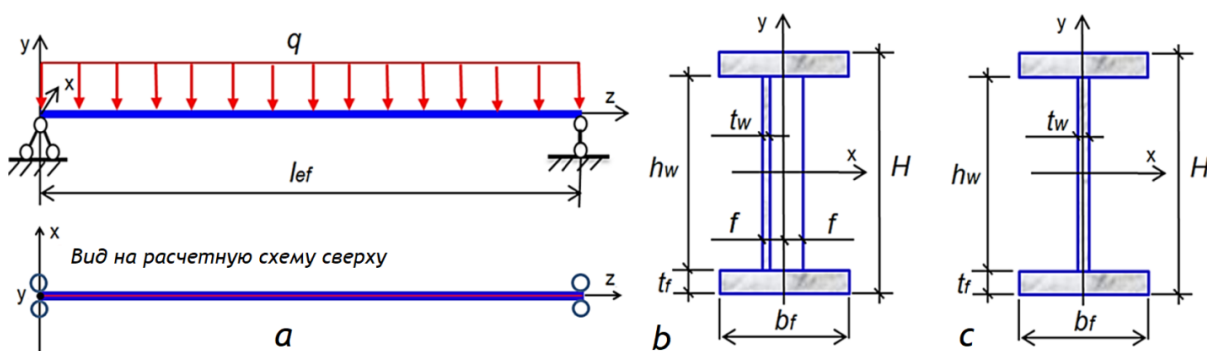


Рисунок 2 – Расчетная схема исследуемых балок:
а – расчётная схема загрузки;
б – сечение гофробалки;
с – сечение эквивалентной двутавровой балки с плоской стенкой
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Design scheme of the studied beams
а - design scheme of loading beams
б - the cross section of corrugator
с - cross section of an equivalent I-beam with a flat wall
Source: compiled by the authors.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследованы шесть разрезных гофробалок с синусоидально гофрированными стенками сортамента Zeman⁶ с высотами стенки с высотами стенок $h_w = 333$ мм (WTB-333), 500 мм (WTB-500), 750 мм (WTB-570), 1000 мм (WTB-1000), 1250 мм (WTB-1250), 1500 мм (WTB-1500).

При этом равномерно распределенная нагрузка q прикладывалась к верхнему поясу гофробалок в плоскости стенки без раскрепления сжатого пояса в пролете и раскреплением опорных сечений от перемещений из плоскости стенки и от поворота относительно оси балок.

Остальные геометрические параметры равны для всех исследуемых балок и приведены в таблице 1. На рисунке 2 представлена расчетная схема балок с реализацией условий закрепления опорных сечений балок

по СП 16.13330.2017, Приложение Ж, п. Ж.1: опорные сечения закреплены от боковых смещений и поворота относительно оси балок.

Выбор параметров исследуемых балок продиктован принятым условием работы стали в упругой стадии при достижении нагрузки критических значений первой формы общей потери устойчивости: максимальные нормальные напряжения в полках действуют в гофробалке с высотой стенки $h_w = 333$ мм и составляют ± 173 МПа, с увеличением высоты балок нормальные напряжения в полках при потере общей устойчивости уменьшаются.

Представим более подробно результаты расчета критических нагрузок вторым и третьим способами на примере гофробалки с высотой стенки $h_w = 333$ мм, по классификации сортамента Zeman это балка WTB-333.

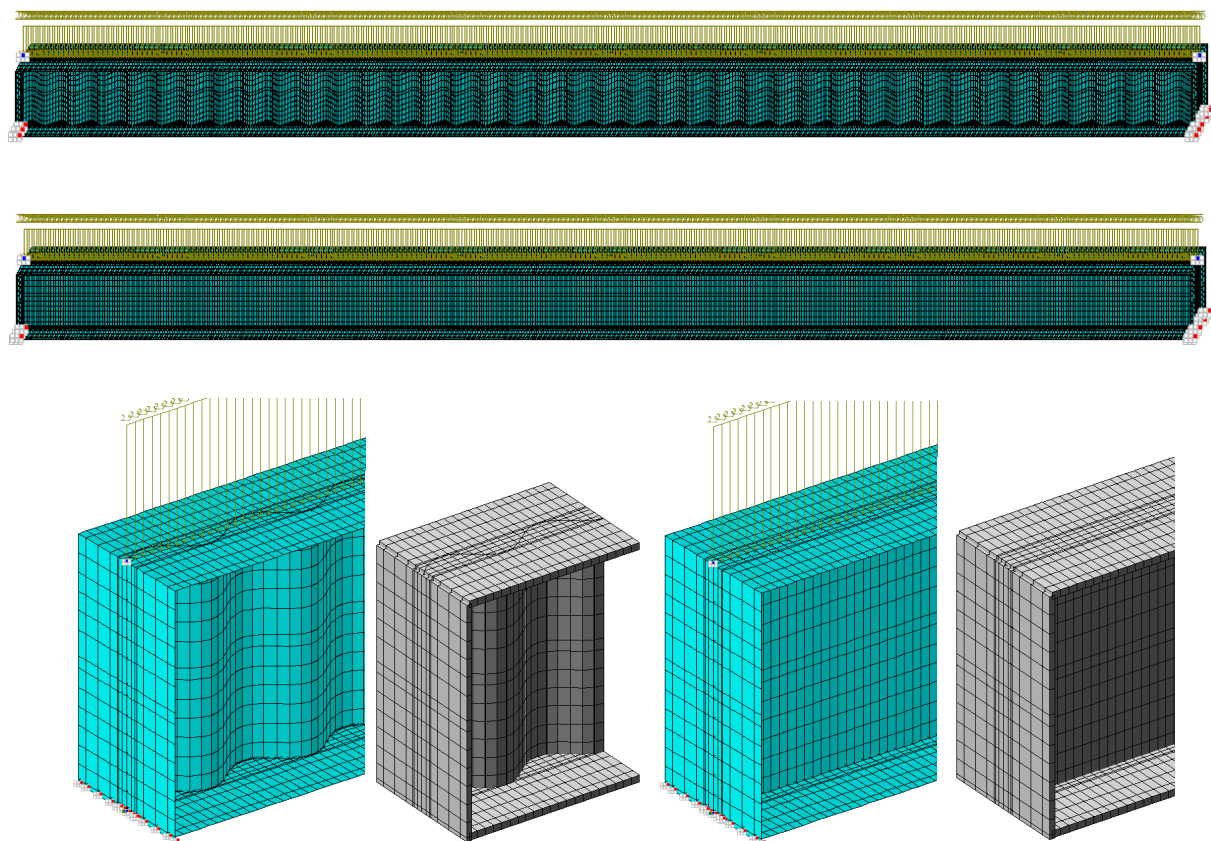


Рисунок 3 – Оболочечные модели исследуемых балок в ПК «ЛИРА-САПР» с укрупненными видами опорных участков
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Shell models of the studied beams in the LIRA-CAD PC with enlarged types of support sections
Source: compiled by the authors.

⁶ <http://buildingbook.ru/download/Sin-beam.pdf> (дата обращения: 13.09.2022)

Для этого построены две оболочечные модели разрезных балок с загрузкой верхнего пояса равномерно распределенной нагрузкой $q = 2,5$ тс/м без раскрепления сжатого пояса (рисунок 3):

- модель гофробалки с параметрами по таблице 1;

- модель двутавровой балки с плоской стенкой с такими же, как у расчетной гофробалки высотой стенки и размерами поясов.

Путём итерационных расчётов подбиралась толщина плоской стенки, при которой потеря общей устойчивости гофробалки и двутавровой балки с плоской стенкой происходила одновременно (случай идеальных систем с рассмотрением только первой формы потери общей устойчивости по Эйлеру). В результате нескольких численных итераций определена требуемая толщина плоской стенки, которая составила 7,4 мм (погрешность в определении критической нагрузки гофробалки и эквивалентной балки с плоской стенкой составила 0,13 % – достаточный процент эквивалентности).

При этом коэффициент потери общей устойчивости балок по первой форме составил $\lambda_1 = 1,076$ (это число, в которое следует увеличить заданную нагрузку, чтобы балки потеряли общую устойчивость). В соответствии с результатами численного расчёта, критическая нагрузка по Эйлеру (идеальные системы) $q_{cr \text{ ЛИРА}}$ для исследуемой гофробалки и эквивалентной балки с плоской стенкой толщиной 7,4 мм составила 2,69 тс/м:

$$q_{cr \text{ ЛИРА}} = q \cdot \lambda_1 = 2,5 \cdot 1,076 = 2,69 \frac{\text{тс}}{\text{м}}. \quad (1)$$

Определённая таким образом толщина стенки эквивалентной балки обеспечивает равенство критических нагрузок, соответствующих первой форме потери общей устойчивости исследуемых балок как идеальных систем с учетом совместной работы всех элементов балок, включая опорные ребра, стенку, растянутый пояс.

Дальнейшие вычисления производились в соответствии с п. 8.4.1 СП 16.13330.2017 и Приложением Ж с определением критической нагрузки первой формы потери общей устойчивости

эквивалентной двутавровой балки с учетом неидеальностей.

При этом коэффициент α определён по формуле для сварных двутавровых балок с плоской стенкой в соответствии с Приложением Ж, формула Ж.5 СП 16.13330.2017:

$$\alpha = 8 \left(\frac{l_{ef} t_f}{h b_f} \right)^2 \cdot \left(1 + 0,5 \frac{h t^3}{b_f t_f^3} \right) = 8 \left(\frac{6200 \cdot 10}{343 \cdot 200} \right)^2 \cdot \left(1 + 0,5 \frac{343 \cdot 7,4^3}{200 \cdot 10^3} \right) = 8,81. \quad (2)$$

Здесь h – расстояние между центрами тяжести поясов, b_f – ширина полки, t_f – толщина полки, l_{ef} – расчётная длина балки (рис. 1).

Далее вычислен коэффициент ψ по формуле из таблицы Ж.1 СП 16.13330.2017:

$$\psi = 1,6 + 0,08\alpha = 2,304. \quad (3)$$

Далее определён коэффициент φ_1 :

$$\varphi_1 = \psi \frac{I_y}{I_x} \left(\frac{h}{l_{ef}} \right)^2 \frac{E}{R_y} = 3,84 \cdot \frac{1334,46}{14045,34} \cdot \left(\frac{343}{6200} \right)^2 \cdot \frac{206000}{240} = 0,575. \quad (4)$$

Здесь:

$$J_x = (2 \cdot (200 \cdot 10^3 / 12 + 200 \cdot 10 \cdot (333/2)^2) + 7,4 \cdot 343^3 / 12) / 1000 = 14045,34 \text{ см}^4,$$

$$J_y = (2 \cdot 10 \cdot 200^3 / 12 + 343 \cdot 7,4^3 / 12) / 10000 = 1334,46 \text{ см}^4$$
 – моменты инерции сечения эквивалентной балки с плоской стенкой относительно горизонтальной x и вертикальной y центральной осей сечения (см. рисунок 1);

$E = 206000$ МПа, $R_y = 240$ МПа – модуль упругости и расчетное сопротивление примененной стали (С245).

Так как полученный по формуле (3) коэффициент $\varphi_1 \leq 0,85$ то значение φ_b принято равным $\varphi_b = \varphi_1 = 0,575$.

Используя полученный коэффициент φ_b , по п. 8.4.1 СП 16.13330.2017 определена критическая нагрузка на эквивалентную двутавровую балку ($W_{cx} = J_x / (H/2) = 2599,5 / (26,1/2) = 199,2 \text{ см}^3 = 199200 \text{ мм}^3$, 3 – момент сопротивления сечения балки относительно горизонтальной центральной оси x):

$$\frac{M_x}{\varphi_b W_{cx} R_y \gamma_c} \leq 1 \Rightarrow M_{xkp} = \varphi_b W_{cx} R_y \gamma_c = q_{crCP16} * \frac{lef^2}{8} \Rightarrow q_{crCP16} = 8 * \frac{\varphi_b W_{cx} R_y \gamma_c}{lef^2},$$

$$q_{crCP16} = 8 * \frac{0,575 \cdot 795777 \cdot 240 \cdot 0,95}{6200^2} = 2,321 \frac{H}{MM} = 2,172 \frac{mc}{M}. \quad (5)$$

Равенство критических нагрузок идеальных гофробалки и эквивалентной балки с плоской стенкой дают право констатировать, что нагрузка $q_{cr,CP16}=2,172$ тс/м является искомой критической для исследуемой гофробалки нагрузкой по критерию «общая устойчивость», определенной по третьему способу.

Для сравнения была определена критическая нагрузка потери общей устойчивости по п. 20.6.3.11СП 294.1325800.2017 (второй спо-

соб). Полученное значение критической нагрузки составило 1,67 тс/м.

Далее аналогичным образом тремя способами были определены значения критических нагрузок первой формы потери общей устойчивости гофробалок сортамента Zetap с высотами стенок $h = 500$ мм (WTB-500), 750 мм (WTB-570), 1000 мм (WTB-1000), 1250 мм (WTB-1250), 1500 мм (WTB-1500).

Таблица 2

Результат расчётов гофробалок на общую устойчивость

Источник: составлено авторами.

Table 2

The result of calculations of welded I-beams for overall stability

Source: compiled by the authors.

№	Высота стенки, мм	Толщина плоской стенки эквивалентной двутавровой балки, мм	Критическая нагрузка по СП 16.13330.2017, тс/м (третий способ)	Значения по СП 16 принято за 100 %	Критическая нагрузка по СП 294.1325800.2017, тс/м (второй способ)	% от СП 16	Критическая нагрузка по Эйлеру (ПК «ЛИРА-САПР», тс/м (первый способ)	% от СП 16
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	333	7.4	2.17	100	1.67	77	2.69	124
2	500	7.4	2.79	100	2.48	89	3.31	119
3	750	7.9	3.86	100	3.69	96	4.38	113
4	1000	9	5.04	100	4.90	97	5.51	109
5	1250	10	6.24	100	6.12	98	6.66	107
6	1500	10.7	7.44	100	7.33	99	7.78	105

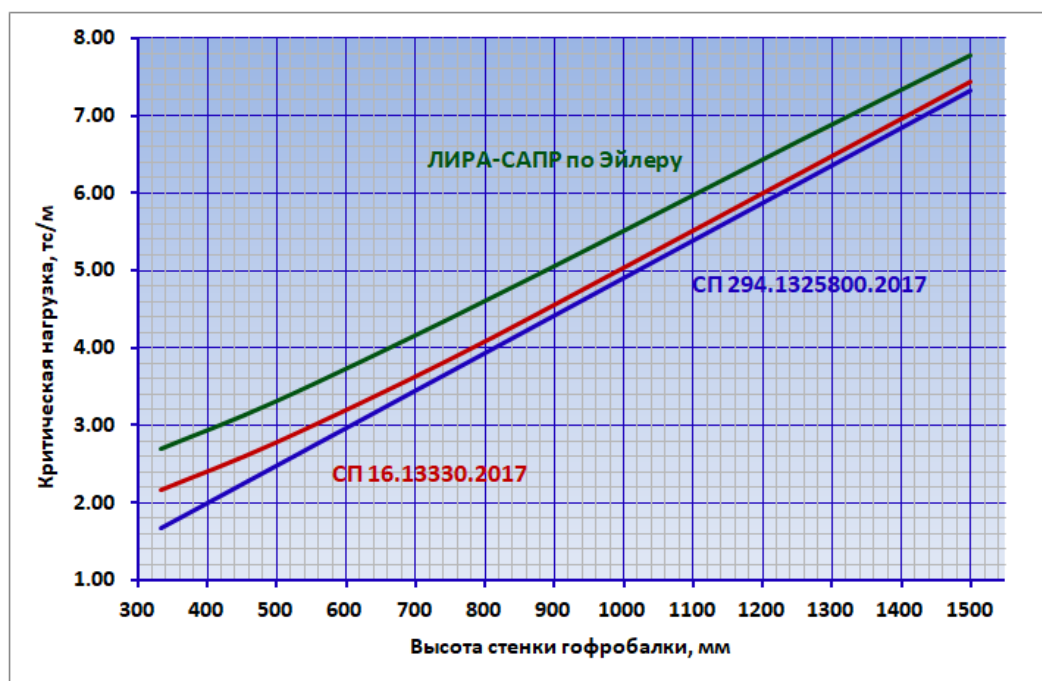


Рисунок 4 – Зависимость критических нагрузок гофробалок от высоты стенки
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of critical loads of corrugated rollers on the height of the wall
Source: compiled by the authors.

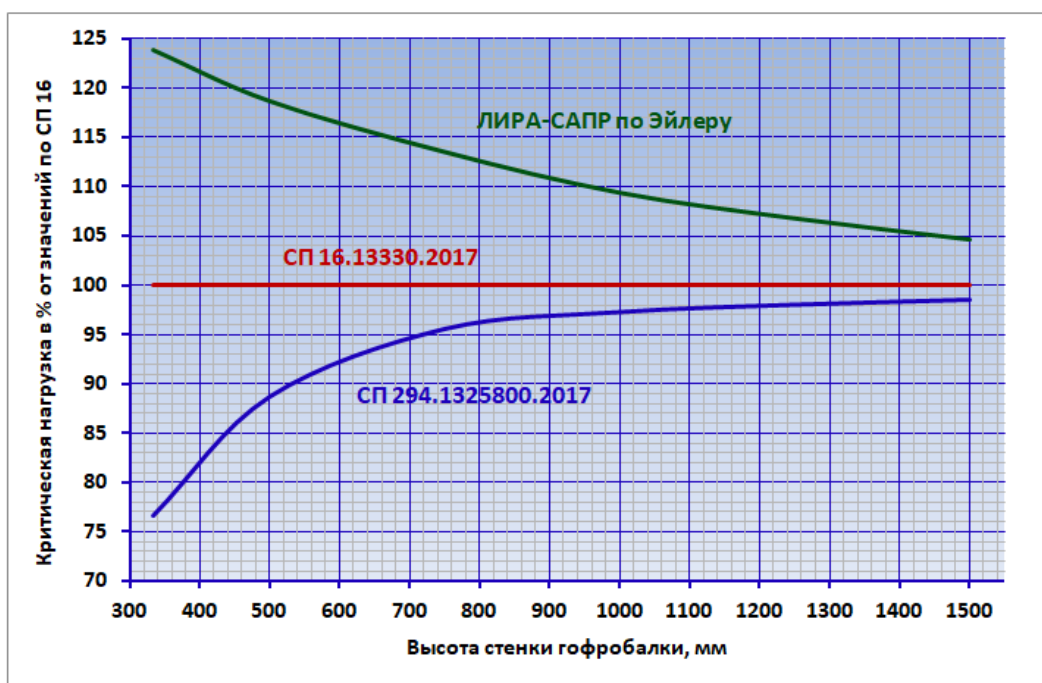


Рисунок 5 – Зависимость критических нагрузок, вычисленных в ЛИРА-САПР и СП 294 от высоты стенки в процентах относительно значений, вычисленных по СП 16.13330.2017
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of the critical load calculated in LIRA-CAD on the welded I-beam according to the criterion of general stability on the height of the wall relative to the value of СП 16.13330.2017
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчётов критических нагрузок тремя рассматриваемыми способами в тс/м для серии исследуемых гофробалок представлены в таблице 2 (колонки 4, 6, 8) и на рисунке 4.

Для оценки относительной разницы между значениями критических нагрузок тремя представленными методами результаты приведены к относительным величинам.

При этом за 100% приняты значения критических нагрузок, полученные третьим способом по СП 16.13330.2017 (колонки 4, 5).

В графическом виде результаты расчетов в относительных критических нагрузках в процентах приведены на рисунке 5 (колонки 7, 9 таблицы 2).

ОБСУЖДЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Анализ полученных результатов расчетов (см. таблицу 2, рисунки 4, 5) показывает, что учет совместной работы элементов гофробалок при расчете критической нагрузки общей устойчивости по СП 16.13330.2017 в сравнении с аналогичными расчетами по СП 294.1325800.2017 имеет существенное значение при малой высоте балок и нелинейно снижается по мере увеличения высоты балок.

Сформулированы основные выводы:

1. Для всех исследуемых гофробалок сортамента Zemaп наибольшие значения критических нагрузок по критерию «общая устойчивость» получены при расчёте на устойчивость по Эйлеру в ПК «ЛИРА-САПР». Это обусловлено тем, что при расчёте на устойчивость в ПК «ЛИРА-САПР» гофробалки представлены идеальными системами без учета несовершенств конструкций.

2. Для всех исследуемых гофробалок наименьшие значения критических нагрузок получены при расчёте по СП 294.1325800.2017. Это объясняется тем, что здесь вместо гофробалки на общую устойчивость рассчитывается отдельно взятый сжатый пояс как центрально сжатый стержень без учета совместной работы пояса со стенкой, опорными ребрами, растянутым поясом.

3. Для балок с высотой стенки 333 мм учет совместной работы сжатого пояса со стенкой, растянутым поясом, опорными ребрами показал максимальное увеличение критической нагрузки в сравнении с расчетом по СП 294.1325800.2017 на 24%. При увеличении

высоты балок до 900–1000 мм разница значений критической нагрузки, вычисленной с учетом совместной работы элементов балки и по СП 294.1325800.2017 нелинейно снижается до 3%. Это объясняется тем, что при выходе сжатого пояса из плоскости стенки все соединенные с поясом элементы балки подвергаются кручению относительно оси балки, а жесткость на кручение соединенных со сжатым поясом элементов балки снижается по мере увеличения высоты балки.

4. Для гофробалок с высотой 1000–1500 мм эта разница составляет менее 3%, что показывает возможность выполнения расчетов балок с поперечно-гофрированной стенкой сортамента Zemaп с такими высотами на общую устойчивость с достаточной для инженерных расчетов точностью по СП 294.1325800.2017.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Максимов Ю. С. Стальные балки с тонкой гофрированной стенкой – эффективный вид несущих конструкций производственных зданий / Ю. С. Максимов, Г. М. Остриков // Промышленное строительство. 1984. № 4. С. 10–11.
2. Дмитриева Т. Л. Использование балок с гофростенкой в современном проектировании / Т. Л. Дмитриева, Х. Уламбаяр // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2015. № 4(15). С. 132–139.
3. Брянцев А.А. Эффективность применения двутавров с гофрированными стенками в производственных зданиях / А. А. Брянцев, В. Э. Абсиметов, В. В. Лапин // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 3(54). С. 93–104.
4. Заборова Д. Д., Дунаевская Ю. П. Преимущества и особенности применения гофробалки в строительстве / Д. Д. Заборова, Ю. П. Дунаевская // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 7(22). С. 36–53.
5. Тишков Н. Л. Совершенствование конструкции стальной двутавровой балки с тонкой поперечно-гофрированной стенкой / Н. Л. Тишков, А. Н. Степаненко, И. Л. Шипелев, М. Б. Устименко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22, № 2. С. 104–111.
6. Остриков Г. М., Максимов Ю. С., Долинский В. В. Исследование несущей способности стальных двутавровых балок с вертикально гофрированной стенкой / Г. М. Остриков, Ю. С. Максимов, В. В. Долинский // Строительная механика и расчет сооружений. 1983. № 1. С. 68–70.
7. Denan F. The study of lateral torsional buckling behavior of beam with trapezoid web steel section by experimentally and finite element analysis / F. Denan, M.H. Osman, S. Saad // IJRRAS 2 (3). March. 2010. PP. 232-240.

8. Denan F. Nonlinear analysis of triangular web profile steel section under bending behavior / F. Denan, K. K. Shoong, N. S. Hashim, C. W. Ken // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2019. № 9. pp. 463–472.

9. Васильев А. Л. Прочные судовые гофрированные переборки / А. Л. Васильев, М. К. Глозман, Е. А. Павлинова, Н. В. Филиппо. Л.: Судостроение, 1964. 316 с.

10. Максимов Ю. С. Легкие стальные конструкции покрытий производственных зданий // *Экспресс информация*. Алма-Ата: КазЦНТИС Госстроя КазССР. 1987. 41 с.

11. Макеев С. А. Разработка методики уточненного расчета гофробалок на общую устойчивость / С. А. Макеев, Н. Г. Силина // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 12. С. 50–58.

12. Макеев С. А. Методика расчета сварных двутавровых балок с поперечно-гофрированной стенкой на общую устойчивость / С. А. Макеев, Н. Г. Силина, А. А. Комлев, С. А. Матвеев // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 2. С. 4–9.

REFERENCES

1. Maksimov Ju. S., Ostrikov G. M. Stal'nye balki s tonkoj gofrirovannoj stenкой – jeffektivnyj vid nesushhih konstrukcij proizvodstvennyh zdaniy [Steel beams with a thin corrugated wall – an effective type of load-bearing structures of industrial buildings]. *Promyshlennoe stroitel'stvo*. 1984; 4: 10–11. (In Russ.)

2. Dmitrieva T. L., Ulambajar H. Ispol'zovanie balok s gofrostenкой v sovremennom proektirovanii [The use of beams with a corrugated wall in modern design]. *Izvestija vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2015; 4(15): 132–139. (In Russ.)

3. Brjancev A. A., Absimetov V. Je., Lalin V. V. Jeffektivnost' primeneniya dvutavrov s gofrirovannymi stenkami v proizvodstvennyh zdaniyah [The effectiveness of the use of I-beams with corrugated walls in industrial buildings]. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij*. 2017; 3(54): 93–104. (In Russ.)

4. Zaborova D. D., Dunaevskaja Ju. P. Preimushhestva i osobennosti primeneniya gofro-balki v stroitel'stve [Advantages and features of the use of corrugated beams in construction]. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij*. 2014; 7(22):36–53. (In Russ.)

5. Tishkov N. L., Stepanenko A. N., Shipilev I. L., Ustimenko M. B. Sovershenstvovanie konstrukcii stal'noj dvutavrovoj balki s tonkoj poperechno-gofrirovannoj stenкой [Improving the design of a steel I-beam with a thin transverse corrugated wall]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2020; T. 22. no 2:104–111. (In Russ.)

6. Ostrikov G. M., Maksimov Ju. S., Dolinskij V. V. Issledovanie nesushhej sposobnosti stal'nyh dvutavrovых balok s vertikal'no gofrirovannoj stenкой [Investigation of the bearing capacity of steel I-beams with a vertically corrugated wall]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij*. 1983; 1: 68–70. (In Russ.)

7. Denan F., Osman M. H., Saad S. The study of lateral torsional buckling behavior of beam with trapezoid web steel section by experimentally and finite element analysis. *IJRRAS*. 2010. 2 (3). March: 232–240.

8. 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.

9. Vasil'ev A. L., Glozman M. K., Pavlinova E. A., Filippio N. V. *Prochnye sudovye gofrirovannye pereborки* [Durable ship corrugated bulkheads]. L.: Sudostroenie, 1964. 316 p. (In Russ.)

10. Maksimov Ju. S. Legkie stal'nye konstrukcii pokrytij proizvodstvennyh zdaniy [Light steel structures of coatings of industrial buildings]. *Jekspress informacija*. Alma-Ata: KazCNTIS Gosstroja KazSSR. 1987. 41 p. (In Russ.)

11. Makeyev S. A., Silina N. G. Razrabotka metodiki utochnennogo rascheta gofrobalk na obshhuyu ustojchivost' [Development of a methodology for the refined calculation of corrugated rollers for general stability]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; 12: 50–58. (In Russ.)

12. Makeyev S. A., Silina N. G., Komlev A. A., Matveyev S. A. Metodika rascheta svarynyh dvutavrovых balok s poperechno-gofrirovannoj stenкой na obshhuyu ustojchivost' [Method of calculation of welded I-beams with a transverse corrugated wall for general stability]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2022; 2: 4–9. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Макеев С. А. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследований, обоснование и структурирование методики расчета.

Силина Н. Г. Обзор основных методов расчёта гофробалок на общую устойчивость при поперечном изгибе, анализ результатов расчетов, формулировка выводов.

Ступин М. А. Описание материалов и методов для расчета исследуемых конструкций, проведение расчётов, анализ результатов.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Sergey A. Makeyev. Formation of the research direction, formulation of goals and objectives, designation of the research algorithm, justification and structuring of the calculation methodology.

Natalia G. Silina. Overview of the main methods of calculating corrugated rollers for general stability in transverse bending, analysis of calculation results, formulation of conclusions.

Mikhail A. Stupin. Description of materials and methods for the calculation of the studied structures, calculations, analysis of the results.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Александрович Макеев – д-р техн. наук, доц, SPIN-код: 6262-3790.

Наталья Геннадьевна Силина – исполнительный директор, SPIN-код: 7426-6233.

Михаил Александрович Ступин – ведущий инженер.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Makeyev – Dr. of Sci., Associate Professor, SPIN-код: 6262-3790.

Natalia G. Silina – Executive Director, SPIN-код: 7426-6233.

Mikhail A. Stupin – Leading Engineer.