

УДК 624.014

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГОФРО-БАЛКИ В КАЧЕСТВЕ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ

**М.С. Захаркевич**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

**Аннотация.** В настоящее время основное внимание в исследованиях металлических конструкций уделяется разработке высокоэффективных конструктивных решений, обеспечивающих достаточную прочность при минимальном весе. Перфорированные или гофрированные конструкции используются для уменьшения количества металла, используемого в элементах, работающих на изгиб. Однако, ограниченное исследование гофрированных балок создает проблему для их широкого применения, несмотря на их потенциал в современном строительстве. В силу сказанного, цель данной работы заключается в обосновании применения гофро-балок и определении наиболее оптимальных параметров сечения конструкции покрытия. В данной статье приводится основное понятие гофрированных конструкций, включая их виды, основные достоинства, и недостатки. Для обоснования применения гофро-балки приведено сравнение ее параметров со сварной балкой двутаврового сечения с плоской стенкой. Исследование общей устойчивости и максимального прогиба при загрузке условной нагрузкой проводилось с помощью ПК LIRA soft. Была разработана численная модель гофро-балки и балки с плоской стенкой в ПК LIRA soft. Полученные данные показывают, балки с гофрированной стенкой имеют ряд достоинств по сравнению с балками с плоской стенкой.

**Ключевые слова:** двутавры с гофрированной стенкой, рамные каркасы, гофро-балка, применение гофрированных балок, современное строительство, численное моделирование, оптимизация сечения, металлоемкость, устойчивость.

**Ссылка для цитирования:** Захаркевич М.С. Обоснование применения гофро-балки в качестве несущей конструкции покрытия // Инженерные исследования. 2023. №2 (12). С. 3-10. EDN: GEXRPG

## JUSTIFICATION OF THE USE OF A SIN-BEAM AS A SUPPORTING STRUCTURE OF THE COATING

**M.S. Zaharkevich**

*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)*

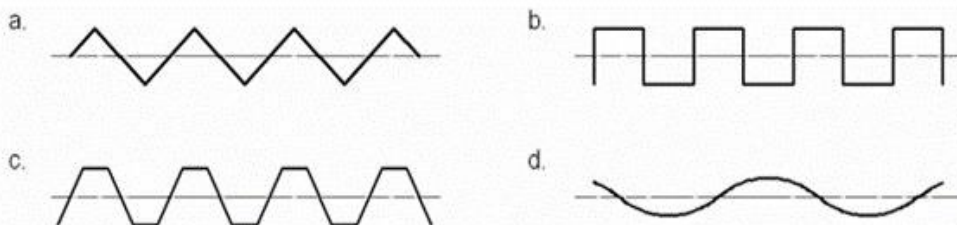
**Abstract.** Currently, the main attention in the research of metal structures is paid to the development of highly efficient structural solutions that provide sufficient strength with minimal weight. Perforated or corrugated structures are used to reduce the amount of metal used in bending elements. However, the limited study of corrugated beams poses a problem for their widespread use, despite their potential in modern construction. By virtue of the above, the purpose of this work is to substantiate the use of corrugated beams and determine the most optimal parameters of the section of the coating structure. This article provides the basic concept of corrugated structures, including their types, main advantages and disadvantages. To justify the use of a corrugated beam, a comparison of its parameters with a welded beam of I-beam section with a flat wall is given. The study of the overall stability and maximum deflection during loading with a conditional load was carried out using a LIRA soft PC. A numerical model of a corrugated beam and a beam with a flat wall was developed in the LIRA soft PC. The data obtained show that I-beams with a corrugated wall have a number of advantages compared to beams with a flat wall.

**Keywords:** I-beams with a corrugated wall, frame frames, sin-beam, the use of corrugated beams, modern construction, numerical modeling, optimization of the section, metal consumption, stability.

**For citation:** Zaharkevich M.S. Justification of the use of a sin-beam as a supporting structure of the coating // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.2 (12). Pp. 3-10. EDN: GEXRPG

## ВВЕДЕНИЕ

Гофрированная балка представляет собой составную конструкцию, состоящую из поясов и изогнутой тонкой металлической стенки [1-3]. Существует множество форм стеновых гофр, однако наиболее часто применяемыми являются гофры треугольной, трапециевидной, прямоугольной и волнообразной формы. (рис.1).



**Рис. 1.** Виды гофрирования стенки: а - треугольное; б - прямоугольное; с - трапецидальное; d - синусоидальное [3]  
**Fig. 1.** Types of wall corrugation: a - triangular; b - rectangular; c - trapezoidal; d - sinusoidal [3]

Стенка балки воспринимает поперечную силу, поэтому прочность сечения по касательным напряжениям обеспечивается при малой толщине стенки. Однако, толщину стенки увеличивают, для выполнения условия местной устойчивости. Это приводит к увеличению металлоемкости и стоимости конструкции. Применения гофрирования в конструкциях, работающих на изгиб, позволяет добиться прочности, и устойчивости с меньшим использованием металла [3].

Основные достоинства гофро-балок перед обычными двутавровыми балками:

- повышенная жесткость по сравнению с конструкциями с плоскими стенками эквивалентных размеров. [4-6];

- меньший расход стали и, как следствие, малый собственный вес [7];

- трудозатраты на 12-15 % меньше, чем при выполнении составных двутавров с плоской стенкой [8].

Если говорить о недостатках, то можно отметить такие пункты, как:

- высокая стоимость оборудования для производства таких балок;

- использование двутавров с гофрированной стенкой в качестве колонн нецелесообразно из-за их меньшей прочности на сжатие.;

- отсутствие сведений о проектировании таких балок в нормативной литературе [9].

В строительной отрасли двутавровые балки с гофрированной стенкой используются для возведения различных сооружений, таких как производственные цеха, сельскохозяйственные объекты, мосты. В основном, их применяют в строительстве каркасных сооружений, в качестве несущих конструкций покрытия. Не рекомендуется применять двутавры с гофрированной стенкой в качестве конструкций, работающих на сжатие и растяжение, вследствие возникновения местных деформаций смятия в стенке [3]. Важно отметить использование металлических гофрированных конструкций в гидротехнических сооружениях [2].

Объектом данного исследования является стальная гофро-балка. Предметом исследования является обоснование ее применения в качестве конструкции покрытия.

Цель исследования заключается в определении параметров и приведении алгоритма обоснования применения гофро-балок в строительстве. Таким образом, задачи исследования представляют собой:

- подбор сечения гофро-балки, аналогичной по несущей способности со сварной балкой с плоской стенкой;

- определение параметров для сравнения двух вариантов конструкций;

- численное моделирование и расчет двух конструкций;

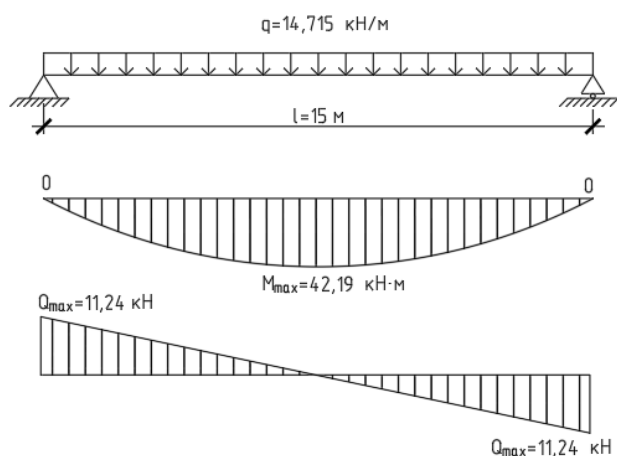
- сравнение и анализ полученных результатов;

- оценка и возможность применения данного алгоритма исследования гофро-балок в строительстве.

## ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

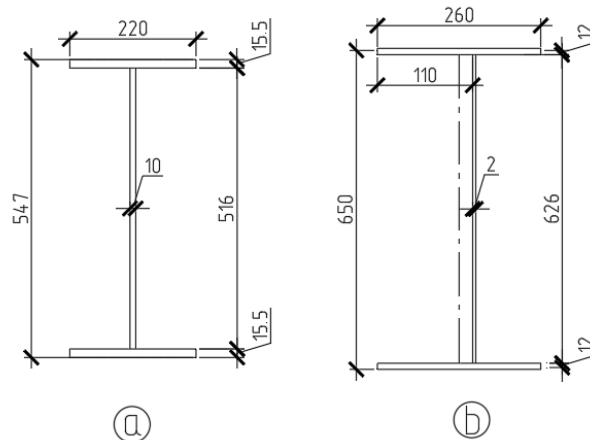
Для обоснования применения гофро-балки сравним ее параметры с двутавровой балкой составного сечения. Подбор сечения балки с плоской стенкой был выполнен в соответствии с требованиями СП 16.13330.2017. Гофро-балка была рассчитана по методическим пособиям [10, 11]. Габариты сечения гофро-балки были определены в соответствии с каталогом, приведенным на сайте ООО «А ГРУПП

Стальные Конструкции»<sup>1</sup>. Гофро-балка подобранного сечения является аналогом сварной балки по несущей способности, поэтому высота стенки гофро-балки больше. На рис.2 и рис.3 приведены расчетная схема балки, эпюры изгибающих моментов и перерезывающих сил, а также габариты подобранных сечений.



**Рис. 2.** Расчетная схема балки, эпюры изгибающих моментов и перерезывающих сил

**Fig. 2.** Design diagram of the beam, diagram of bending moments and shear forces



**Рис. 3.** Габариты сечений: а - двутавр с плоской стенкой; б - двутавр с гофрированной стенкой

**Fig. 3.** Dimensions of sections: а - I-beam with a flat wall; б - I-beam with a corrugated wall

Нагрузка от пирога кровли, действующая по всей длине балки, равна  $q=14,715$  кН/м. В качестве материала изготовления конструкции покрытия выбрана сталь С245, расчетное сопротивление которой равно  $R_y=24$  кН/см<sup>2</sup>.

Таким образом, было определено что для данной конструкции необходимый момент сопротивления сечения должен быть равен  $W=1793,79$  см<sup>3</sup>, а требуемый момент инерции сечения  $I=60271,429$  см<sup>4</sup>. Максимально допустимый прогиб для данной длины балки равен 66,66 мм. В таблице 1 представлены параметры подобранных сечений. На рисунке 3 показаны габариты поперечных сечений балок.

**Таблица 1.** Параметры подобранных профилей

**Table 1.** Parameters of selected profiles

№	Параметр	Балка с плоской стенкой	Гофро-балка
1	Высота стенки, мм	516	626
2	Толщина стенки, мм	10	2
3	Ширина полки, мм	220	260
4	Толщина полки, мм	15,5	12
5	Площадь сечения, см <sup>2</sup>	124,74	74,92
6	Момент инерции сечения, см <sup>4</sup>	62 784,45	63 300
7	Запас прочности, кН·м	625	624
8	Масса 1 м, кг	97,9	60,8

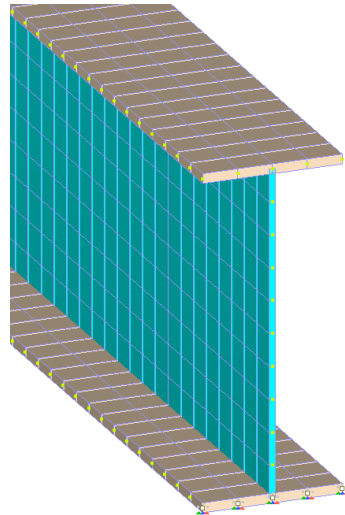
Для обоснования применения гофро-балки в качестве конструкции покрытия был проведен численный расчет в ПК Lira Soft. Для сравнения двух вариантов профилей были выбраны следующие параметры:

- 1) значение прогиба в центре пролета;
- 2) значение коэффициента запаса устойчивости, который показывает во сколько раз критическая сила по Эйлеру превышает 14,715 кН/м;
- 3) анализ форм потери устойчивости.

<sup>1</sup> Гофро-балка. Общее описание. Основные преимущества. Технические характеристики. [Электронный ресурс]. - URL: <https://agsc.ru/upload/iblock/b2a/Gofrobalka.pdf?ysclid=1l3nafoidh702423747> (дата обращения: 10.08.2023)

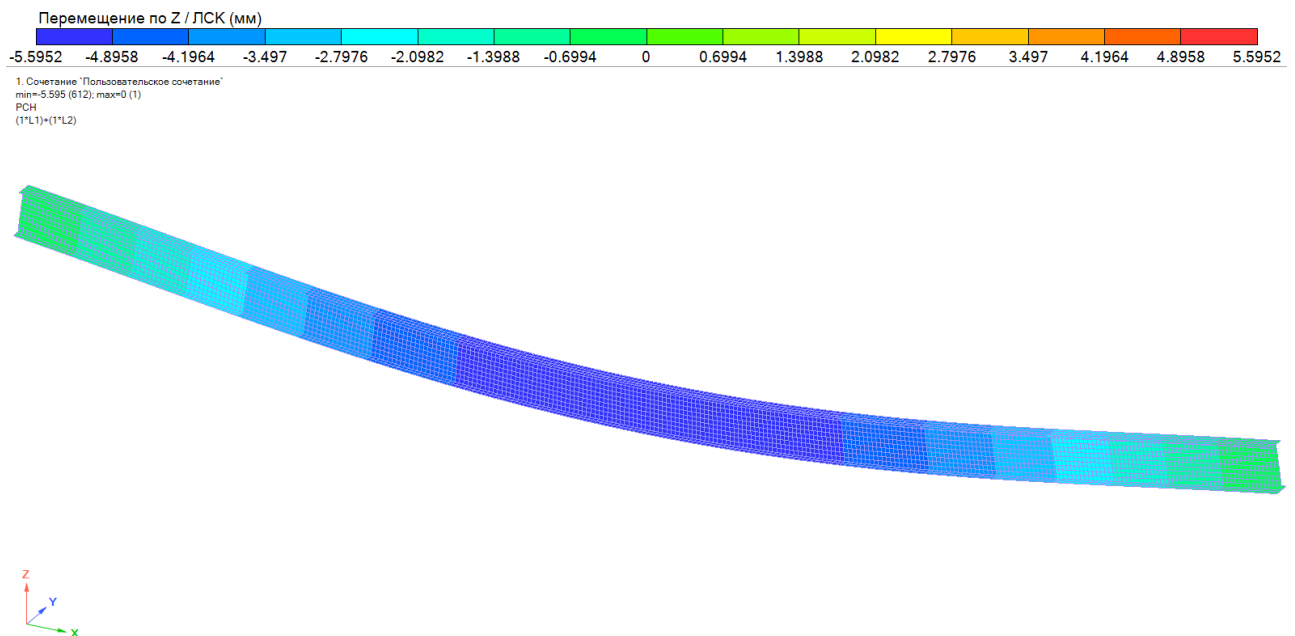
### РАСЧЕТ БАЛКИ С ПЛОСКОЙ СТЕНКОЙ

Численная модель шарнирно-опертой балки с плоской стенкой состоит из пластинчатых конечных элементов. Шаг сетки конечных элементов равен 5 см. В расчетной схеме узлов 5719, элементов 5400. Расчет был выполнен в упругой постановке задачи. Фрагмент расчетной модели сварной балки приведен на рис. 4.



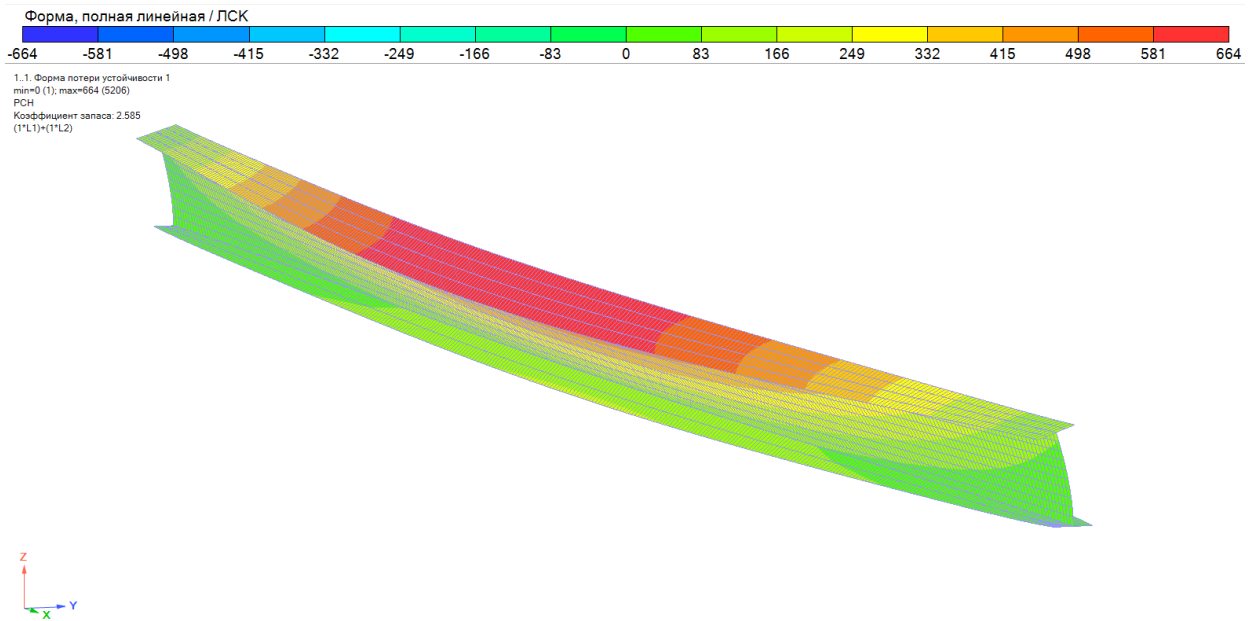
**Рис. 4.** Фрагмент численной модели балки с плоской стенкой  
**Fig. 4.** A fragment of a numerical model of a beam with a flat wall

Далее, проведем расчет на сочетания нагрузок от собственного веса балки и внешней нагрузки. На рис. 5 представлены перемещения по оси Z, максимальный прогиб в центре пролета равен 5,595 мм.



**Рис. 5.** Перемещения по оси Z в балке с плоской стенкой.  
**Fig. 5.** Movement along the Z axis in a beam with a flat wall.

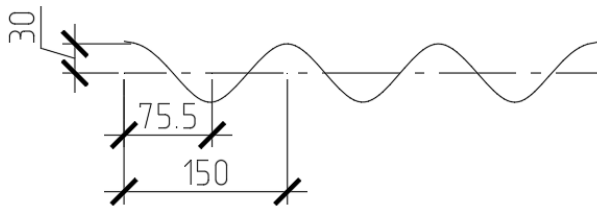
Коэффициент запаса при расчете на общую устойчивость равен 2,585. На рис. 6 приведена первая форма потери устойчивости.



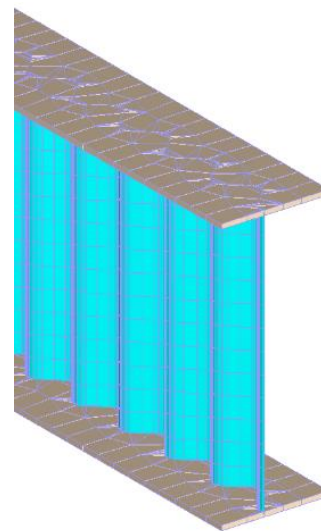
**Рис. 6.** Первая форма потери устойчивости балки с плоской стенкой  
**Fig. 6.** The first form of loss of stability of a beam with a flat wall

#### РАСЧЕТ ГОФРО-БАЛКИ

Численная модель шарнирно-опертой гофро-балки состоит из пластинчатых конечных элементов. Шаг сетки конечных элементов равен 5 см. В расчетной схеме 24749 узлов и 27711 элементов. Расчет был выполнен в упругой постановке задачи. Геометрические характеристики гофрирования стенки и фрагмент расчетной модели приведены на рис.7 и рис.8.

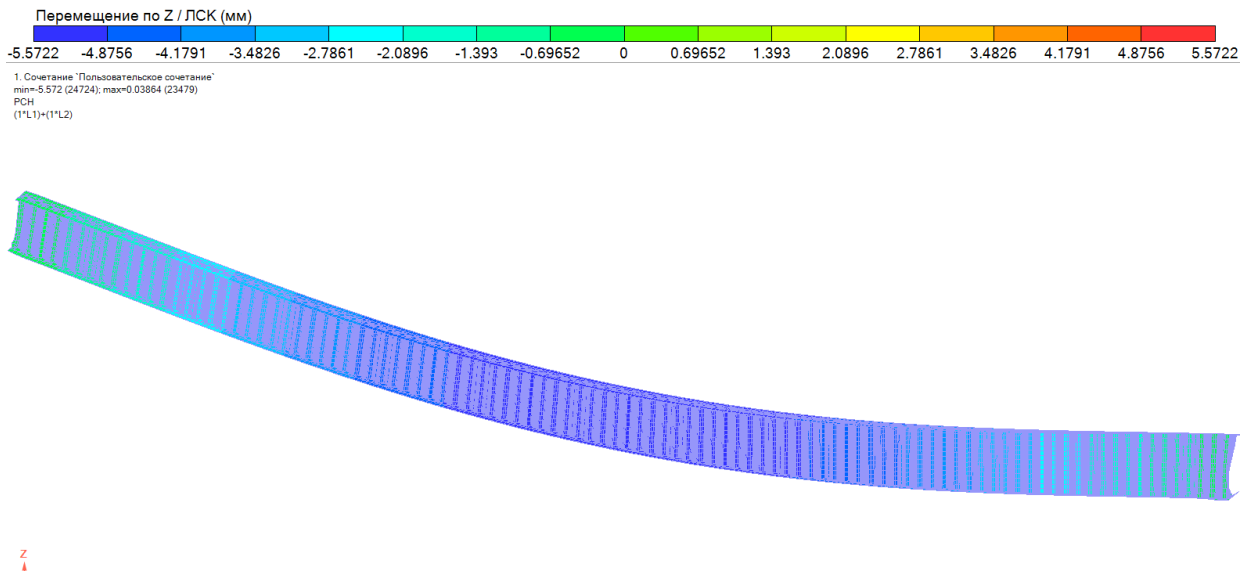


**Рис. 7.** Геометрические характеристики гофрирования стенки  
**Fig. 7.** Geometric characteristics of wall corrugation



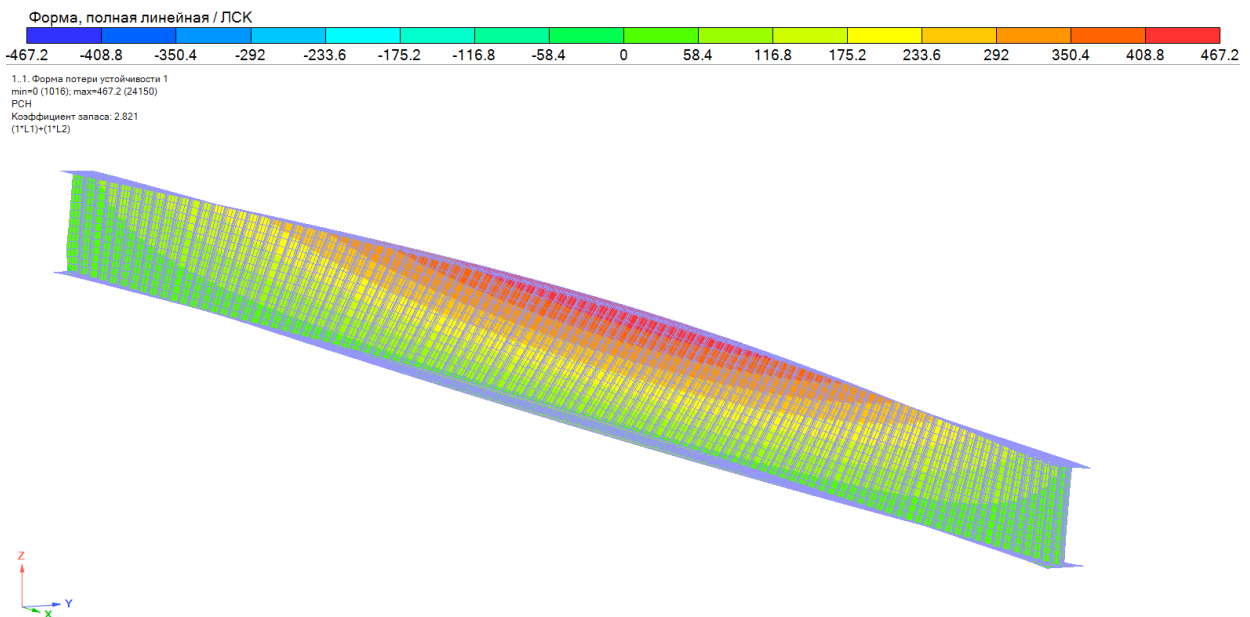
**Рис. 8.** Фрагмент численной модели гофро-балки  
**Fig. 8.** A fragment of a numerical model of a sin-beam

После проведения статического расчета балки при загрузке нагрузкой от конструкции покрытия и снега были получены результаты прогиба по оси  $Z$  с максимальным значением в центре пролета 5,572 мм (рис. 9).



**Рис. 9.** Перемещения по оси Z в гофро-балке.  
**Fig. 9.** Movement along the Z axis in a sin-beam

Коэффициент запаса при расчете на местную устойчивость равен 2,821. Первая форма потери устойчивости гофро-балки приведена на рис. 10.



**Рис. 10.** Первая форма потери устойчивости гофро-балки  
**Fig. 10.** The first form of loss of stability of a sin-beam

### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчетов для обоснования применения гофро-балки в качестве конструкции покрытия приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты расчета  
**Table 2.** Calculation results

№	Параметр	Балка с плоской стенкой	Гофро-балка	Процентное соотношение, %
1	Максимальный прогиб, мм	5,595	5,572	-0,41
2	Коэффициент запаса устойчивости	2,585	2,821	+8,36
3	Металлоемкость балки, кг	1 468,5	912	-38

Сравнение результатов расчета показало, что при пролете равном 15 м применение гофро-балки в качестве несущей конструкции покрытия целесообразно, так как:

- значение прогиба в центре балки уменьшилось на 0,41 %;
- коэффициент запаса устойчивости увеличился на 8,36 %;
- вес конструкции уменьшился на 38%.

Однако, стоит отметить необходимость увеличения высоты стенки гофро-балки и ширины полки, для достижения необходимого запаса прочности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты данной работы:

- был выполнен подбор аналогичных по несущей способности профилей двутавра с плоской и гофрированной стенкой;
- определены параметры для сравнения двух профилей;
- было выполнено численное моделирование и расчет двух вариантов балок для получения значений параметров сравнения;
- анализ полученных данных показал, что применение гофро-балки в качестве несущей конструкции покрытия целесообразно.

С помощью данного алгоритма действий было доказано, что применение гофро-балок целесообразно, особенно в тех случаях, когда необходимо существенно снизить собственный вес здания, передаваемый на фундамент, или в целях экономии денежных средств.

При оптимизации сечения гофро-балки, была выяснена необходимость увеличения высоты стенки и ширины полки, в целях обеспечения необходимой несущей способности. Следовательно, можно сделать вывод о том, что проектирование зданий и сооружений с использованием гофрированных конструкций позволит уменьшить металлоемкость и повысить устойчивость конструкций, работающих на изгиб, однако, применение таких конструкций требует особого обоснования, ведь их использование целесообразно не во всех случаях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. № 6. С. 676–687. DOI:10.22227/1997-0935.2021.6.676-687. EDN: XDBUII.
2. Баязитова Ю.А. Случаи применения рамных каркасов из двутавров с гофрированной стенкой в современном строительстве // АЛЛЕЯ НАУКИ. 2020. № 45(6). С. 264–277. EDN: STXPLQ.
3. Дмитриева Т.Л., Уламбаяр Х. Использование балок с гофростенкой в современном проектировании // Технические науки. Строительство. 2015. № 4(15). С. 132–138. EDN: VHDRER.
4. Соболев Ю.В., Рыбкин И.С. Конструкционный анализ гофрированных металлических изгибаемых элементов // Вестник МГСУ. 2007. № 3. С. 144–148.
5. Серпик И.Н., Балабин П.Ю. Снижение материалоемкости стальных рам без сокращения резерва несущей способности конструкций // Строительство и реконструкция. 2015. № 62(6). С. 66–74. EDN: VBTQQV.
6. Мартынюк А.Я., Нилов А.А., Лазнюк М.В. Сварные соединения элементов двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой // Металлические конструкции. 2008. С. 237–244.
7. Брянцев А.А., Абсиметов В.Э., Лалин В.В. Эффективность применения двутавров с гофрированными стенками в производственных зданиях // Строительство Уникальных Зданий И Сооружений. 2017. № 54(3). С. 93–104. DOI:10.18720/CUBS.54.8. EDN: YSPKZR.
8. Erdal F., Tunca O., Doğan E. Optimum Design of Composite Corrugated Web Beams Using Hunting Search Algorithm // International Journal Of Engineering & Applied Sciences. 2017. № 2(9). P. 156–156. DOI:10.24107/ijeas.323633.
9. Erdal F., Tunca O., Taş S., Carbas S. Experimentally Tests of Optimally Designed Composite Corrugated Web Beams // 3rd International Conference on Mechanics of Composites. 2017. № April 2022. P. 41. DOI:10.15651/978-88-938-5029-2.
10. Степаненко, А. Н. Стальные двутавровые стержни с волнистой стенкой: учебное пособие / А.Н. Степаненко. – Хабаров. гос. техн. ун-та, 1999. – 115 с
11. Проектирование металлических конструкций: учебное пособие / С.М. Тихонов, В.Н. Алехин., З.В. Беляева [и др.]. Санкт-Петербург: Изд-во Перо, 2020 468 с. - ISBN:9785001714392.

### ОБ АВТОРАХ

**Мария Сергеевна Захаркевич** – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: [mariazaharkevich@yandex.ru](mailto:mariazaharkevich@yandex.ru)

### ABOUT THE AUTHORS

**Maria S. Zaharkevich** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: [mariazaharkevich@yandex.ru](mailto:mariazaharkevich@yandex.ru)