

УДК 624.014

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОФРО-БАЛОК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕРОВ ГОФРИРОВАНИЯ СТЕНКИ

**М.С. Захаркевич**

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

**Аннотация.** Металлоемкость является одной из важных задач в современном строительстве, поэтому в 30-х годах прошлого века были предложены первые варианты гофрированных конструкций, которые позволяют снизить расход стали, не теряя при этом прочностных характеристик. В 1960-е годы гофрированные балки стали частью стальных каркасов и использовались в европейских городах. Позже, в 1980-х годах, эти балки стали широко применяться для строительства автомобильных мостов в Японии и Европе. В данной работе приводится исследование напряженно-деформированного состояния двутавровой стальной балки с тонкой поперечно-изогнутой стенки в зависимости от размеров гофрирования стенки. Расчет балок при различных вариантах гофрирования был проведен численным методом конечных элементов с помощью ПК «Ansys». Сравнение результатов расчетов гофро-балок при разных параметрах гофрирования показало, что наибольшего эффекта увеличения прочности и общей устойчивости можно добиться при изменении высоты гофра. При заданных исходных данных оптимальным является соотношение  $f/l=0,2$ , так как при нем соблюдается достаточное обеспечение запаса свойств первой и второй групп предельных состояний.

**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. Напряженно-деформированное состояние гофро-балок в зависимости от размеров гофрирования стенки // Инженерные исследования. 2023. №4 (14). С. 34-42. EDN: PJESPH.

## STRESS-STRAIN STATE OF CORRUGATED BEAMS DEPENDING ON THE SIZE OF THE WALL CORRUGATION

**M.S. Zaharkevich**

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

**Abstract.** Metal intensity is one of the important challenges in modern construction, so in the 1930s the first variants of corrugated structures were proposed to reduce steel consumption without losing strength properties. In the 1960s, corrugated beams became part of steel frames and were used in European cities. Later, in the 1980s, these girders were widely used for highway bridge construction in Japan and Europe. This paper presents a study of the stress-strain state of I-beam steel girder with thin transversely curved wall as a function of wall corrugation dimensions. The calculation of beams at different variants of corrugation was carried out by numerical finite element method with the help of PC "Ansys". Comparison of the results of calculations of corrugated beams at different parameters of corrugation showed that the greatest effect of increasing the strength and overall stability can be achieved by changing the height of the corrugation. At the given initial data the ratio  $f/l=0,2$  is optimal, as it provides sufficient safety margin of properties of the first and second groups of limit states.

**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. Stress-strain state of corrugated beams depending on the size of the wall corrugation // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.4 (14). Pp. 34-42. EDN: PJESPH.

## ВВЕДЕНИЕ

Объектом данного исследования является стальная двутавровая балка с тонкой поперечно-гофрированной стенкой.

Впервые варианты гофрированных конструкций были предложены в 30-х годах прошлого века в Уральском политехническом институте [1]. Применение и расчет гофрированных профилей были предложены такими учеными как В.Н. Горновым, Г.А. Ажермачевым, В.Ф.Кириленко [2], Я.И. Ольковым, А.Н. Степаненко [3] и др.

Важной задачей при конструировании гофро-балок является подбор наиболее оптимальных параметров гофрирования конструкции. Например, в работе А. Н. Степаненко [3], приведено оптимальное соотношение высоты полуволны гофра к его длине, равное  $\frac{f}{l} = 0,2 \dots 0,6$ . Это соотношение определено математическим трехфакторным экспериментом с использованием метода Д. Брандона, как наиболее значимое при подборе сечения.

В настоящее время наибольший вклад в исследование расчетов гофрированных конструкций вносит ЦНИИПСК им. Мельникова. Под руководством С.А. Макеева проведено множество экспериментов, на которых основаны численные исследования гофро-балок. Так, в статье, где авторами были С.А. Макеев, Н.Г. Силина, А.А. Комлев [4] представлена конструкция стенда и методика определения общей устойчивости гофро-балок. С помощью этого экспериментального стенда были доказаны значения критических нагрузок общей потери устойчивости, полученных численными методами.

В работе, автором которой является Н.Г.Силина [5], показано влияние высоты гофр стенки балки на общую устойчивость гофро-балок с синусоидальной стенкой.

Стоит отметить, что в большинстве написанных работ авторы подтверждают снижение металлоёмкости и повышение прочностных характеристик конструкций при применении гофрированных профилей [6-12].

Таким образом, предметом данного исследования является напряженно-деформированное состояние гофро-балок при различных соотношениях гофрирования стенки.

Цель исследования заключается в определении оптимальных параметров гофрирования стенки в зависимости от напряженно-деформированного состояния балки, которое определено с помощью численного метода конечных элементов.

Задачи исследования представляют собой:

- моделирование стальной балки с тонкой поперечно-гофрированной стенкой в ПК «Ansys».
- определение напряженно-деформированного состояния гофро-балок, в зависимости от высоты полуволны гофра;
- определение напряженно-деформированного состояния гофро-балок, в зависимости от длины полуволны гофра;
- сравнение и анализ полученных результатов;
- заключение и выбор оптимальных параметров гофрирования стенки.

## РАСЧЕТНАЯ СХЕМА И ПАРАМЕТРЫ СЕЧЕНИЙ

На рис. 1 представлена принятая расчетная схема, которая представляет собой шарнирно-опертую балку длиной  $l=6$  м с равномерно-распределенной нагрузкой, равной  $q=8,4$  кН/м. В качестве материала изготовления конструкции выбрана сталь С255 с расчетным сопротивлением  $R_y=250000$  кН/м<sup>2</sup>.

Так как сечение балки переменное по длине, необходимо выделить два наиболее характерных сечения:

- сечение №1 – проходящее по вершине гофра;
- сечение №2 – проходящее в месте совмещения оси стенки с осью балки.

Параметры сечений показаны на рис. 2, размеры приведены в таблицах 1-2.

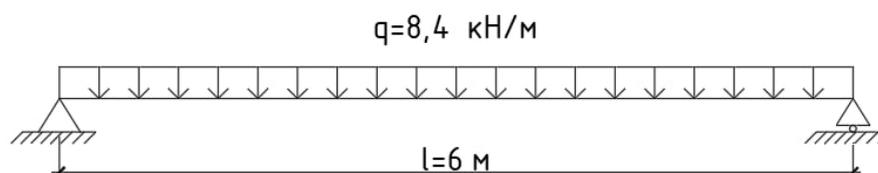
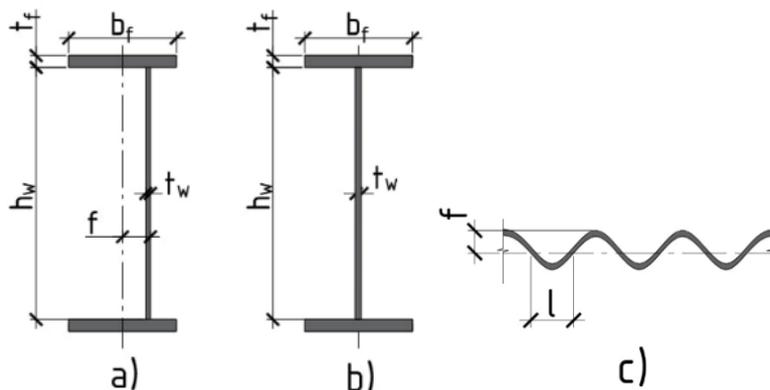


Рис. 1. Расчетная схема  
Fig. 1. Design scheme



**Рис.2.** Параметры профиля: а - сечение №1; б - сечение №2; в - параметры гофрирования  
**Fig. 2.** Profile parameters: a - section №1; b - section №2; c - corrugation parameters

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТенок И ЖЕСТКОСТИ ГОФРО-БАЛОК

Устойчивое состояние волнистой стенки можно описать известным в теории упругости тонкостенных пластин условием (1):

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_{cr,0}} + \left( \frac{\tau_s}{\tau_{cr,0}} \right)^2 \leq 1 \quad (1)$$

где  $\sigma_s$  - среднее по высоте рассматриваемого участка стенки сжимающее напряжение, вызванное местной погонной нагрузкой (2):

$$\sigma_s = \frac{q}{2 \cdot t_w} = \frac{8,4}{2 \cdot 0,002} = 2100 \frac{\kappa H}{M^2} = 2,1 МПа \quad (2)$$

$\tau_s$  – действующее на участке стенки сдвигающее напряжение, вызываемое поперечным усилием;

$\sigma_{cr,0}$  и  $\tau_{cr,0}$  - критические напряжения «общей» устойчивости волнистой стенки, зависящие от  $D_x$ ,  $D_z$ ,  $D_{xz}$  – жесткостей гофрированной пластинки по направлениям сторон и приведенной ее жесткости;

Для практического использования удобно представить в виде (3-4):

$$\sigma_{cr,0} = k_{\sigma,0} \cdot E \cdot \left( \frac{t_w}{h_w} \right)^2 \quad (3)$$

где  $k_{\sigma,0}$  – коэффициент влияния размеров гофров на величину критических сжимающих напряжений;

$E$  – модуль упругости стали ( $E = 206000$  МПа);

$t_w$  – толщина стенки;

$h_w$  – высота стенки.

$$\tau_{cr,0} = k_{\tau,0} \cdot E \cdot \left( \frac{t_w}{h_w} \right)^2 \quad (4)$$

где  $k_{\tau,0}$  – коэффициент влияния размеров гофров на величину критического сдвигающего усилия;

$E$  – модуль упругости стали ( $E = 206000$  МПа);

$t_w$  – толщина стенки;

$h_w$  – высота стенки.

Жесткость балки регламентируется его максимальным прогибом от нормативных нагрузок, который не должен превышать предельного, равного (5):

$$f_{lim} = \frac{L}{250} = \frac{6}{250} = 0,024 \text{ м} = 24 \text{ мм} \quad (5)$$

где  $L$  – длина балки.

НДС ГОФРО-БАЛОК ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ВЫСОТЫ ПОЛУВОЛНЫ ГОФРА

На рис. 3 представлен общий вид численных моделей шарнирно-опертых балок, с разной высотой полуволны гофра. Шаг сетки конечных элементов сетки равен 20 мм (рис. 4). Расчет был выполнен в упругой постановке задачи.

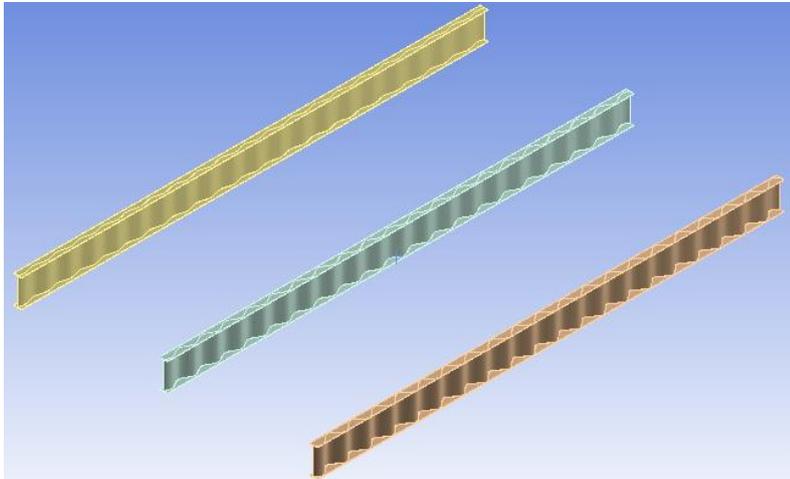


Рис. 3. Общий вид балок  
 Fig. 3. General view of the beams

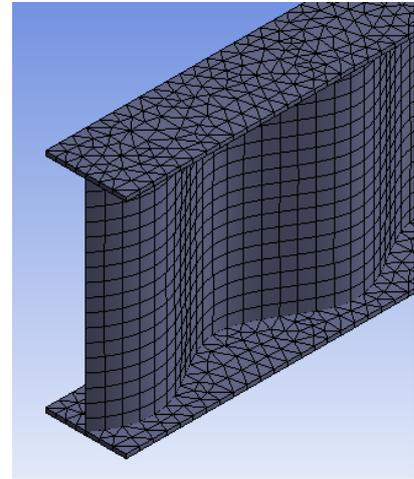


Рис. 4. Фрагмент численной модели  
 Fig. 4. Fragment of the numerical model

Таблица 1. Параметры сечений при варьировании высоты полуволны гофра.  
 Table 1. Sections parameters when varying the height of the half-wave of the corrugation

| № | Высота полуволны гофра $f$ , мм | Длина полуволны гофра $l$ , мм | Соотношение высоты полуволны гофра к его длине $f/l$ | Высота стенки $h_w$ , мм | Толщина стенки $t_w$ , мм | Ширина полка $b_f$ , мм | Толщина полка $t_f$ , мм |
|---|---------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 15                              | 150                            | 0,1  | 350                      | 2                         | 120                     | 6                        |
| 2 | 30                              |                                | 0,2  |                          |                           |                         |                          |
| 3 | 45                              |                                | 0,3  |                          |                           |                         |                          |

Наибольшие значения нормальных напряжений наблюдаются в образце с высотой полуволны гофра  $f=15$  мм в пролетном сечении №1 в точке наибольшего свеса полки (рис.5), Максимальное значение касательных напряжений наблюдается в опорном сечении в образце с  $f=15$  мм (рис.6).

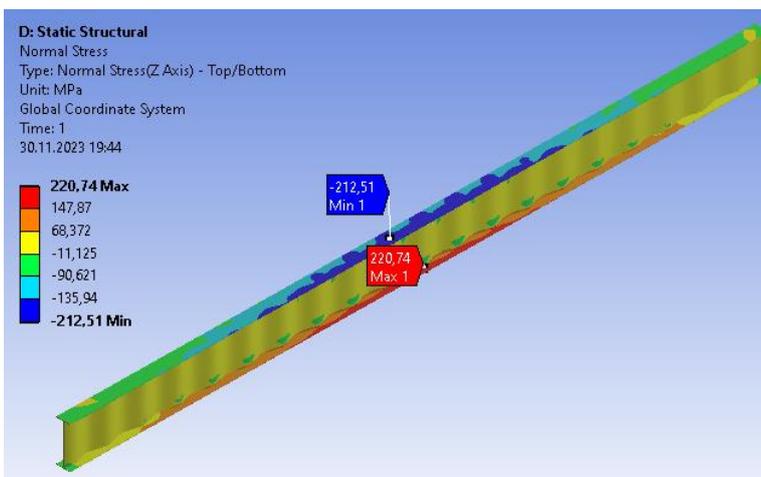


Рис. 5. Максимальные и минимальные нормальные напряжения  $\sigma_z$  в пролетном сечении с наибольшим свесом  
 Fig. 5. Maximum and minimum normal stresses  $\sigma_z$  in the span section with the greatest overhang

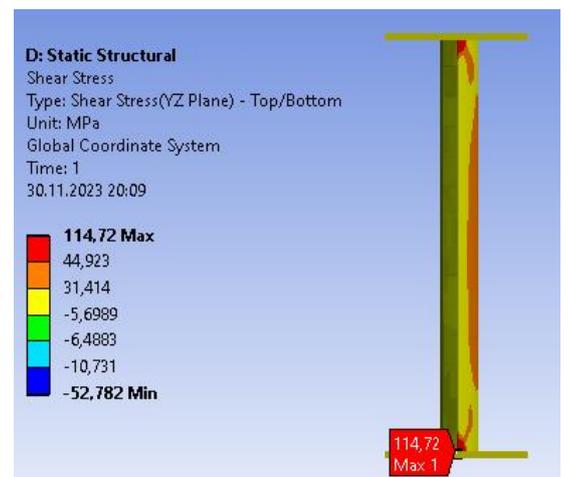
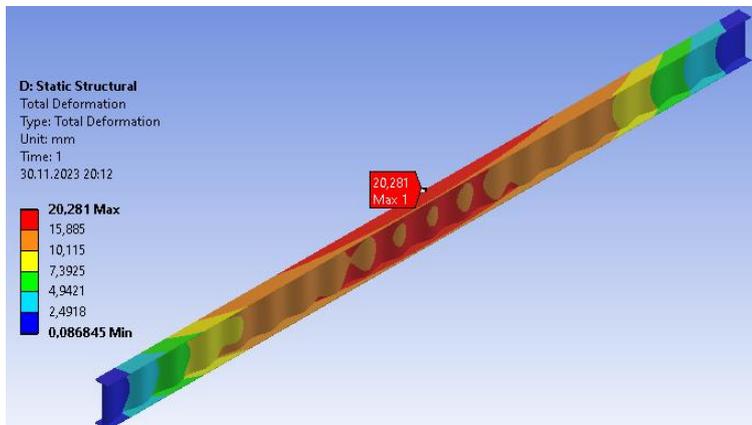
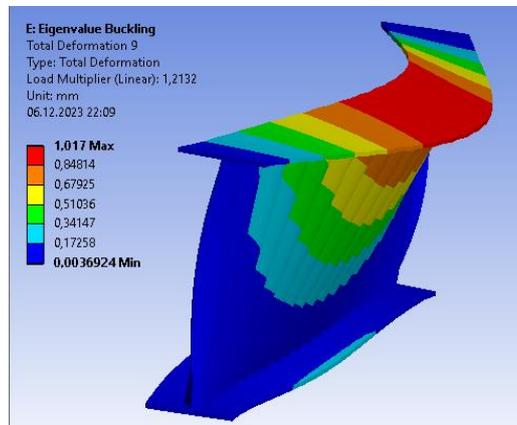


Рис.6. Максимальные значения касательных напряжений  $\tau_s$  в опорном сечении  
 Fig. 6. Maximum tangent values stress  $\tau_s$  in the support section

На рис. 7 представлены максимальные значения деформаций, наибольшее значение наблюдается в образце с высотой полуволны  $f=15$  мм. Расчет на устойчивость показал, что наименьшее значение коэффициента запаса устойчивости наблюдается в балке с наименьшей высотой полуволны гофра, который составляет 1,2132 (рис.8).



**Рис. 7.** Максимальные значения деформаций в пролетном сечении  
**Fig. 7.** Maximum values of deformations in the span section



**Рис. 8.** Форма потери общей устойчивости  
**Fig. 8.** Form of loss of general stability

Результаты расчета при варьировании высоты полуволны гофра представлены в табл. 2.

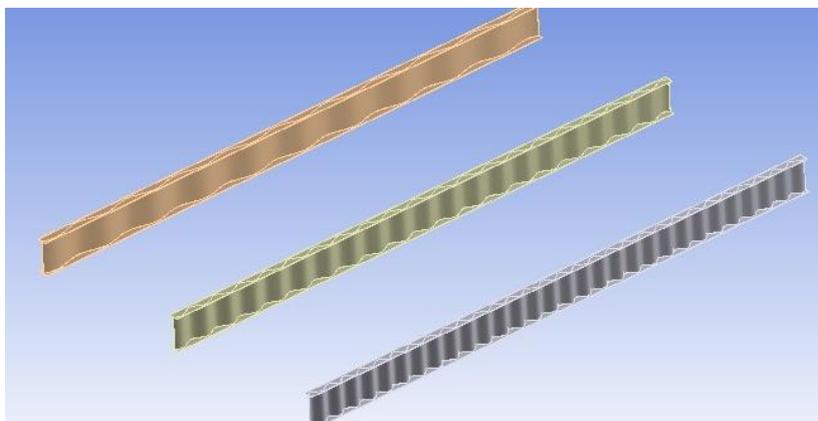
**Таблица 2.** Результаты расчета при варьировании высоты полуволны гофра  
**Table 2.** Calculation results for varying the height of the half-wave corrugation

| № | Высота полуволны гофра $f$ , мм | Коэффициент потери общей устойчивости | Соблюдение условия местной устойчивости, % | Запас жесткости, % | Металлоемкость 1 м.п., кг. |
|---|---------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 1 | 15                              | 1,21                                  | 74,36                                      | 15,49              | 16,92                      |
| 2 | 30                              | 1,55                                  | 87,99                                      | 29,22              | 17,00                      |
| 3 | 45                              | 1,71                                  | 92,04                                      | 30,70              | 17,85                      |

Исходя из результатов расчета, можно сделать вывод о том, что при увеличении высоты полуволны гофра наблюдается увеличение запаса жесткости, общей устойчивости и почти исключается возникновение местной потери устойчивости в стенке. Однако, увеличивается вес конструкции.

#### НДС ГОФРО-БАЛОК ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ДЛИНЫ ПОЛУВОЛНЫ ГОФР

Численные модели шарнирно-опертых балок, с разной длиной полуволны изображены на рис. 9. Шаг сетки конечных элементов равен 20 мм. Расчет был выполнен в упругой постановке задачи. Параметры сечений приведены в табл. 3.

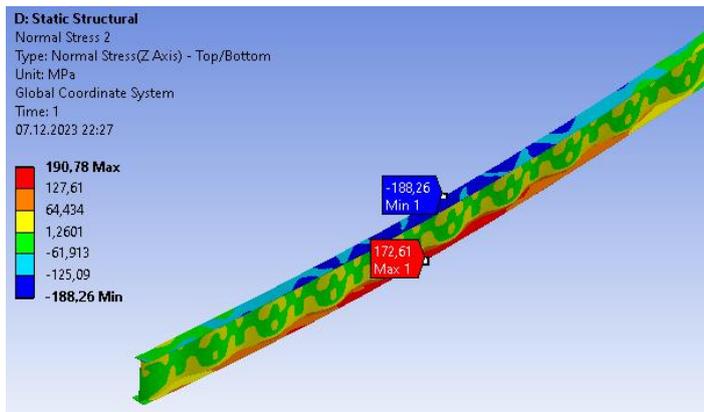


**Рис. 9.** Общий вид балок  
**Fig. 9.** General view of the beams

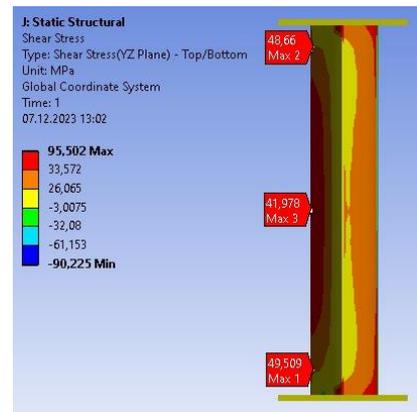
**Таблица 3.** Параметры сечений при варьировании длины полуволны гофра  
**Table 3.** Sections parameters when varying the length of the half-wave of the corrugation

| № | Длина полуволны гофра $l$ , мм | Высота полуволны гофра $f$ , мм | Соотношение высоты полуволны гофра к его длине $f/l$ | Высота стенки $h_w$ , мм | Толщина стенки $t_w$ , мм | Ширина полок $b_f$ , мм | Толщина полок $t_f$ , мм |
|---|--------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 300                            | 30                              | 0,1  | 350                      | 2                         | 120                     | 6                        |
| 2 | 150                            |                                 | 0,2  |                          |                           |                         |                          |
| 3 | 100                            |                                 | 0,3  |                          |                           |                         |                          |

Наибольшие значения нормальных напряжений наблюдаются в образце с длиной полуволны гофра  $l=300$  мм в пролетном сечении №1 в точке наибольшего свеса полки (рис.10), Максимальное значение касательных напряжений наблюдается в опорном сечении в образце с  $l=100$  мм (рис.11).

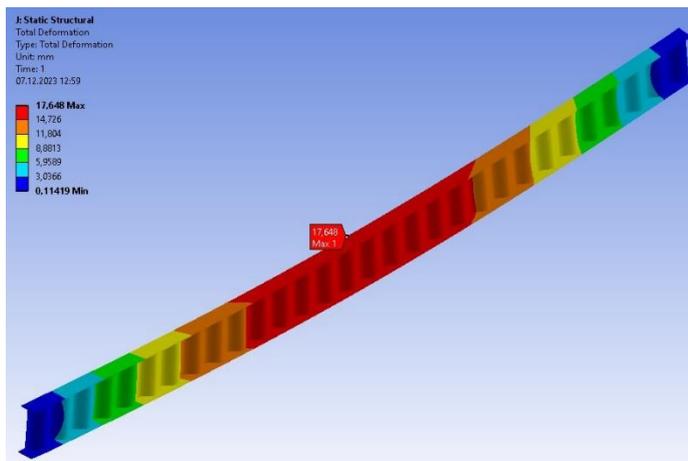


**Рис. 10.** Максимальные и минимальные нормальные напряжения  $\sigma_z$  в пролетном сечении с наибольшим свесом  
**Fig. 10.** Maximum and minimum normal stresses  $\sigma_z$  in the span section with the greatest overhang

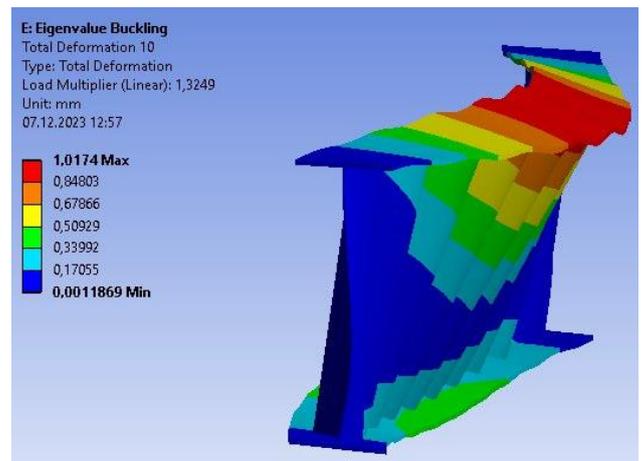


**Рис.11.** Максимальные значения касательных напряжений  $\tau_s$  в опорном сечении  
**Fig. 11.** Maximum tangent values stress  $\tau_s$  in the support section

На рис.12 представлены максимальные значения деформаций, наибольшее значение наблюдается в образце с длиной полуволны  $l=100$  мм. Расчет на устойчивость показал, что наименьшее значение коэффициента запаса устойчивости наблюдается в балке с наименьшей длиной полуволны гофра, который составляет 1,3249 (рис.13).



**Рис. 12.** Максимальное значения деформаций в пролетном сечении  
**Fig. 12.** Maximum values of deformations in the span section



**Рис. 13.** Форма потери общей устойчивости  
**Fig. 13.** Form of loss of general stability

Результаты расчета при варьировании длины полуволны гофра представлены в табл. 4.

**Таблица 4.** Результаты расчета при варьировании длины полуволны гофра  
**Table 4.** Calculation results when varying the length of the half-wave corrugation

| № | Длина полуволны гофра $l$ , мм | Коэффициент потери общей устойчивости | Соблюдение условия местной устойчивости, % | Запас жесткости, % | Металлоемкость 1 м.п., кг. |
|---|--------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------|----------------------------|
| 1 | 300                            | 1,32                                  | 88,07                                      | 29,98              | 16,92                      |
| 2 | 150                            | 1,55                                  | 87,99                                      | 29,22              | 17,00                      |
| 3 | 100                            | 1,61                                  | 94,37                                      | 27,46              | 17,85                      |

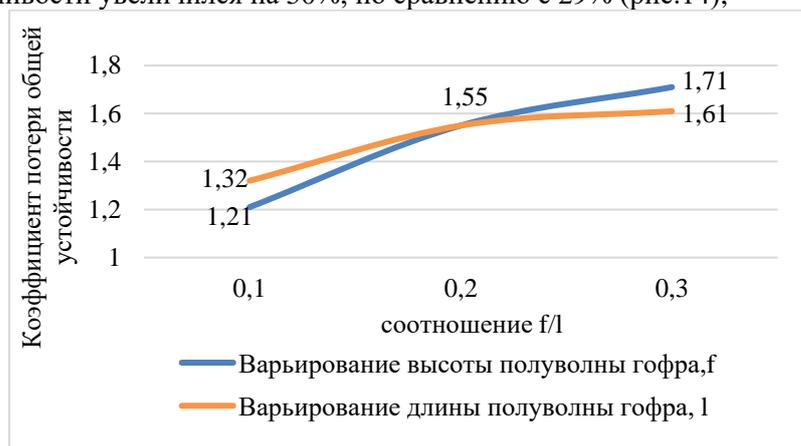
По результатам, приведенным в таблице 4, можно сделать вывод о том, что увеличение частоты гофрирования позволяет увеличить запас прочности, общей и местной устойчивости, при этом деформации в конструкциях возрастают.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы, основанные на расчетах:

1. Распределение напряжений для всех образцов одинаково.
2. Сравнение результатов расчетов гофро-балок при разных параметрах гофрирования показало, что наибольший вклад в обеспечение устойчивости вносит значение высоты полуволны гофра, по сравнению с длиной, так как:

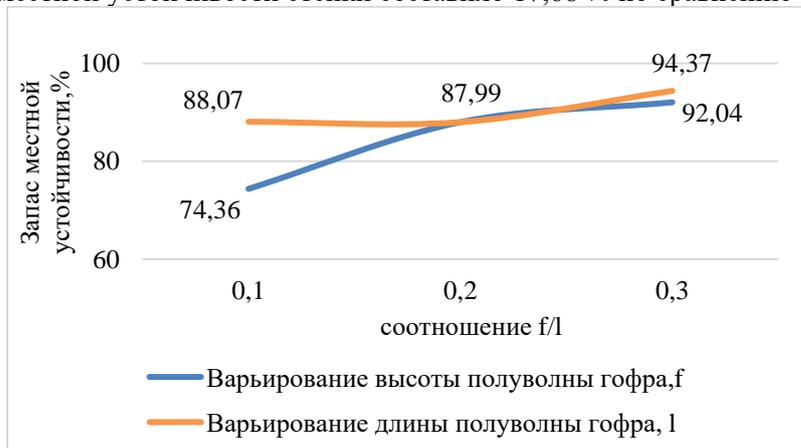
- запас общей устойчивости увеличился на 50%, по сравнению с 29% (рис.14);



**Рис.14.** График зависимости коэффициента потери общей устойчивости гофро-балок от размеров гофрирования стенки

**Fig. 14.** Graph of the dependence of the coefficient of loss of overall stability of corrugated beams on the size of the wall corrugation

- увеличение запаса местной устойчивости стенки составило 17,68 % по сравнению с 6,3 % (рис. 15);

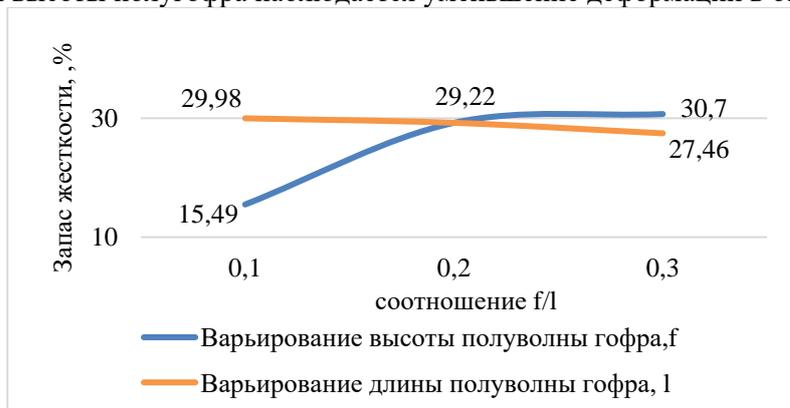


**Рис.15.** График зависимости местной устойчивости стенок гофро-балок от размеров гофрирования стенки

**Fig. 15.** Graph of the dependence of the local stability of the walls of corrugated beams on the size of the wall corrugation

3. При увеличении частоты гофрирования стенки наблюдается увеличение деформаций в балке (рис.16).

4. При увеличении высоты полугофра наблюдается уменьшение деформаций в балке (рис.16).



**Рис.16.** График зависимости запаса жесткости гофро-балок от размеров гофрирования стенки гофрирования стенки

**Fig. 16.** Graph of the dependence of the margin of rigidity of corrugated beams on the size of the corrugation of the wall

5. Для заданных исходных данных наиболее оптимальным является соотношение  $f/l=0,2$ , так как при нем соблюдается достаточное обеспечение запаса свойств первой и второй групп предельных состояний. Результаты данной работы:

- было выполнено моделирование стальных гофро-балок с тонкой поперечно-гофрированной стенкой в ПК «Ansys».
- определено напряженно-деформированное состояние гофро-балок, в зависимости от высоты полуволны гофра;
- определено напряженно-деформированное состояние гофро-балок, в зависимости от длины полуволны гофра
- был выполнен анализ полученных результатов, который показал, что наиболее оптимальным соотношением параметров стенки является  $f/l=0,2$ .

#### 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: XDBUIJ.
2. Кириленко В.Ф., Окрайнец Г.А. К вопросу расчета балок с гофрированной стенкой//Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1969. №4. С.23-27
3. Степаненко А. Н. Стальные двутавровые стержни с волнистой стенкой: учебное пособие. – Хабаров. гос. техн. ун-та, 1999. 115 с
- 4.Макеев С.А., Силина Н.Г., Комлев А.А. Экспериментальный стенд и методика испытаний гофробалок на общую устойчивость // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. 2021. С. 378–383. EDN: RDIZLG.
- 5.Силина Н.Г. Влияние параметров стенки на общую устойчивость гофробалок // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ». 2021. С. 589-591. EDN: ALETZT.
6. 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
7. Дмитриева Т.Л., Уламбаяр Х. Использование балок с гофростенкой в современном проектировании // Технические науки. Строительство. 2015. № 4(15). С. 132–138. EDN: VHDRER.
8. Соболев Ю.В., Рыбкин И.С. Конструкционный анализ гофрированных металлических изгибаемых элементов // Вестник МГСУ. 2007. № 3. С. 144–148. EDN: MVGZWN.
9. 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.

10. Мартынюк А.Я., Нилов А.А., Лазнюк М.В. Сварные соединения элементов двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой // Металлические конструкции. 2008. № 4. С. 237–244.

11. 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.32363311.

12. Макеев С. А., Сирина Н.Г., Соколовский З.Н. Разработка и апробация математической модели пространственного деформирования гофробалок // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 4. С. 18–25. DOI:10.33622/0869-7019.2021.04.18-25. EDN: KWOIKD

#### 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

#### 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