

УДК 69.07

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ С-44-1.5 ММ, С-21-1.5 ММ, СИМС-D02-01А 1.6

**В.Т. Бондарь**

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

**Аннотация.** Профилированный лист широко используется в строительстве. Основное предназначения профилированного листа – несущая и ограждающая конструкция покрытия. В последнее время все чаще появляются исследования, направленные на определение несущей способности, в том числе и потери устойчивости профилированных листов. Авторами были проведены численные исследования центрально сжатых стенок профилированного листа с целью определения их формы потери устойчивости, а также критического напряжения, при котором происходит потеря устойчивости. Численные исследования были выполнены в расчетном комплексе ANSYS в линейной подстановке. Рассматривались 3 участка стены длиной 2 м, высотой – 2,591 м, что соответствует высоте контейнера ICC в соответствии с ГОСТ Р 53350-2009. Исследовались профилированные листы с маркой С320 следующих наименований: С-44-1.5 по каталогу ООО «ЗНМИ» (завод нестандартных металлических изделий), С-21-1.5 по ТУ 1122-004-64618832-2015 и СИМС-D02-01А 1.6Х1116Х2400 DV по ISO DRY CONTAINER REPAIRING SPARE PARTS CATALOG 2019 Edition. Геометрические размеры представленные в каталоге ООО «ЗНМИ», а также в ТУ 1122-004-64618832-2015 совпадают с размерами для профилей С-44, С-21 по ГОСТ 24045-2016. По результатам были определены характерные формы потери устойчивости, а также определены критические напряжения.

**Ключевые слова:** профилированный лист; напряженно-деформированное состояние; общая потеря устойчивости; местная потеря устойчивости; численные исследования; несущая способность.

**Ссылка для цитирования:** Бондарь В.Т. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния профилированных листов С-44-1.5 мм, С-21-1.5 мм, СИМС-D02-01А 1.6 // Инженерные исследования. 2022. №3 (8). С. 11-19. EDN: EGTJJI

## COMPARATIVE ANALYSIS OF STRESS-DEFORMED STATE OF PROFILED SHEETS C-44-1.5 MM, C-21-1.5 MM, CIMC-D02-01A 1.6

**V.T. Bondar**

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

**Abstract.** Profiled sheet is mainly used as a cladding material, however, recently there have been studies aimed at determining the bearing capacity, including the buckling of profiled sheets. The authors carried out numerical studies of the centrally compressed walls of a profiled sheet in order to determine their form of buckling, as well as the critical stress at which buckling occurs. Numerical studies were carried out in the calculation complex PLM Femap 10.1 Nastran in linear substitution. We considered 3 sections of the wall 2 m long, 2.591 m high, which corresponds to the height of the ICC container in accordance with GOST R 53350-2009. We investigated profiled sheets with the C345 steel grade of the following names: C-44-1.5, C-21-1.5 according to GOST 24045-2016 and CIMC-D02-01A 1.6X1116X2400 DV according to ISO DRY CONTAINER REPAIRING SPARE PARTS CATALOG 2019 Edition. Based on the results, the characteristic forms of buckling were determined, and the critical stresses were also determined.

**Keywords:** profiled sheet; stress-strain state; general loss of stability; local loss of stability; numerical research; load bearing capacity.

**For citation:** Bondar V.T. Comparative analysis of stress-deformed state of profiled sheets C-44-1.5 mm, C-21-1.5 mm, CIMC-D02-01A 1.6 // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.3 (8). Pp. 11-19. EDN: EGTJJI

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все сильнее развивается модульное строительство из металлических блок-модулей. По всему миру построены или строятся отели, апартаменты, поликлиники, казармы, общежития из блок-модулей.

Различают два вида блок-модулей: каркасного и стенового типа. Каркасный блок-модуль представляет из себя прямоугольный каркас, собранный из стержней. Стеновые блок-модули в большинстве своем представлены морскими контейнерами.

В настоящее время в России использование морских контейнеров в качестве блок модулей плохо развито, в том числе из-за сложного и трудоемкого расчета стенки контейнера, то есть профилированного листа, как несущего элемента.

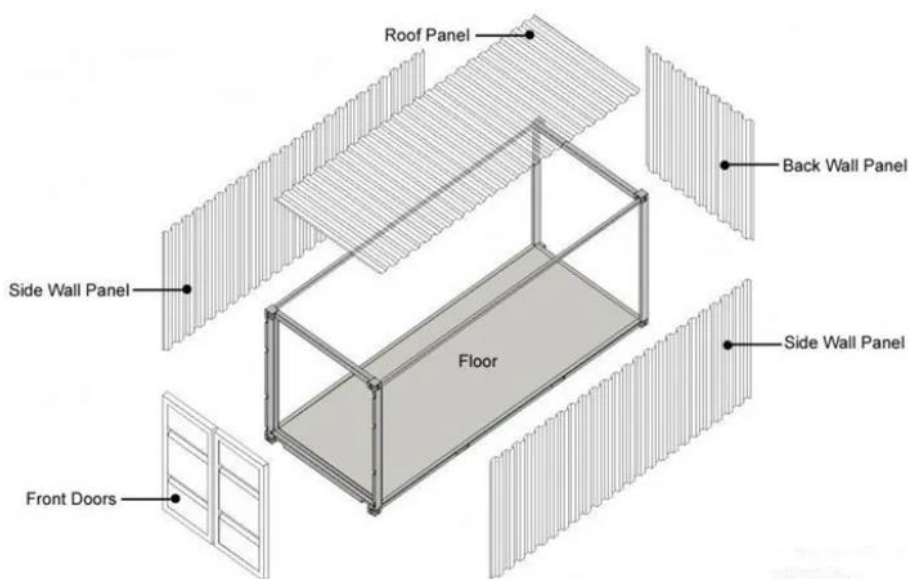
Легкие стальные тонкостенные конструкции представляют собой холодногнутые стержни из тонколистового проката, то есть проката толщиной до 4 мм. Таким образом профилированный лист можно назвать тонкостенной конструкцией. В СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей» представлен расчет трапециевидных гофрированных листов, т.е. профилированных листов на критические напряжения, при которых происходит потеря устойчивости профилированного листа. Основная схожесть профилированного листа с тонкостенным профилем – редукция сечения. Редукцией называют процесс местной потери устойчивости стенки профиля.

Многие авторы занимались исследованием несущей способности как профилированных листов, так и легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) в целом. Исследование несущей способности профилированных листов, а также рекомендации по численному моделированию профилированных листов указаны в работе В.Г. Низамеева, Ф.Ф. Башарова [1]. Изучая напряженно-деформированное состояние плит покрытий, состоящих из профилированного настила, подкрепленного шпренгельной системой, В.Г. Низамеев, Ф.Ф. Башаров исследовали влияние на несущую способность профнастила следующих факторов. Расстояние между профилированным настилом и шпренгельной системой, а также силы предварительного напряжения шпренгельной системы [2]. Аналитическая модель для расчета профилированных секций на сжатие с изгибом, а также методика проведения испытаний профилированных листов на сжатие с изгибом представлена в работе И.И. Ведяков, Д. В. Соловьев, А.И. Коваленко [3]. Для изгибаемого элемента подобная методика проведения расчета и испытаний предложена в [4]. Численные исследования стоек С-профиля с учетом начальных несовершенств описаны в статье [5] Т.В. Назмеевой.

Учеными Ф. Ванга, Я. Лянб, О. Чжаоа [6] было проведено исследование тонкостенного С-образного профиля из сверхпрочной стали S960 UHSS на продольно-поперечный изгиб. В ходе исследования проводились как натуральные, так и численные эксперименты сжатия с изгибом С-образных колонн. Ш. Чен [7] разработал нелинейную модель КЭ, которая может учитывать как геометрические, так и физические начальные несовершенства. В своей статье [8] Л. Берточча, Д. Компариния, Д. Лаваккиниб, М. Орландок, Л. Сальваторик, П. Спинелли представили результаты экспериментального исследования тонкостенных стальных стоек систем паллет-стеллажи на осевое и внецентренное сжатие. Вопросы устойчивости тонкостенного профиля открытого сечения исследовал в своей кандидатской работе [9] Астахов И.В. Им была сформулирована методика определения упругих пространственных деформаций. Разработкой математической модели и созданием алгоритма расчета местной потери устойчивости на основе дифференциального уравнения прогибов Софи-Жермен занимался Холкин Е.Г. [10].

## СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СХЕМЫ СТЕНКИ КОНТЕЙНЕРА

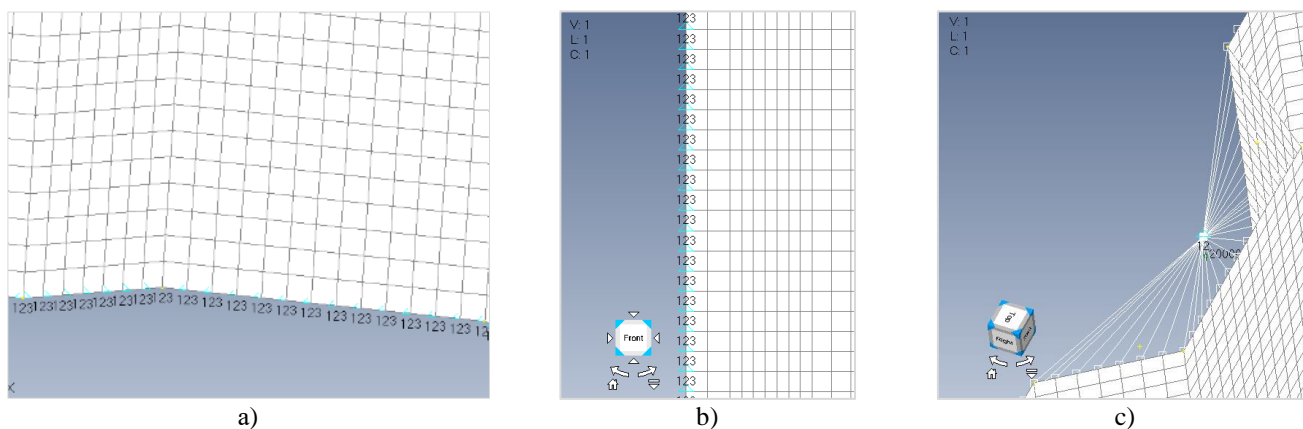
Контейнер представляет собой металлическую раму с вшитыми в нее профилированными листами (рис.1). Таким образом, если рассмотреть отдельную стенку контейнера, то ее можно представить жестко защемленной по нижней грани и по верхней граням, так как в этих местах происходит сварка профилированного листа и профиля. Основным отличием верхнего и нижнего закрепления является фиксация по вертикальной оси. Снизу закрепление по вертикальной оси ограничено. Боковые стенки шарнирно закреплены по всем направление. Обеспечивается это сваркой профлиста и вертикального профиля.



**Рис.1.** Конструктивная схема морского контейнера  
**Fig.1.** Structural scheme of a sea container

В качестве исследования были проведены численные эксперименты на центральное (осевое) сжатие профилированных листов С-44-1.5, С-21-1.5 и СИМС-D02-01А 1.6Х1116Х2400 DV с маркой стали С345. Расчет на центральное сжатие является допущением, так как определение точной передачи нагрузки с вышележащего контейнера является трудновыполнимой задачей. Численное испытание проводилось для участка стены длиной 2 м, высотой – 2,591 м, что соответствует высоте контейнера 1СС в соответствии с ГОСТ Р 53350-2009. На участки стены из профилированных листов задавалась одинаковая равномерно распределенная нагрузка. Материалом профилированного листа принималась оцинкованная сталь марки С320 по ГОСТ 14918-2020. Указанная марка стали обладает пределом текучести не менее 320 МПа, временным сопротивлением разрыву не менее 390 МПа.

Так как основной целью исследования является определение формы потери устойчивости стенки профилированного листа, а также коэффициента запаса устойчивости, то физический смысл нагрузки, а значит и ее величина не являются важными составляющими. Равномерно распределенная нагрузка была представлена в виде совокупности сосредоточенных нагрузок, приложенных к центру тяжести одного гофра, откуда с помощью Rigid элементов нагрузка распределялась на узлы гофра. Расчетную конечно-элементную схему стенки контейнера в первом приближении можно представить как профилированный лист, который шарнирно-неподвижно закреплен снизу, шарнирно-подвижно закреплен сверху, по бокам шарнирно-неподвижное закрепление (рис.2).

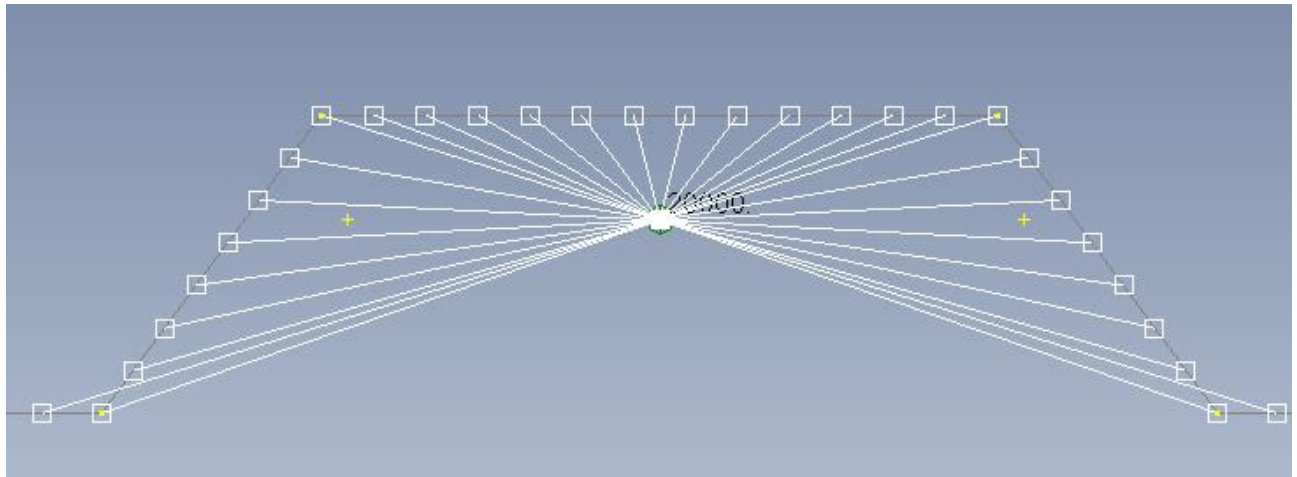


**Рис.2.** Закрепление профилированного листа: а – шарнирно-неподвижное закрепление основания профилированного листа; б – шарнирно-неподвижное закрепление боковых граней профилированного листа; в – шарнирное закрепление верхней грани профилированного листа через Rigid элемент

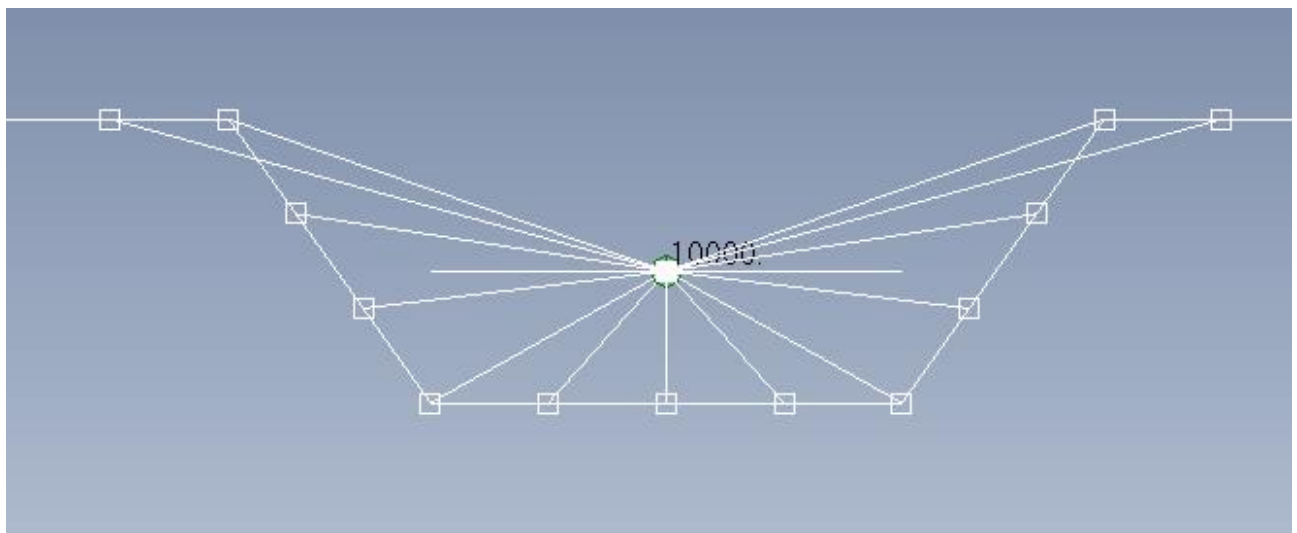
**Fig. 2.** Fastening of the profiled sheet: a - hinged-fixed fastening of the base - fastening of the profiled sheet; b - hinged-fixed fastening of the lateral edges of the profiled sheet; c - hinged fastening of the upper edge of the profiled sheet through the Rigid element

Профилированные листы представлены пластинчатыми конечными элементами типа Plate (универсальный оболочечный элемент). Геометрия листов определялась на основании ГОСТ 24045-2016 и ISO DRY CONTAINER REPAIRING SPARE PARTS CATALOG 2019 Edition для листов С-44-1.5, С-21-1.5 и CIMC-D02-01A 1.6X1116X2400 DV соответственно. В расчетную схему импортировались срединные линии профилей гофров.

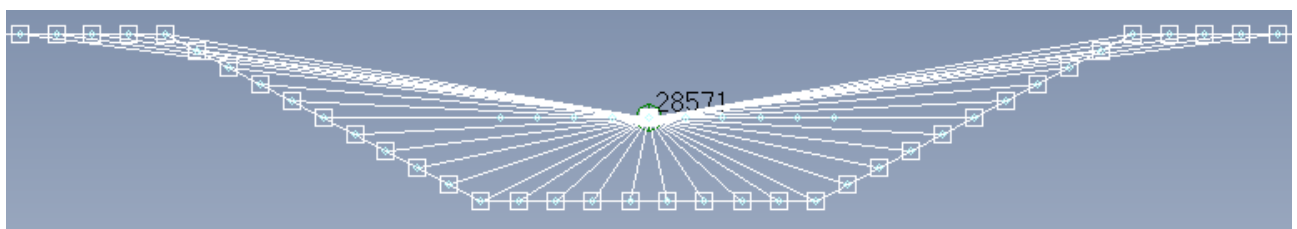
На профилированный лист в общей сложности приходилась распределенная нагрузка 100 кН/м, что соответствует величине 10,2 т/м. Распределенная нагрузка задавалась путем задания сосредоточенной узловой нагрузки, приложенной к Rigid элементу, расположенному в центре тяжести гофра (рис.3; рис.4; рис.5). Значение узловой нагрузки определяется путем деления сосредоточенной нагрузки на метр ширины стенки на количество гофров в этом метре. Для С-44-1.5  $F=100000/5=20000$ , для С-21-1.5  $F=100000/10=10000$ , для CIMC-D02-01A 1.6X1116X2400 DV  $F=100000/3,5=28571$ .



**Рис.3.** Узловая нагрузка на Rigid элемент для профилированного листа С-44-1.5  
**Fig. 3.** Nodal load on a Rigid element for C-44-1.5 profiled sheet



**Рис. 4.** Узловая нагрузка на Rigid элемент для профилированного листа С-21-1.5  
**Fig. 4.** Nodal load on Rigid element for C-21-1.5 profiled sheet

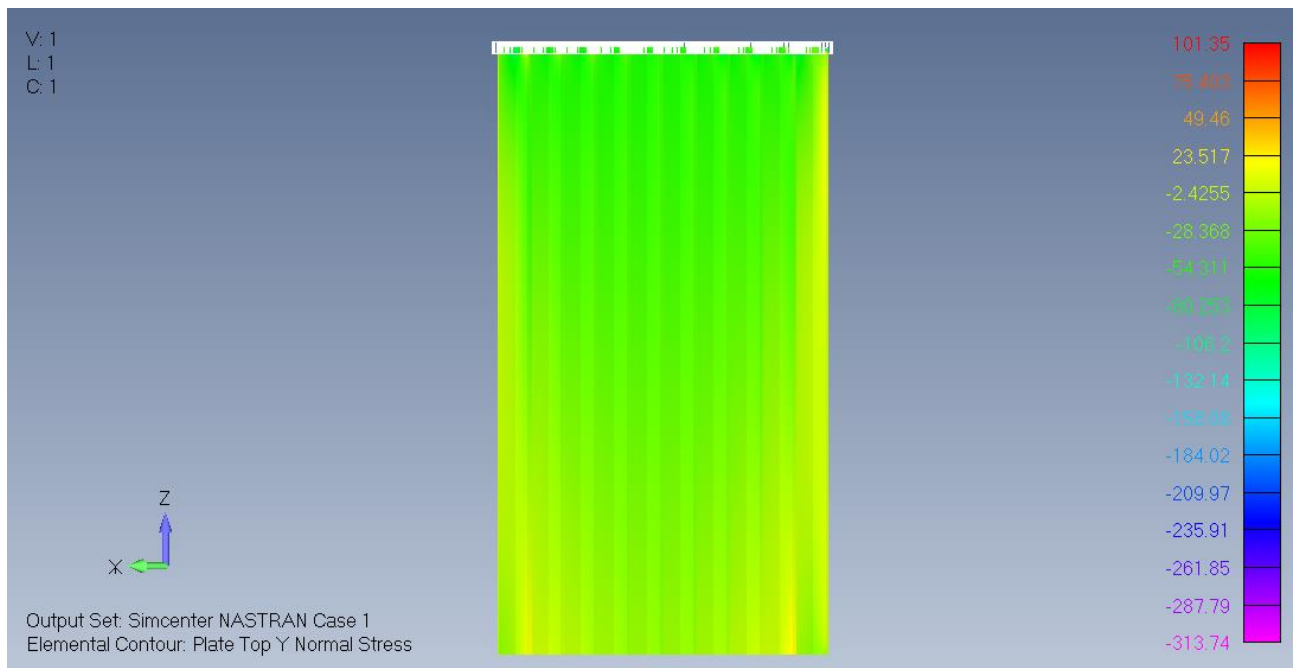


**Рис.5.** Узловая нагрузка на Rigid элемент для профилированного листа CIMC-D02-01A 1.6X1116X2400 DV  
**Fig. 6.** Nodal load on Rigid element for profiled sheet CIMC-D02-01A 1.6X1116X2400 DV

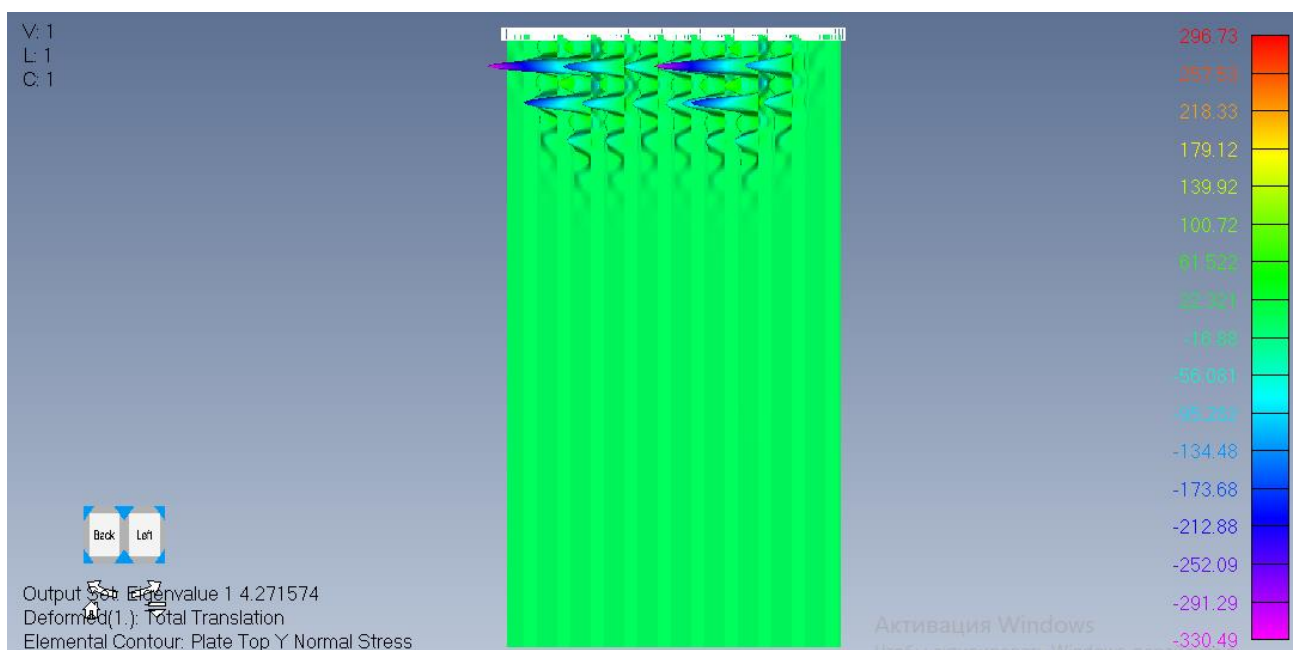
Расчеты выполнялись в упруго линейной постановке в режиме «Buckling» при постоянной нагрузке на элементы. В результате исследования было получено 5 форм потери устойчивости стенки (нас интересует только 1 форма), а также определены коэффициенты запаса устойчивости  $\beta_1$ , и критические усилия, возникающие в стенке. Потеря устойчивости элементов стенки происходила до потери прочности элемента стенки.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЛИСТОВ

Для стенки из профилированного листа С-44-1.5 характерна потеря местной устойчивости полки профлиста с коэффициентом запаса устойчивости  $\beta_1=4,272$ . Изополя продольных напряжений профлиста С-44-1.5 приведены ниже (рис.6). Форма потери устойчивости элементов стенки, а также значение коэффициента  $\beta_1$  приведены ниже (рис.7).



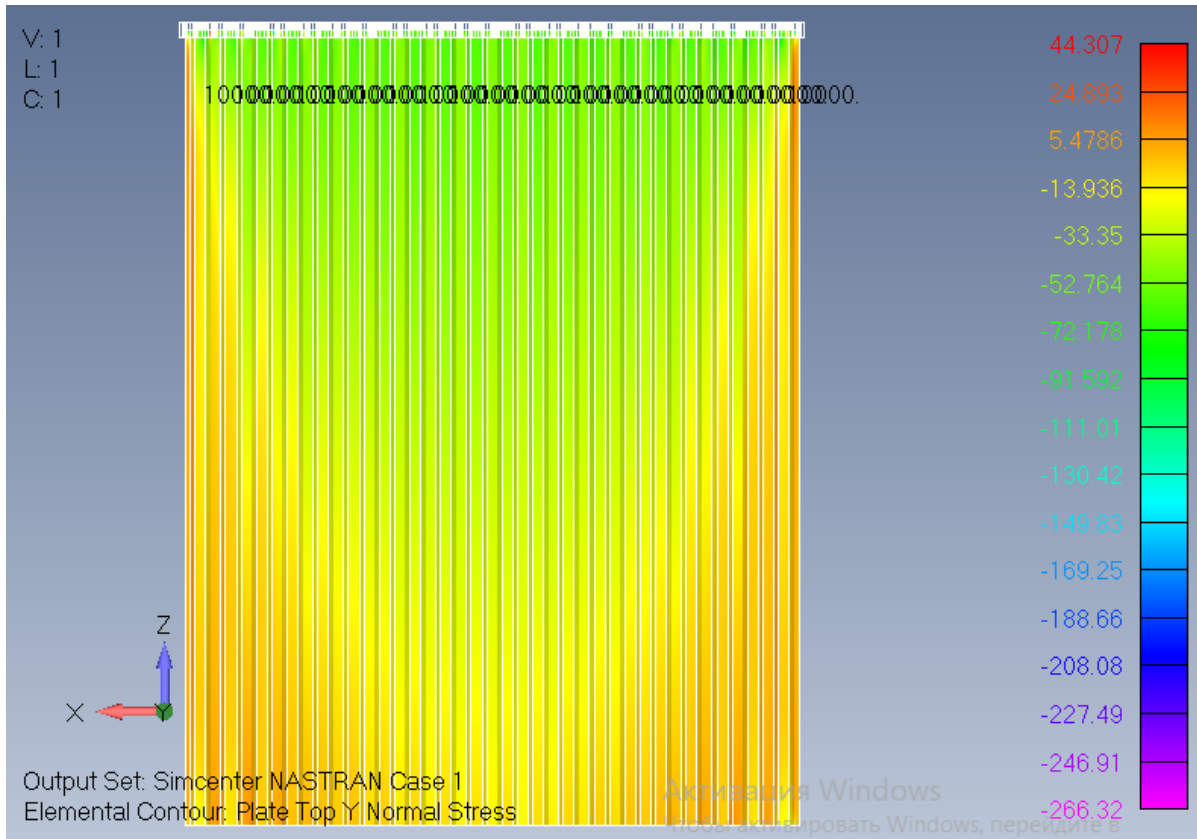
**Рис.6.** Изополе продольных напряжений профлиста С-44-1.5  
**Fig. 6.** Isofield of longitudinal stresses of profiled sheet S-44-1.5



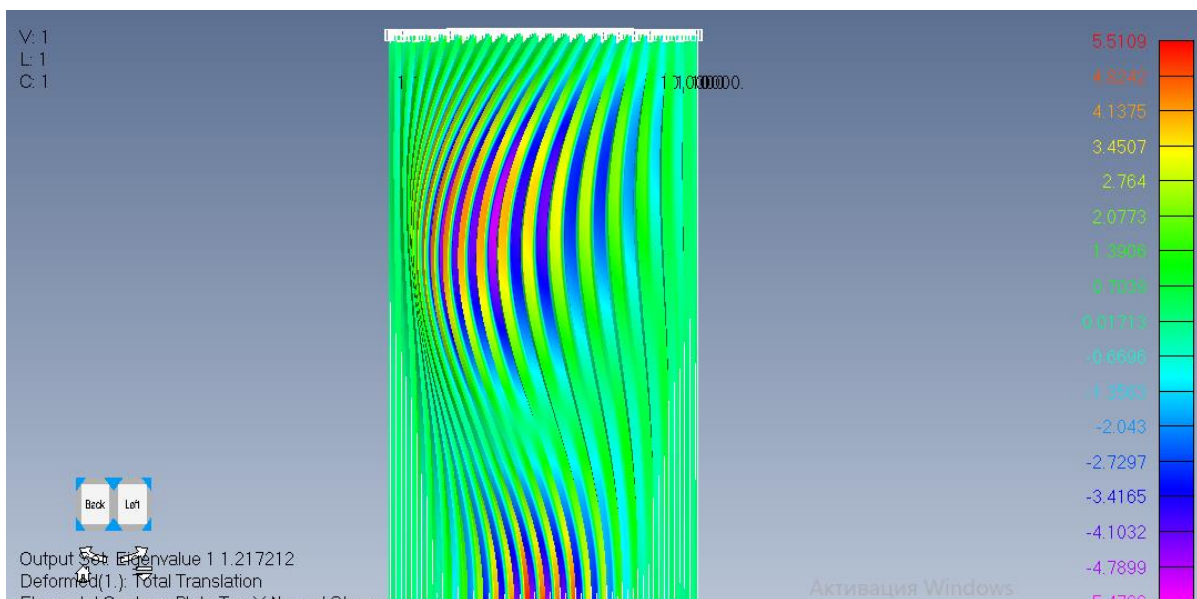
**Рис.7.** Первая форма потери устойчивости стенки профиля С-44-1.5  
**Fig. 7.** The first form of buckling of the C-44-1.5 profile wall

Как видно самой напряженной частью профилированного листа является участок, расположенный непосредственно под нагрузками, следовательно, именно в этом месте наиболее вероятно появление потери устойчивости. Это мы и наблюдаем (рис.7). Также стоит отметить, что для профилированного листа С-44-1,5 характерна локальная потеря устойчивости наиболее напряженных профилей.

Для стенки из профилированного листа С-21-1.5 характерна потеря общей устойчивости профлиста с коэффициентом запаса устойчивости  $\beta_1=1,217$ . Изополя продольных напряжений профлиста С-21-1.5 приведены на ниже (рис.8). Форма потери устойчивости элементов стенки, а также значение коэффициента  $\beta_1$  приведено ниже (рис.9).



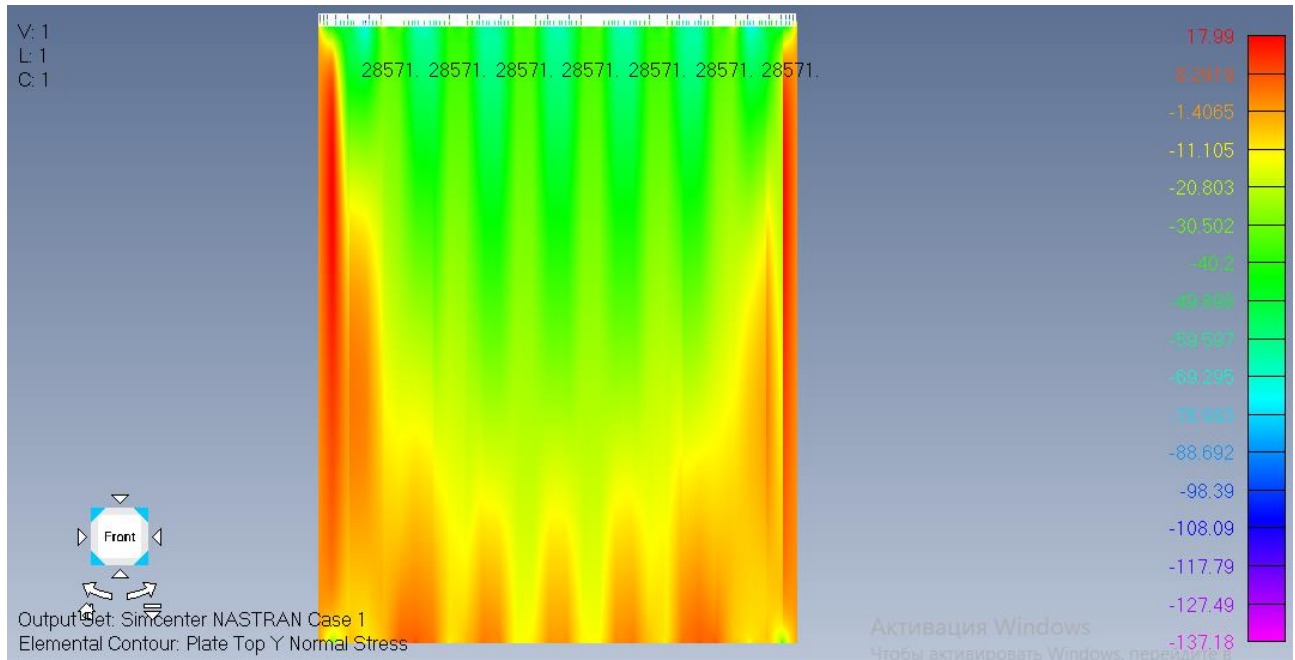
**Рис.8.** Изополе продольных напряжений профлиста С-21-1.5  
**Fig. 8.** Isofield of longitudinal stresses of profiled sheet S-21-1.5



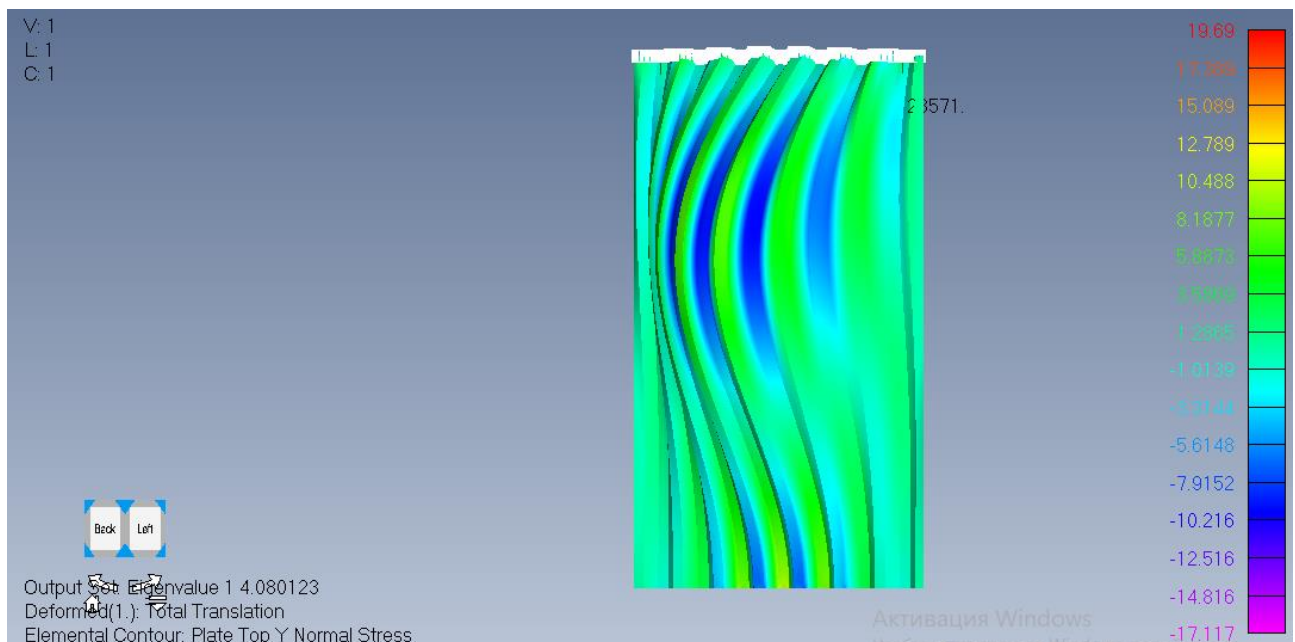
**Рис.9.** Первая форма потери устойчивости стенки профиля С-21-1.5  
**Fig. 9.** The first form of buckling of the C-21-1.5 profile wall

Для стенки из профилированного листа СИМС-D02-01А 1.6 характерна потеря местной устойчивости профлиста с коэффициентом запаса устойчивости  $\beta_1=4,08$ . Изополя продольных напряжений профлиста СИМС-D02-01А 1.6 приведены на ниже (рис.10). Форма потери устойчивости элементов стенки, а также значение коэффициента  $\beta_1$  приведено ниже (рис.11).

Как видно из рис.9, самой напряженной частью профилированного листа является участок, расположенный непосредственно под центральными нагрузками. Также стоит отметить, что для профилированного листа С-21-1.5. характерна общая потеря устойчивости всего профилированного листа.



**Рис.10.** Изополе продольных напряжений профлиста СИМС-D02-01А 1.6  
**Fig. 10.** Isofield of longitudinal stresses of profiled sheet СИМС-D02-01А 1.6



**Рис.11.** Первая форма потери устойчивости стенки профиля СИМС-D02-01А 1.6  
**Fig.11.** The first form of buckling of the СИМС-D02-01А profile wall 1.6

Как видно из рис.11, самой напряженной частью профилированного листа является участок, расположенный непосредственно под центральными нагрузками. Также стоит отметить, что для профилированного листа СИМС-D02-01А 1.6. характерна общая потеря устойчивости всего профлиста.

В большинстве своем потеря устойчивости элементов происходила у краев стенок, что может быть связано с граничными условиями, заданными по краям стенок. Это значит, что требуется более детальное изучение вопроса, в том числе моделирование в нелинейной подстановке.

Стоит отметить получившуюся величину нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости. Нагрузка в 10 т на метр длины кажется большой, однако для профиля С-44-1,5 с минимальным моментом инерции  $I_{min} = 10.33 \cdot 10^{-8}$  м критическая сила, т.е. сила, при которой произойдет потеря устойчивости сжатого стержня по Эйлеру составит:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min}}{(\mu \cdot l)^2} = \frac{9.86 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 10.33 \cdot 10^{-8}}{(0.5 \cdot 2.591)^2} = 121.4 \text{ кН} = 12,38 \text{ т.}$$

Однако формула Эйлера не совсем применима к тонкостенному сечению. В тонкостенном профиле из-за крутящих усилий потеря устойчивости для отдельно стоящей гофре профлиста наступит при меньшей нагрузке (рис.12). Нагрузка приложенная на рис.12 соответствует критической нагрузке  $P_{кр} = 12,38$  т.

Опираясь на результаты, отображенные на рис.7, можно прийти к выводу, что при нагрузке 80 кН, т.е. около 8 т на гофру произойдет потеря устойчивости стенки. Критическая нагрузка для потери устойчивости стенки выше, чем подобная у одиночного профиля (рис.12), так как соединение с соседними гофрами препятствует потере устойчивости при кручении.

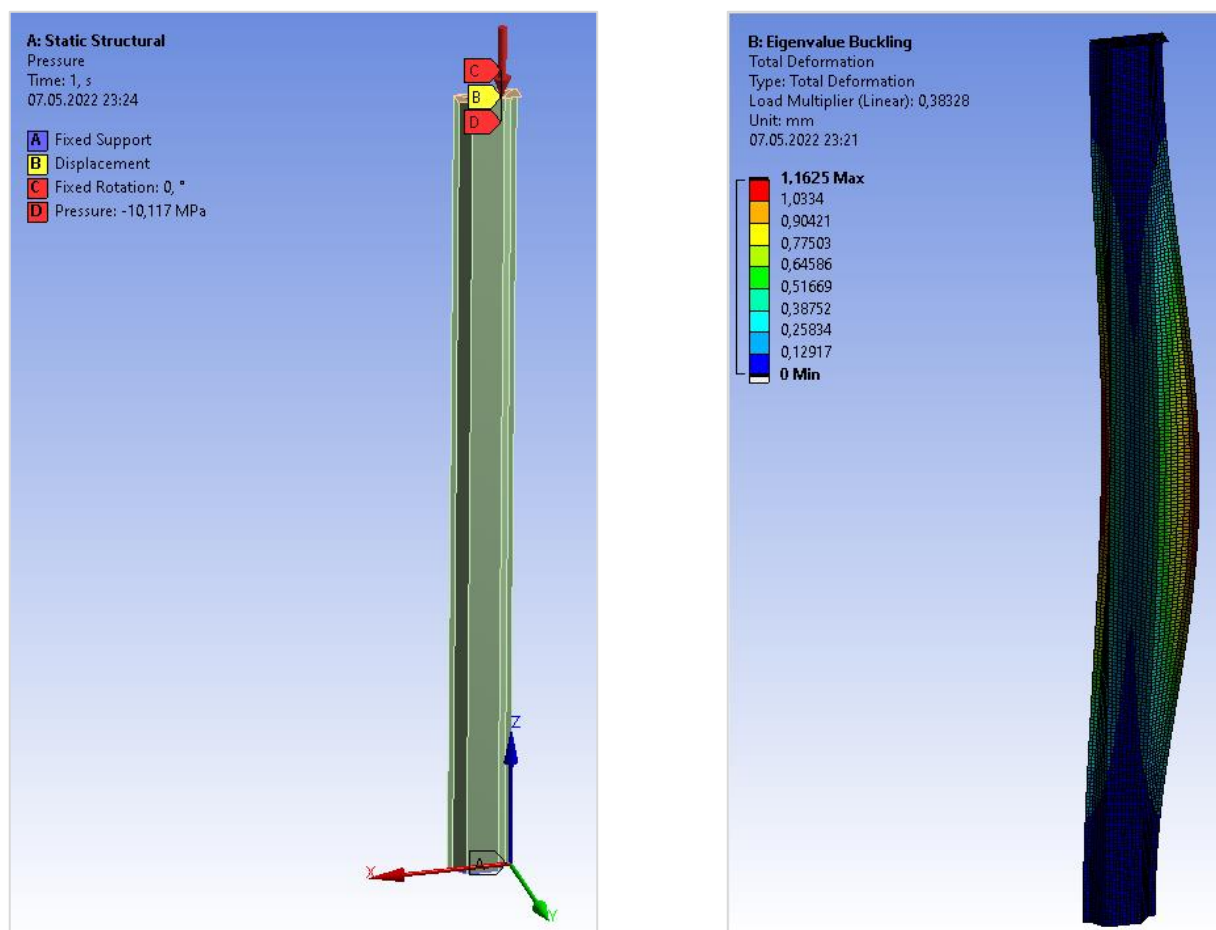


Рис.12. Потеря устойчивости отдельно стоящей части профиля С-44-1,5  
Fig.12. Loss of stability of a free-standing part of the C-44-1.5 profile

Профилированные листы С-44-1.5, С-21-1.5 представлены как новый вид профилированных листов, размеры которых, за исключением толщины, совпадают с размерами по ГОСТ 24045-2016. Данные профлисты изготавливаются на заводах как не стандартные изделия. Профилированный лист CIMC-D02-01A 1.6X1116X2400 DV представлен в соответствии с документом ISO DRY CONTAINER REPAIRING SPARE PARTS CATALOG 2019 Edition; данный документ представляет собой каталог деталей морского контейнер по ГОСТ Р 53350-2009 (ИСО 668:1995).



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных численных экспериментов на осевое (центральное) сжатие различных профилированных листов стенки контейнера, наиболее устойчивой является стенка из профилированного листа С-44-1.5. Учитывая все вышеперечисленное имеется острая необходимость в проведении дополнительных расчетов и исследований, а именно определение геометрических характеристик гофра, при котором наблюдается переходное состояние потери устойчивости, а также определение коэффициентов, позволяющих гофрированные стенки считать как плоские пластины при общей потере устойчивости последних [11, 12].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Низамеев В.Г., Башаров Ф.Ф. Исследование несущей способности профилированного настила при внецентренном сжатии с учетом закритической его работы // Известия Казанского Государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1. С. 95–101.
2. Низамеев В.Г., Башаров Ф.Ф. Исследование несущей способности профилированного настила подкрепленного шпренгельной системой // Известия Казанского Государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 6(84). С. 76–81.
3. Ведяков И.И., Соловьев Д.В., Коваленко А.И. Расчет тонколистовых профилированных секций с двойным гофрированием на сжатие с изгибом // Вестник НИЦ Строительство. 2019. № 2 (21). С. 5–14.
4. Ведяков И.И., Соловьев Д.В., Арменский М.Ю. Теоретические и экспериментальные исследования новых марок профилированного настила // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 2 (211). С. 72–74.
5. Назмеева Т.В., Ватин Н.И. Численные исследования сжатых элементов холодногнутого просечного С-профиля с учетом начальных несовершенств // Инженерно-строительный журнал. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016. № 62. С. 92–101.
6. Ong S.Q. Experimental and numerical studies of pin-ended S960 ultra-high strength steel press-braked channel section columns. Nanyang Technological University, 2019.
7. Shen H.X. Behavior of high-strength steel welded rectangular section beam-columns with slender webs // Thin-Walled Struct. Elsevier Ltd, 2015. № 88. С. 16–27.
8. Bertocci L., Comparini D., Lavacchini G., Orlando M., Salvatori L., Spinelli P. Experimental, numerical, and regulatory P-Mx-My domains for cold-formed perforated steel uprights of pallet-racks // Thin-Walled Struct. Elsevier Ltd, 2017. № 119. С. 151–165.
9. Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей. диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб. СПбГАСУ. 2006. С. 123.
10. Холкин Е.Г. Исследование местной устойчивости тонкостенных трапециевидных профилей при продольно-поперечном изгибе. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. О. ОмГТУ. 2010. С. 118.
11. Бондарь В.Т., Назмеева Т.В., Рыбаков В.А. Напряженно-деформированное состояние стойки из спаренных вложенных друг в друга профилей // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Сборник материалов Всероссийской конференции. 2022. С. 289-292. EDN: FTZQAU
12. Бондарь В.Т., Назмеева Т.В. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния профилированных листов С-44-1.5, С-21-1.5, СИМС-D02-01А 1.6 // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 417-419. EDN: SIFEXD

## ОБ АВТОРАХ

**Владимир Тарасович Бондарь** – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: doodge1997@gmail.com

## ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir T. Bondar** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: doodge1997@gmail.com