

## Расчет коэффициентов потери общей устойчивости стальных холодногнуто́тых профилей методом конечных элементов

*Д. Йордановска, М.О. Смирнов*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург*

**Аннотация:** Объект исследования – С-образные элементы, изготовленные из тонкостенных холодногнуто́тых профилей. Предметом исследования является устойчивость С-образных стержневых элементов из тонкостенных холодногнуто́тых профилей. Цель исследования: разработка процесса расчета методом конечных элементов и определение коэффициентов потери общей устойчивости тонкостенных холодногнуто́тых стержней. Метод. Для сокращения времени и объема расчетных операций используется численно-аналитический метод исследования. Коэффициенты потери устойчивости определяются методом конечно-элементного анализа потери общей устойчивости холодногнуто́тых элементов легких стальных тонкостенных конструкций с использованием программного комплекса. В результате анализа получена таблица суммарных коэффициентов холодногнуто́тых тонкостенных стержней, которую можно представить в виде таблицы для расчетов по показателям – сравнительный анализ обратного численно-аналитического метода расчета с методом конечных элементов с использованием компьютерной программы.

**Ключевые слова:** устойчивость, метод конечных элементов, тонкостенные холодногнуто́тые профили, сталь, программный комплекс, конструкция.

### Введение

Легкие стальные тонкостенные конструкции характеризуются малой металлоемкостью, оптимальным размером сечения, легкостью изготовления, транспортировки и эксплуатации, быстрым монтажом, сокращением сроков, высокой технологичностью и снижением затрат на строительство объектов. Особенностью тонкостенных стальных элементов является возможность потери местной устойчивости и формы сечения до достижения предельного состояния. Они применяются при построении зданий высотой более 10 этажей. Решетчатые элементы из легких стальных тонкостенных конструкций применяются в качестве несущих конструкций промышленных и складских помещений, в качестве второстепенных элементов, в виде рам или ферм имеющих большую экономическую эффективность. На рис. 1. представлено применение легких стальных тонкостенных конструкций.

---

Широкое распространение конструкций из тонкостенного профиля в России началось с появлением нормативных и методических баз по расчету легких стальных тонкостенных конструкций. Нормы проектирования необходимо корректировать, так как некоторые пункты «Свода правил Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов» требуют выполнения расчетов по более сложным методикам и приводят к недостаточно обоснованным результатам из-за возможности физического и геометрического деформирования.

Много работ было посвящено разработке новых теоретических методов расчета прочности и устойчивости тонкостенных холодногнутых элементов [1–3]. Большинство из них показывали существенно меньшую несущую способность по сравнению результатами испытаний. Более точный результат достигался только методом конечных элементов, но его минусом являлась низкая скорость получения результатов. Большой вклад в изучение поведения тонкостенных холодногнутых профилей внесли Белый Г.И. [4], [5], Ватин Н. И. [6], Рыбаков В.А. [7], Лалин В.В. [8], Гарифуллуин М. [9], Трубина Д. [10]. Исследования этих ученых посвящены изучению методики определения устойчивости, прочности и несущей способности холодногнутых тонкостенных элементов. В статьях [11–13], рассматривается аналитически–численный метод расчета на прочность стержневых элементов легких стальных конструкций. В исследовании [14] разработан метод конечных элементов при решении задачи динамики тонкостенных стержней.

### **Цель исследования**

Основываясь на многочисленных теоретических и экспериментальных исследованиях [15], накопленные знания в области легких холодногнутых тонкостенных элементов, возникла идея разработать методику определения коэффициентов потери общей устойчивости холодногнутых профилей,

---

которая ускорит процесс решения задач общей устойчивости. Объектом исследования данной работы являются стержневые элементы из тонкостенных холодногнутых С-образных профилей, а предметом исследования является устойчивость стержневых элементов из тонкостенных холодногнутых С-образных профилей. В соответствии с поставленной целью, в данной работе решаются следующие задачи: выполнение анализа соответствия результатов расчета на общую устойчивость легких стальных конструкций по нормативным документам, выполнение анализа потери общей устойчивости тонкостенных холодногнутых профилей помощью метода конечных элементов, определение коэффициентов потери общей устойчивости для легких стальных тонкостенных конструкций помощью программного комплекса, сравнительный анализ численно-аналитического метода и метода конечных элементов и уточнение методики расчета устойчивости легких стальных элементов.

**Теоретическая значимость работы.** Усовершенствованная методика расчета позволяет ускорить процесс решения задач общей устойчивости элементов из легких стальных тонкостенных профилей и достоверно оценить устойчивость элементов конструкции.

**Практическая значимость работы.** Полученные результаты могут быть использованы на практике при решении задач общей устойчивости легких стальных тонкостенных конструкций.



Рис. 1. – Применение элементов легких стальных тонкостенных конструкций  
[16],[17]

---

На практике используются методы для определения потери местной устойчивости, для которых потребуется больше времени для вычисления расчетов. Для сокращения времени и объема расчетных операций в настоящей статье предлагается численно–аналитический метод исследования. Коэффициенты потери устойчивости определим конечно–элементным анализом потери общей устойчивости холодногнутых элементов легких стальных тонкостенных конструкций помощью программного комплекса ANSYS ([www.ansys.com](http://www.ansys.com)) [18].

Очень важным моментом при расчете методом конечных элементов являются граничные условия и параметры расчета. От этих значений зависит достоверность результатов. В данной работе рассмотрим процесс расчета спаренных С–образных профилей в программном комплексе ANSYS. Для примера будем использовать сечение Double Channel 190x90x20x2.

Перед тем как перейти к расчетам, определимся типом конечных элементов для численного анализа. Конечные элементы бывают стержневыми, пластинчатыми или объемными. Будем использовать пластинчатые конечные элементы, так как стержневые и объемные не очень подходят при расчете потери местной устойчивости. В качестве расчетной модели будем использовать сечение, состоящее из совокупности отдельных пластин. Сначала построим геометрию спаренного С–образного стержня, с помощью модуля SpaceClaim используя пластинчатые элементы (Surface). На поверхность стенок спаренных стержней добавим дополнительные ребра с шагом  $30i_{min}$ , где  $i_{min}$  – наименьший радиус инерции сечения. Таким образом обеспечивается совместная работа элементов. Далее в модуле Mechanical добавляем ребра соседних граней профилей, обеспечивая их крепление между собой. На рис. 2 показана схема расчета стержня, а на рис. 3 параметры крепления стержня.

---

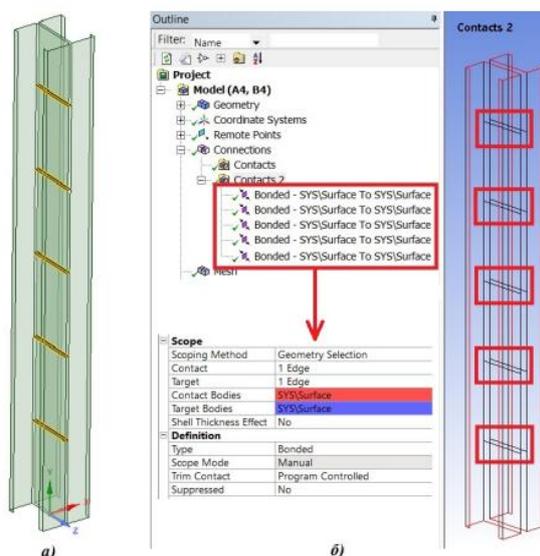


Рис. 2. – Схема расчета стержня а) геометрия модели б) параметры контактных ребер

В избежание локальных напряжений, торцевые контуры стержня в данном примере – недеформируемые. При сравнении методов получения коэффициентов потери общей устойчивости стержневых элементов главным параметром является условная гибкость, поэтому не принципиально, каким образом закреплен элемент. В данной работе стержень жестко заземлен по нижней грани. Задачей данного анализа является получение эквивалентных результатов из безразмерных параметров (длина, геометрия профилей, эксцентриситеты). Стержень постепенно будем нагружать сжимающей нагрузкой с определенными абсолютными эксцентриситетами до тех пор, пока в наиболее напряженном волокне нагрузка достигнет величины  $R_y$ , после чего можем определить значение продольной силы.

Далее проводится расчет для определения формы потери устойчивости стержня. Результаты расчета служат для получения деформированной схемы для дальнейших деформационных расчетов.

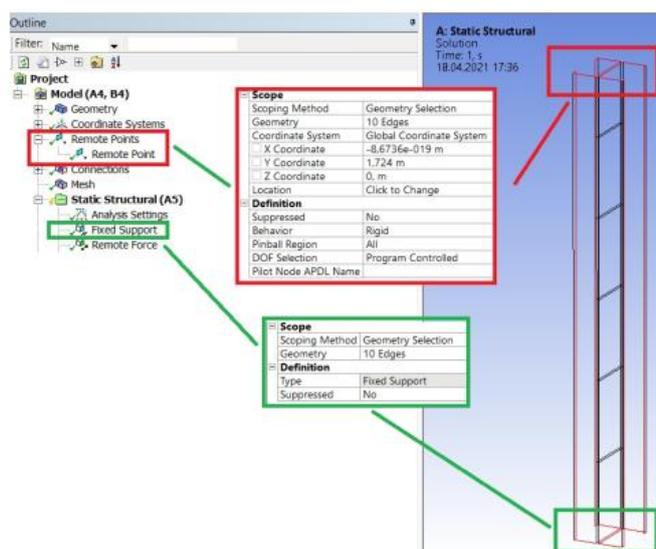


Рис. 3. – Параметры свободного конца рассматриваемого стержня выделены красным, параметры крепления – зеленым

Стержневые элементы конструкций из холодногнутых профилей характеризуются малой толщиной до 4–6 мм, поэтому потеря местной устойчивости проходит раньше, чем потеря общей устойчивости. Для последующих расчетов используется первая форма потери устойчивости. Она имеет наименьшую критическую силу. После получения деформативной схемы, проводится расчет стержня с учетом больших деформаций.

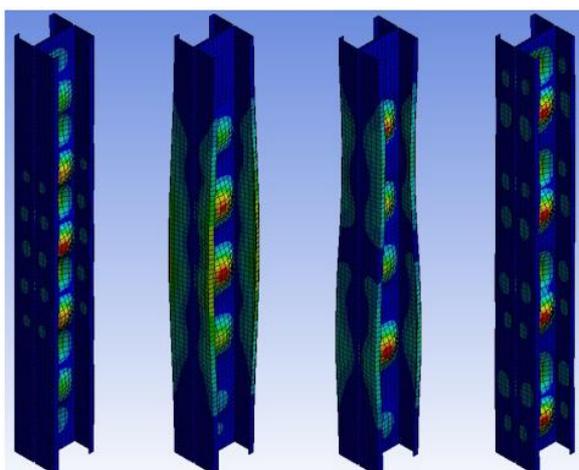


Рис. 4. – Первые четыре формы потери устойчивости сжатого стержня

Для получения деформационной схемы, стержни нагружаются сжимающей нагрузкой с различными эксцентриситетами. Расчет доводится

до достижения расчетного сопротивления в наиболее напряженном волокне. Результатом данного расчета является форма потери общей устойчивости стержня при внецентренном сжатии, учитывающую потерю местной устойчивости, а также величину продольной силы, необходимой для достижения данного состояния. На рис. 4 показаны формы потери устойчивости, а на рис. 5 эквивалентные напряжения.

Сжимающую нагрузку которую получили  $N_{пр}^{МКЭ}$  переводим в безразмерное значение  $\varphi_{пр,ef}^{МКЭ} = N_{пр}^{МКЭ} / R_y \cdot A$ . Далее делаем сравнительный анализ с обратным численно–аналитическим методом [5] и методами предлагаемыми в нормативных документах.

Итогом работы данного анализа является таблица коэффициентов потери общей устойчивости для холодногнутых тонкостенных стержней, которую можно представить в виде таблицы. Она послужит для дальнейших расчетов.

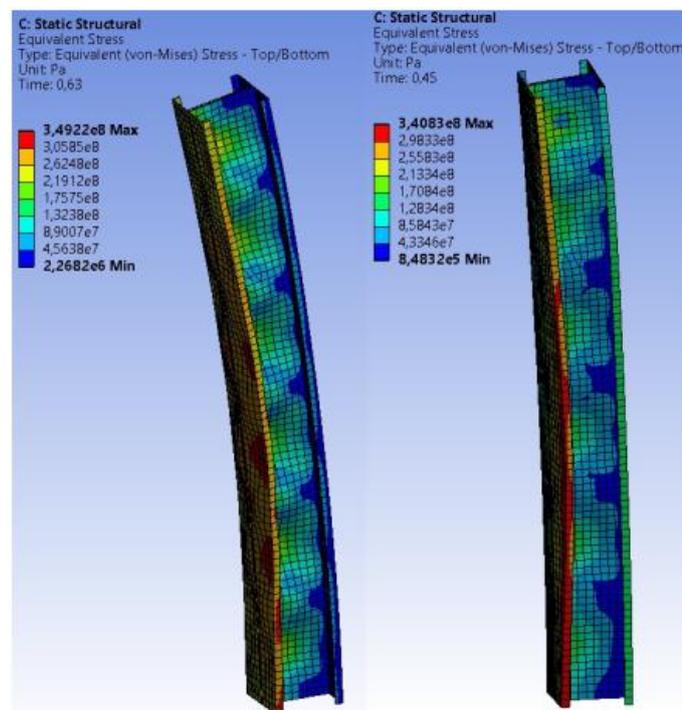


Рис. 5. – Эквивалентные напряжения по Фону-Мизесу в предельном состоянии совместно с деформированной схемой стержня при различных относительных эксцентриситетах

Таблица № 1

Общие коэффициенты устойчивости для профиля 190x90x20x2 при разных методах расчета

$m_{x,ef}^0$	$\lambda_y$							
	1		2		3		5	
	$\varphi_{пр,ef}$	$\varphi_{пр,ef}^{МКЭ}$	$\varphi_{пр,ef}$	$\varphi_{пр,ef}^{МКЭ}$	$\varphi_{пр,ef}$	$\varphi_{пр,ef}^{МКЭ}$	$\varphi_{пр,ef}$	$\varphi_{пр,ef}^{МКЭ}$
0.1	0.58	0.528	0.536	0.504	0.443	0.473	0.246	0.276
0.5	0.46	0.426	0.433	0.413	0.376	0.399	0.221	0.251
1	0.364	0.344	0.346	0.337	0.311	0.326	0.19	0.223
2	0.258	0.257	0.25	0.241	0.232	0.236	0.156	0.184
4	0.165	0.163	0.161	0.151	0.153	0.148	0.117	0.137
6	0.121	0.12	0.118	0.11	0.113	0.108	0.094	0.105
10	0.077	0.077	0.076	0.072	0.074	0.071	0.068	0.072

Таблица № 2

Соотношение  $1 - \varphi_{пр,ef} / \varphi_{пр,ef}^{МКЭ}$  для профиля 190x90x20x2

$m_x^0$ при $m_{y,сл}^0$	$\lambda_y$			
	1	2	3	5
0.1	-9.94%	-6.44%	6.26%	10.99%
0.5	-7.99%	-4.81%	5.68%	11.93%
1	-5.86%	-2.64%	4.67%	14.66%
2	-0.47%	-3.73%	1.60%	15.18%
4	-1.04%	-6.97%	-3.26%	14.84%
6	-0.88%	-7.04%	-4.28%	10.30%
10	0.18%	-5.00%	-4.54%	5.01%

## Заключение

Объектом исследования данной работы были стержневые элементы из тонкостенных холодногнутох профилей, а предметом исследования устойчивость стержневых элементов из тонкостенных холодногнутох профилей. В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи: выполнение анализа соответствия результатов расчета на общую устойчивость легких стальных конструкций по нормативным документам, выполнение анализа потери общей устойчивости тонкостенных холодногнутох профилей с помощью метода конечных элементов, определение коэффициентов потери общей устойчивости для легких стальных тонкостенных конструкций с помощью программного комплекса, сравнительный анализ численно–аналитического метода и метода конечных элементов, уточнение методики расчета устойчивости легких стальных элементов.

Уточненная методика расчета позволяет ускорить процесс решения задач общей устойчивости легких стальных элементов и достоверно оценивать утойчивость элементов конструкции. Разработанные алгоритмы и методики дают результаты в безразмерных параметрах в табличном и графическом виде, которые соответствуют концепциям, заложенных в нормативных документах. Элементы конструкций из холодногнутох профилей все больше используются при построении малоэтажных зданий из–за малого веса и эффективности при транспортировке и монтаже. Благодаря своим характеристикам, они находятся в приоритете, в отличии от конструкций сплошного сечения.

Конечно–элементый анализ потери общей устойчивости тонкостенных холодногнутох стержней помощью программного комплекса позволяет легко и быстро получить коэффициенты потери общей устойчивости для легких стальных тонкостенных конструкций. При сравнении таблицы 1 и

---

таблиц 2 данной работы, можно сказать, что обратный численно–аналитический метод расчета достаточно хорошо согласуется с методом конечных элементов по программе ANSYS. В случае маленьких эксцентриситетов, когда фактическая редукция близка к редукции при центральном сжатии, результаты незначительно отличаются. Можно сказать, что пространственные перемещения незначительно влияют на устойчивость. Данный метод позволяет без больших затрат времени получать коэффициенты потери общей устойчивости для стержневых элементов из холодногнутых профилей. При задании геометрии сечения программа автоматически выполняет расчет, на основе которого можно составить сводную таблицу коэффициентов потери устойчивости. Таблица этих коэффициентов послужит для проведения дальнейших расчетов.

### Литература

1. Смирнов М.О. Совершенствование обратного численно–аналитического метода расчета ЛСТК на устойчивость при внецентренном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2021. №1(84). С. 46-52. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52)
2. Белый Г.И. К расчету на прочность стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций при многопараметрическом нагружении // Промышленное и гражданское инженерство. 2019. №75. С. 13-17. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-4-13-17](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-4-13-17)
3. Белый Г.И. Новые положения в инженерной методике расчета на устойчивость стальных стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей // Вестник гражданских инженеров. 2017. №61. С. 75-80. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-2-75-80](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-2-75-80)
4. Белый Г.И. К расчету на устойчивость стержневых элементов конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей // Вестник гражданских инженеров. 2016. №56. С. 46–51. URL:



vestnik.spbgasu.ru/magazine-issue/no-3-56-iyun-2016-vestnik-grazhdanskih-inzhenerov

5. Белый Г.И. Развитие методов расчета стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2020. №80. С. 43–54. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-3-43-54](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-3-43-54)

6. Vatin N., Sinelnikov A., Garifullin M., Trubina D. Simulation of cold-formed steel beams in global and distortional buckling // Applied Mechanics and Materials. 2014. №633-634. pp. 43–54. URL: [doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.1037](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.1037)

7. Rybakov V., Jos V., Raimova I., Kudryavtsev K. Modal analysis of frameless arches made of thin-walled steel profiles // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing. 2020. №883. 012197. URL: [doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012197](https://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012197)

8. Lalin V.V., Rybakov V.A., Diakov S.F., Kudinov V.V., Orlova E.S. The semi-shear theory of V.I. Slivker for the stability problems of thin-walled bars // Magazine of Civil Engineering. 2019. №87. pp. 66–79. URL: [doi.org/10.18720/MCE.87.6](https://doi.org/10.18720/MCE.87.6)

9. Garifullin M., Nackenhorst U. Computational analysis of cold-formed steel columns with initial imperfections // Procedia Engineering. 2015. №117. pp. 1073–1079. URL: [doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.239](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.239)

10. Trubina D., Abdulaev D., Pichugin E., Garifullin M. The loss of local stability of thin-walled steel profiles // Applied Mechanics and Materials. 2014. №633–634. pp. 1052–1057. URL: [doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.1052](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.1052)

11. Белый Г.И. Аналитически-численный метод расчета на устойчивость стержневых элементов легких стальных тонкостенных

конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2020. №81. С. 39–46. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46)

12. Смирнов М.О. Совершенствование методики определения редуцированных сечений стержней из холодногнутых профилей при однопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2020. №79. С. 60–67. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-2-60-67](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-2-60-67)

13. Белый Г.И. «Обратный» метод расчета усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечений // Вестник гражданских инженеров. 2020. №6. С. 46–55. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-55](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-55)

14. Sinelnikov A.S. Reticular–stretched thermoprofile: A numerical and analytical study // Magazine of Civil Engineering. 2015. №57. pp. 74–85 and 112–115. URL: [doi.org/10.5862/MCE.57.7](https://doi.org/10.5862/MCE.57.7)

15. Rybakov V., Dyakov S., Sovetnikov D., Azarov A., Ivanov S. Finite elements apparatus in thin–walled rod dynamics problems // MATEC Web of Conferences. 2018. №245. 08007. URL: [doi.org/10.1051/mateconf/201824508007](https://doi.org/10.1051/mateconf/201824508007)

16. Горев В.В. Экспериментальное исследование работы несущих металлических конструкций на основе тонколистового проката // Металлические конструкции. Работы школы профессора Н.С. Стрелецкого. - М.: МГСУ. 1995. С.146–148.

17. Зверев В.В. О технологичности стропильных ферм из холодногнутых оцинкованных профилей производства ООО «ЛАСАР» // Вестник центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 1974. №6. С. 61–65.

18. Basov K.A. ANSYS I LMS Virtual Lab. Geometric modeling 240p. URL: [dokumen.pub/ansys-lms-virtual-lab.html](https://dokumen.pub/ansys-lms-virtual-lab.html).

## References

1. Smirnov M.O. Vestnik grazhdanskix inzhenerov. 2021. №1(84). pp. 46-52. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52)
  2. Bely`j G.I. Promy`shlennoe i grazhdanskoe inzhenerstvo. 2019. №75. pp. 13-17. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-4-13-17](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-4-13-17)
  3. Bely`j G.I. Vestnik grazhdanskix inzhenerov. 2017. №61. pp. 75-80. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-2-75-80](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-2-75-80)
  4. Bely`j G.I. Vestnik grazhdanskix inzhenerov. 2016. №56. pp. 46–51. URL: [vestnik.spbgasu.ru/magazine-issue/no-3-56-iyun-2016-vestnik-grazhdanskih-inzhenerov](http://vestnik.spbgasu.ru/magazine-issue/no-3-56-iyun-2016-vestnik-grazhdanskih-inzhenerov)
  5. Bely`j G.I. Vestnik grazhdanskix inzhenerov. 2020. №80. pp. 43–54. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-3-43-54](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-3-43-54)
  6. Vatin N., Sinelnikov A., Garifullin M., Trubina D. Applied Mechanics and Materials. 2014. №633-634. pp. 43–54. URL: [doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.1037](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.1037)
  7. Rybakov V., Jos V., Raimova I., Kudryavtsev K. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing. 2020. №883. 012197. URL: [doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012197](https://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012197)
  8. Lalin V.V., Rybakov V.A., Diakov S.F., Kudinov V.V., Orlova E.S. Magazine of Civil Engineering. 2019. №87. pp. 66–79. URL: [doi.org/10.18720/MCE.87.6](https://doi.org/10.18720/MCE.87.6)
  9. Garifullin M., Nackenhorst U. Procedia Engineering. 2015. №117. pp. 1073–1079. URL: [doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.239](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.239)
  10. Trubina D., Abdulaev D., Pichugin E., Garifullin M. Applied Mechanics and Materials. 2014. №633–634. pp. 1052–1057. URL: [doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.1052](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.1052)
  11. Bely`j G.I. Vestnik grazhdanskix inzhenerov. 2020. №81. pp. 39–46. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46)
-



12. Smirnov M.O. Vestnik grazhdanskix inzhenerov. 2020. №79. pp. 60–67. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-2-60-67](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-2-60-67)
13. Bely`j G.I. Vestnik grazhdanskix inzhenerov. 2020. №6. pp. 46–55. URL: [doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-55](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-55)
14. Sinelnikov A.S. Magazine of Civil Engineering. 2015. №57. pp. 74–85 and 112–115. URL: [doi.org/10.5862/MCE.57.7](https://doi.org/10.5862/MCE.57.7)
15. Rybakov V., Dyakov S., Sovetnikov D., Azarov A., Ivanov S. MATEC Web od Conferences. 2018. №245. 08007. URL: [doi.org/10.1051/matecconf/201824508007](https://doi.org/10.1051/matecconf/201824508007)
16. Gorev V.V. Metalicheskie konstrukcii. Raboty` shkoly` professora N.S. Streleczkogo. M.: MGSU. 1995. pp.146–148
17. Zverev V.V. Vestnik central`nogo regional`nogo otdeleniya Rossijskoj akademii arxitektury` i stroitel`ny`x nauk. 1974. №6. pp. 61–65.
18. Basov K.A. ANSYS I LMS Virtual Lab. Geometric modeling 240p. URL: [dokumen.pub/ansys-lms-virtual-lab.html](https://dokumen.pub/ansys-lms-virtual-lab.html).