

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.014, 624.075

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-2-8-20

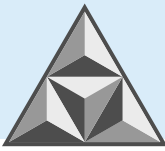
Расчет редуцированных геометрических характеристик легких стальных тонкостенных конструкций с автоматизацией в электронных таблицах

И.В. Лапин, С.А. Тумаков, Г.Н. Голубь

Иван Владимирович Лапин, Сергей Анатольевич Тумаков, Григорий Николаевич Голубь*

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*lapinivan16@yandex.ru, sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru**



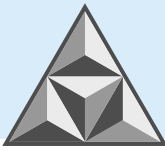
Рассмотрены вопросы теории и практические приемы расчета конструкций каркаса из легких стальных тонкостенных конструкций с учетом редуцирования сечений вследствие появления локальных зон потери устойчивости. Проведен обзор технической и научной литературы, посвященной расчету стальных тонкостенных конструкций с учетом редуцирования сечения. Подобраны методы расчета таких конструкций, соответствующие их реальному поведению под действием нагрузки. Разработаны и апробированы инженерные приемы расчета редуцированных геометрических характеристик сечений тонкостенных стальных элементов в соответствии с актуальными нормами по проектированию с применением функционала программных средств электронной табличной обработки. Показаны практические результаты расчета геометрических характеристик редуцированного сечения по разработанному алгоритму в сравнении с другими программными средами расчета характеристик сечений конструкций.

Ключевые слова: тонкостенные стальные элементы, редукция сечений, электронная таблица

Для цитирования:

Лапин И.В., Тумаков С.А., Голубь Г.Н. Расчет редуцированных геометрических характеристик легких стальных тонкостенных конструкций с автоматизацией в электронных таблицах // *Умные композиты в строительстве*. 2026. Т. 7, вып. 2. С. 8-20.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7391/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-2-8-20



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-2-8-20

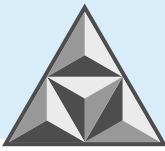
Calculation of reduced geometric characteristics of lightweight thin-walled steel structures using automated spreadsheet analysis

I.V. Lapin, S.A. Tumakov, G.N. Golub'

Ivan Vladimirovich Lapin, Sergey Anatolevich Tumakov, Grigoriy Nikolaevich Golub'*

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

*lapinivan16@yandex.ru, sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru**



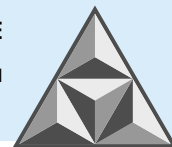
This paper examines the theory and practical methods for the design of lightweight steel thin-walled frame structures, taking into account the reduction in cross-sectional area due to the occurrence of local zones of instability. The authors have reviewed the technical and scientific literature on the design of thin-walled steel structures, taking into account section reduction. Methods for calculating such structures have been selected, corresponding to their actual behavior under the action of loads. The authors have developed and tested engineering methods for calculating the reduced geometric characteristics of thin-walled steel members in accordance with current design standards, utilising spreadsheet software functionality. The paper presents practical results of calculating the geometric characteristics of reduced cross-sections using the developed algorithm, in comparison with other software environments for calculating characteristics sections of structures.

Keywords: thin-walled steel elements, section reduction, spreadsheet

For citation:

Lapin I.V., Tumakov S.A., Golub' G.N. Calculation of reduced geometric characteristics of lightweight thin-walled steel structures using automated spreadsheet analysis // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 2. P. 8-20. URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/7391/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-2-8-20



ВВЕДЕНИЕ

Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) проектируют и изготавливают из холодногнутого элемента, толщина которых не превышает 4 мм. В настоящее время они достаточно востребованы в промышленном и гражданском строительстве. Примеры каркасов зданий приведены на рис. 1.



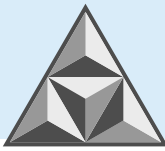
Рис. 1. Примеры применения легких стальных тонкостенных конструкций

Fig. 1. Examples of the use of lightweight, thin-walled steel structures

Основными достоинствами таких конструкций, отмеченными в [1], являются высокая заводская готовность, практически полное отсутствие «мокрых процессов», а также сравнительно малая металлоемкость, которая подтверждается при сопоставлении удельного расхода металла для различных типов каркаса [2]. Особенность работы тонкостенного стального элемента – локальная потеря устойчивости сжатых частей поперечного сечения. Этот аспект необходимо учитывать как при расчете несущей способности элемента, так и при определении фактических геометрических характеристик сечения. Требуемые прочностные характеристики элементов ЛСТК обеспечиваются за счет оптимально подобранной формы и размеров поперечного сечения. Для повышения жесткостных характеристик профилей при прокате могут формироваться стандартизированные местные элементы жесткости, препятствующие развитию потери локальной устойчивости сжатых составляющих частей профиля.

Актуальность использования методов расчета эффективных геометрических характеристик тонкостенных стальных элементов обусловлена несовершенством методик, описанных в [3], а также узкой направленностью ввиду специфики работы конструкций малой толщины и рядом принимаемых допущений. Так, в [4, 5] показаны альтернативные методы расчета, позволяющие в значительной степени упростить процесс проектирования ЛСТК. Кроме того, в [5] описывается расчет общей потери устойчивости, производимый обратным численно-аналитическим методом, который, в отличие от методик в своде правил [3], учитывает комплексное воздействие силовых факторов.

Цель настоящей работы – разработка и апробация инженерных методик расчета редуцированных геометрических характеристик сечений тонкостенных стальных элементов согласно нормам проектирования с применением функционала программных средств табличной обработки.



Автоматизированные способы расчета обладают достаточной точностью для инженерных моделей и позволяют существенно сократить продолжительность работ. Так, в [6] описывается расчетная программа, генерирующая таблицу, содержащую коэффициенты общей потери устойчивости, которые позволяют использовать стандартную методику расчета сжатых стальных элементов. Аналог расчета эффективных геометрических характеристик сечений тонкостенных конструкций с применением средств обработки данных в электронных таблицах представлен в [7].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Основные теоретические положения, а также типовые примеры численного расчета редуцированных геометрических характеристик поперечного сечения тонкостенного стального элемента достаточно подробно рассмотрены в пособии [8] к своду правил [3].

В соответствии с требованиями свода правил [3] следует выполнить верификацию применимости расчета на основании максимальных значений отношений габаритных размеров элементов поперечного сечения – высоты h , высоты отгиба s и отношения ширины b к толщине t (см. рис. 2).

Первоначально необходимо определить полные геометрические характеристики поперечного сечения. В настоящей работе рассмотрен точный алгоритм учета влияния зонгиба на данные характеристики; применение его является рациональным ввиду достаточно высокой степени автоматизации вычислений. Геометрические характеристики рассчитываются по стандартным формулам сопротивления материалов.

Теоретические размеры плоских участков поперечного сечения профиля с учетом зонгиба следует определять как расстояние между средними точками соседних угловых элементов, как это показано на рис. 3.

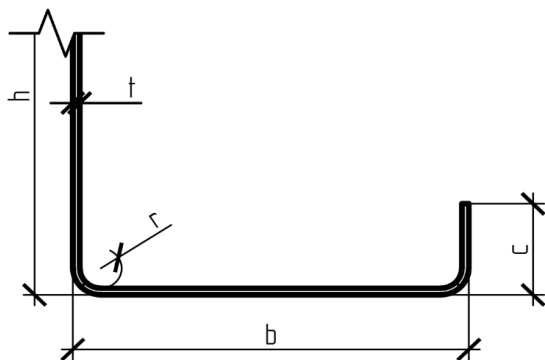


Рис. 2. Буквенное обозначение размеров частей С-образного сечения

Fig. 2. Letters used to indicate the dimensions of parts with a C-shaped cross-section

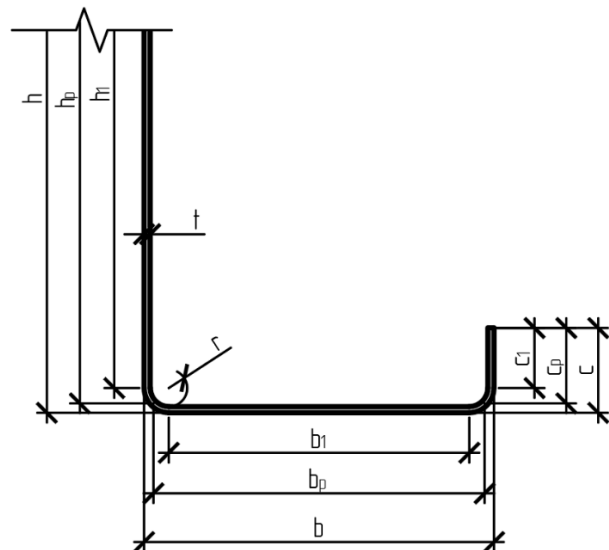
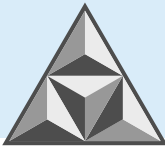


Рис. 3. Теоретические размеры частей С-образного сечения

Fig. 3. Theoretical dimensions of the C-section components

Редукция геометрических параметров элемента реализуется с использованием двух альтернативных подходов – изменением толщины элемента либо, при условии постоянства указанного параметра, изменением его линейных размеров по стандартным формулам [3]:



$$b_{ef} = \rho \cdot b_p, \quad (1)$$

$$t_{ef} = \rho \cdot t_p, \quad (2)$$

где ρ – коэффициент редукиции, рассчитанный по формулам (3), (4) или (5), (6) для сжатых гладких пластин, закрепленных по двум или одной сторонам соответственно.

$$\rho = 1.0 \text{ при } \bar{\lambda}_p \leq 0.673; \quad (3)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p^{-0.055 \cdot (3+\psi)}}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ при } \bar{\lambda}_p > 0.673; \quad (4)$$

$$\rho = 1.0 \text{ при } \bar{\lambda}_p \leq 0.748; \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p^{-0.188}}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ при } \bar{\lambda}_p > 0.748, \quad (6)$$

где $\bar{\lambda}_p$ – условная гибкость пластины, при этом

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cr}}}, \quad (7)$$

где R_y – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести, определяемое по типовой формуле;

σ_{cr} – критическое напряжение потери устойчивости пластины.

В рамках моделирования напряженно-деформированного состояния элемента поперечного сечения профиля условную гибкость пластины определяют с учетом допущения о линейности эпюры напряжений (рис. 4).

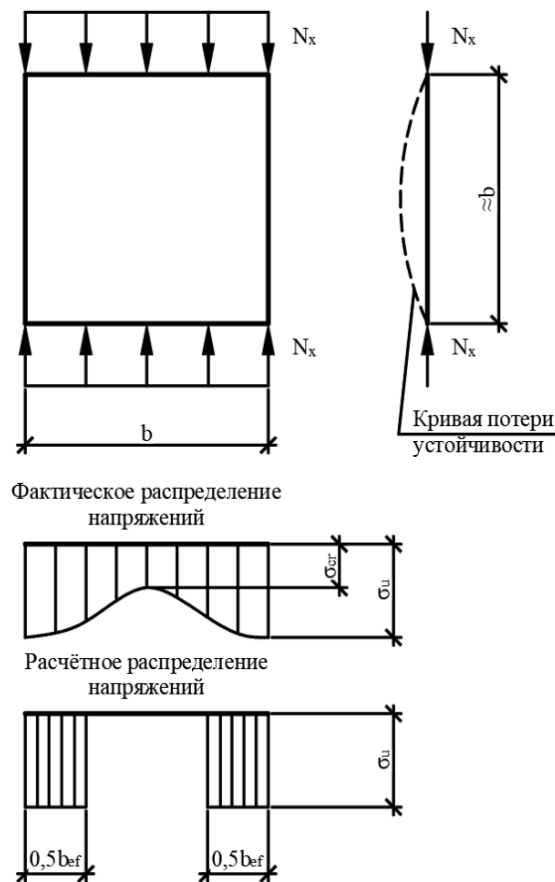
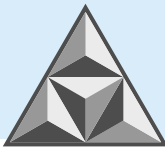


Рис. 4. Распределение напряжений в сжатой пластине с параллельными закрепленными гранями

Fig. 4. Stress distribution in a compressed plate with parallel fixed faces



Количественная оценка распределения напряжений ψ , осуществляемая через отношение их значений на противоположных краях пластины, позволяет вычислить коэффициент k_σ , учитывающий влияние условий закрепления и характер напряжений.

Впервые экспериментально-теоретическая методика расчета сжатых стальных пластин в закритической стадии работы, основанная на исключении частей сжатой пластины, не способных воспринимать приложенную нагрузку, предложена *T. von Karman* [9].

В данной работе рассматривается более предпочтительный, с точки зрения нормативно-технической документации, метод расчета редукции в сечении, в котором принимается допущение равенства максимальных реальных напряжений пределу текучести стали ($\sigma_{com} = R_y$).

В соответствии с [3] расчет критического напряжения местной потери устойчивости сжатой пластины выполняется по формуле:

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^2}, \quad (8)$$

где E – модуль упругости стали;

ν – коэффициент Пуассона.

При наличии в гнутом профиле дополнительных продольных элементов жесткости необходимо определить степень их влияния на редукцию сечения в целом. В [3] данные элементы рассматриваются как сжатые стержни, раскрепляемые по длине упругоподатливой связью K (см. рис. 5).

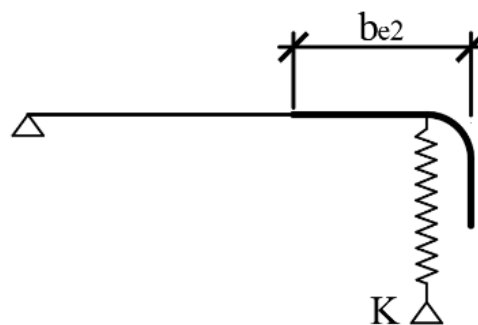


Рис. 5. Расчетная схема конечного элемента жесткости сжатой пластины

Fig. 5. Design of the end stiffening element arranged in a compressed plate

Согласно основным положениям теории упругости, жесткость связи K на единицу длины регламентируется как отношение величины погонной единичной нагрузки u к соответствующему линейному перемещению δ .

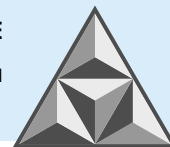
Критическое напряжение потери устойчивости конечного элемента жесткости в упругой стадии работы рассчитывается:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{\sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}, \quad (9)$$

где I_s и A_s – геометрические характеристики начального сечения конечного элемента жесткости (момент инерции и площадь);

ν – коэффициент Пуассона.

На основании жесткости связи K , рассчитываемой по стандартным формулам свода правил [3], вычисляется коэффициент понижения несущей способности (χ_d), позволяющий учесть потерю устойчивости формы сечения.



$$\chi_d = 1,0 \text{ при } \bar{\lambda}_d \leq 0,65; \quad (10)$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d \text{ при } 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38; \quad (11)$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \text{ при } \bar{\lambda}_d \geq 1,38. \quad (12)$$

Коэффициент снижения несущей способности необходим для расчета конечных редуцированных характеристик ввиду уменьшения толщины краевого элемента.

$$t_{red} = \chi_d \cdot t. \quad (13)$$

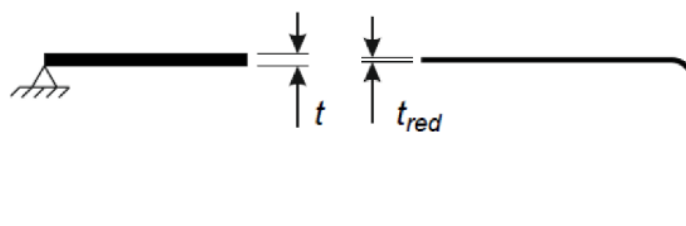


Рис. 6. Окончательная расчетная схема конечного элемента жесткости сжатой пластины

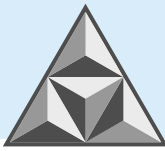
Fig. 6. Final version of the end element scheme for ensuring the rigidity of a compressed plate

Современный рынок программного обеспечения располагает рядом сертифицированных программных решений, предназначенных для расчета легких стальных тонкостенных конструкций, соответствующих требованиям действующей нормативно-технической документации. Программа *StatUs*, предназначенная для оценки прочности элементов систем вентилируемых фасадов, имеет функционал расчета редукиции сечения составных элементов в соответствии с отечественными сводами правил. Облачный калькулятор *LSTK.STEEL-ELEMENTS.RU* позволяет определять прочностные характеристики центрально сжатого и изгибаемого элемента на основании известных требований [3]. Кроме того, имеется комплекс *CFSTEEL*, в функционал которого входит расчет геометрических характеристик тонкостенных элементов, определение прочности стержней, ферм и прогонов из стальных тонкостенных холодногнутых профилей, производимый в соответствии с российскими нормами [3], Европейскими нормами EN 1993-1-3, EN 1993-1-5 и Североамериканскими нормами *North American Specification AISI S100*. При этом программы могут быть в некоторой степени заменены стандартными электронными таблицами, входящими в традиционный состав офисного программного обеспечения [12].

Электронные таблицы являются эффективным инструментом для проведения расчетов в различных сферах [8, 9]. В профессиональной деятельности строителей их применяют для определения редуцированных геометрических характеристик с последующей возможностью использования стандартных программ расчета конструктивных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Продemonстрируем выполнение расчета эффективных геометрических характеристик сечения тонкостенного профиля с применением инструментария электронных таблиц. В предлагаемом варианте алгоритма расчета характеристик редуцированного сечения



применяется метод расчета по критическим напряжениям, а также использован итерационный расчет коэффициента снижения несущей способности (χ_d).

На рис. 7 представлены поля таблицы с исходной информацией.

Элемент:	профиль		на выбор (профиль/накладка/стык)	
Коэффициент надёжности по материалу:			1,05	
Марка стали:	350	Н/мм ²		
Модуль Юнга:	210000	Н/мм ²		
Коэффициент Пуассона (для стали):	0,3			
$R_y=$	333,3333	Н/мм ²		
$h=$	300	мм		
$b=$	90	мм		
$c=$	21,8	мм		
$r_{ном}=$	4,76	мм		
$t_{ном}=$	1,6	мм		
$t_{мр}=$	0,04	мм	в данном конкретном случае, для цинкового покрытия класса 275	

Рис. 7. Поле таблицы для ввода исходной информации

Fig. 7. Table field for input of initial information

При вводе данных из полей таблицы автоматически обновляются значения в ячейках проверки применимости СП 260.1325800.2023 [3] (см. рис. 8) и итог расчета геометрических характеристик поперечного сечения (см. рис. 9).

Проверка требований пунктов 7.1.1, 7.1.2 СП 260.1325800.2023				
$b/t=$	57,69231	\leq	60	
$c/t=$	13,97436	\leq	50	
Вывод:	допустимо применение СП 260.1325800.2023			

Рис. 8. Поле таблицы для проверки применимости

Fig. 8. Table field for checking applicability

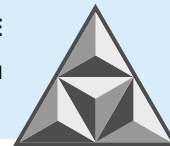
Геометрические характеристики профиля					
$r=$	4,78	мм	$b_p=$	85,14303	мм
$x_1=$	3,931514	мм	$c_p=$	19,37151	мм
$b_1=$	77,28	мм	$h_p=$	295,143	мм
$c_1=$	15,44	мм	$A_g=$	791,745	мм ²
$h_1=$	287,28	мм	(сечение без цинкового покрытия)		

Рис. 9. Полные геометрические характеристики поперечного сечения

Fig. 9. Full geometric characteristics of the cross-section

В данной работе осуществляется постоянная верификация геометрических характеристик поперечного сечения, рассчитанных в системе автоматизированного проектирования (САПР) типа CAD при помощи команды «МАСС-ХАР» и сателлите программного комплекса SCAD TОНУС.

При расчете редукации в элементе необходимо определить напряженное состояние в полном сечении, а после принять максимальное значение реальных напряжений равным пределу текучести применяемой стали, но при определении коэффициентов ψ и k_0 принимают реальные соотношения напряжений. На основании типового соотношения значений напряжений, с учетом СП 260.1325800.2023 [3], подобрана схема и формулы для определения эффективных размеров сечения (рис. 10).



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Мушинский А.Н., Зимин С.С.** Строительство быстровозводимых зданий и сооружений // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. № 4 (31). С. 182-193.
2. **Корсун Н.Д., Простакишина Д.А.** Применение легких тонкостенных конструкций как способ энергосбережения в стальном строительстве // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 5 (76). С. 83-89. DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-83-89.
3. **СП 260.1325800.2023.** Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования [Электронный ресурс]: свод правил / Минстрой России; разработчик: АО «ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова». Москва, 2023. 114 с. Режим доступа: [<https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/364390/>] (дата обращения: 06.03.2026). – Зарегистрировано в Росстандарте.
4. **Белый Г.И.** Аналитически-численный метод расчета на устойчивость стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 4 (81). С. 39-46. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46.
5. **Белый Г.И., Смирнов М.О.** Обратный численно-аналитический метод расчета легких стальных тонкостенных стержневых элементов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 3. С. 57-68. DOI 10.33622/0869-7019.2021.03.57-68.
6. **Смирнов М.О.** Совершенствование обратного численно-аналитического метода расчета ЛСТК на устойчивость при внецентренном сжатии // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 1 (84). С. 46-52. DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52.
7. **Смирнов М.О.** Совершенствование методики определения редуцированных сечений стержней из холодногнутых профилей при однопараметрическом нагружении // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 2 (79). С. 60-67. DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-2-60-67.
8. **Расчет элементов из стальных гнутых профилей** (к СП 260.1325800.2016): пособие / Ассоциация «Объединение участников бизнеса по развитию стального строительства». Москва, 2019.
9. **Von Kármán T., Sechler E.E., Donnell L.H.** The Strength of Thin Plates in Compression // *Transactions ASME*. 1932. Vol. 54. APM 54–5.
10. **Дуркина Н.В.** О применении электронных таблиц Microsoft Excel в расчетах различных строительных конструкций // *Научные чтения: Сб. мат. науч.-практ. конф. профессорско-препод. состава Сыктывкарского лес. ин-та по итогам науч.-исслед. работы в 2008 г.* Сыктывкар, 2009. С. 564-566.
11. **Демидова О.Л., Малинина Н.Л.** Подготовка студентов технических специальностей МАИ по дисциплине «Численные методы» с применением электронных таблиц Excel // *Мат. XIX Межд. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015)*. Алушта, 2015. С. 718-719.
12. **Тумаков С.А., Голубь Г.Н.** Расчет оснований массивных подпорных стен с применением электронных таблиц // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5. Вып. 4. С. 8-20. DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-8-20.

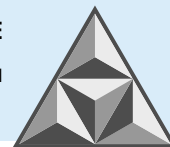
Поступила в редакцию 10.04.2026

Одобрена после рецензирования 29.04.2026

Принята к опубликованию 27.05.2026

REFERENCES

1. **Mushinskii, A.N. and Zimin, S.S.** (2015), Construction of prefabricated buildings and structures, *Construction of unique buildings and structures*. no. 4 (31), pp. 182-193 (in Russian).
2. **Korsun, N.D. and Prostakishina, D.A.** (2019), Application of lightweight thin-walled structures as a method of energy saving in steel construction, *Bulletin of civil engineers*, no. 5 (76), pp. 83-89 (in Russian). DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-5-83-89.



3. **SP 260.1325800.2023.** Thin-walled steel structures made of cold-formed galvanized sections and corrugated sheets. Design rules [Electronic resource]: set of rules / Ministry of Construction of the Russian Federation; developer: JSC TsNIIPSK im. N.P. Melnikov. Moscow, 2023. 114 p. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/364390/> (accessed 06.03.2026). - Registered by Rosstandart.
4. **Belyi, G.I.** (2020), Analytical and numerical method for calculating the stability of rod elements of light steel thin-walled structures, *Bulletin of civil engineers*, no. 4 (81), pp. 39-46 (in Russian). DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-39-46.
5. **Belyi, G.I. and Smirnov, M.O.** (2021), Inverse numerical-analytical method for calculating light steel thin-walled rod elements, *Industrial and Civil Engineering*, no. 3, pp. 57-68 (in Russian). DOI 10.33622/0869-7019.2021.03.57-68.
6. **Smirnov, M.O.** (2021), Improvement of the inverse numerical-analytical method for calculating LSTC stability under eccentric compression, *Bulletin of Civil Engineers*, no. 1 (84), pp. 46-52 (in Russian). DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52.
7. **Smirnov, M.O.** (2020), Improving the methodology for determining reduced sections of rods made of cold-formed sections under single-parameter loading, *Bulletin of Civil Engineers*, no. 2 (79), pp. 60-67 (in Russian). DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-2-60-67.
8. **Calculation of elements made of bent steel sections (to SP 260.1325800.2016):** manual / Association "Association of business participants for the development of steel construction", Moscow, 2019.
9. **Von Kármán, T., Sechler, E. E. and Donnell, L.H.** (1932), The Strength of Thin Plates in Compression, *Transactions ASME*, vol. 54, APM 54-5.
10. **Durkina, N.V.** On the use of Microsoft Excel spreadsheets in calculations of various building structures, *Proc.: Collection of papers from the scientific and practical conference of the academic staff of the Syktyvkar Forestry Institute, based on the results of research work in 2008*, Syktyvkar, 2009, pp. 564-566 (in Russian).
11. **Demidova, O.L. and Malinina, N.L.** Training of students of technical specialties of MAI in the discipline "Numerical Methods" using Excel spreadsheets, *Proc. XIX Int. Conf. on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (VMSPPS'2015)*, Alushta, 2015, pp. 718-719 (in Russian).
12. **Tumakov, S.A. and Golub', G.N.** (2024), Calculation of massive retaining wall foundations using spreadsheets, *Smart Composite in Construction*, vol. 5, iss. 4, pp. 8-20 (in Russian). DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-8-20.

Received 10.04.2026

Approved 29.04.2026

Accepted 27.05.2026