

УДК: 624.014.2:624.046.3
DOI: 10.52409/20731523_2022_4_108
EDN: JLMWXF



Расчет устойчивости сжатых тонкостенных стержней С-образного сечения

Д.Ф. Кинзябулатова¹, И.А. Порываев¹, И.В. Недосеко¹

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Легкие стальные тонкостенные конструкции активно используются при строительстве быстровозводимых зданий и сооружений различного назначения. Применение таких конструкций требует подробного анализа напряженно-деформированного состояния, особенно при расчетах на устойчивость. Цель исследования: сравнение методик расчетов сжатых тонкостенных стержней С-профиля по методике нормативной документации и по проведенным численным экспериментам в программно-вычислительном комплексе Siemens FEMAP 11.4.2 с NX Nastran. Численный эксперимент проводится с учетом геометрической и физической нелинейностей. Объект исследования – стержни одного сечения с шестью различными длинами. Основными задачами являются определение и сравнение коэффициентов устойчивости, которые определяются основной методикой по СП 260.1325800.2016 и в результате численного моделирования.

Результаты. Сравнение результатов проводится по коэффициентам устойчивости и по формам потери местной устойчивости. При малых значениях гибкости отклонения в результатах не превышает 2%, при значительных значениях гибкости разница в результатах достигает 9,7%.

Выводы. Полученные результаты наглядно показывают, что методика СП 260.1325800.2016 при значительных гибкостях недооценивает несущую способность сжатых стержней. Определение точного значения несущей способности элемента позволит сократить металлоемкость, повысить точность расчетов и приблизить их к реальной работе стержней под нагрузкой.

Ключевые слова: ЛСТК, тонкостенный стержень, устойчивость, метод конечных элементов, геометрическая нелинейность, местная устойчивость.

Для цитирования: Кинзябулатова Д.Ф., Порываев И.А., Недосеко И.В. Расчет устойчивости сжатых тонкостенных стержней С-образного сечения // Известия КГАСУ 2022 №4(62), с.108-117, DOI:10.52409/20731523_2022_4_108, EDN: JLMWXF

Buckling analysis of C-shaped cold-formed profiles

D.F. Kinzyabulatova¹, I.A. Porivaev¹, I.V. Nedoseko¹

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

Abstract: Light steel thin-walled structures are actively used in the construction of quickly erected buildings and structures for various purposes. The use of such structures requires a detailed analysis of the stress-strain state, especially in stability calculations.

The purpose of the study is to compare two methods of computations of compressed thin-walled C-profile rods by the method of normative-legal documentation and by the performed numerical experiments in the Siemens FEMAP 11.4.2 program-computer complex with NX Nastran. The numerical experiment is carried out taking into account geometrical and physical nonlinearities. The objects of the research are rods of the same cross section with six different lengths.

The results are compared by stability coefficients and by forms of local stability loss. For small values of flexibility the deviation in the results does not exceed 2%, for significant values of flexibility the difference in the results reaches 9.7%.

This paper provides evidence that for certain values of flexibility a good convergence of calculation results by analytical method on the basis of methods approved in the standards and the results of numerical experiment in the calculation software based on the method of finite elements is achieved.

Keywords: cold-formed profile, thin-walled members, buckling, finite-element method, geometrical nonlinearity, local buckling.

For citation: D. F. Kinzyabulatova, I. A. Porivaev, I. V. Nedoseko Buckling analysis of C-shaped cold-formed profiles // News KSUAE 2022 №4(62), с.108-117, DOI:10.52409/20731523_2022_4_108, EDN: JLMWXF

1. Введение

Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) применяются в качестве несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений различного назначения. Их основное отличительное свойство – малая металлоемкость в сравнении с конструкциями из черного металла. Это достигается за счет рациональной формы поперечного сечения и использовании высокопрочных марок сталей [1,2]. Тонкостенные стержни имеют толщину не более 4 мм и относятся к 4-ой группе конструктивных элементов. Основные преимущества и недостатки ЛСТК описаны в работах [1-3].

Основная проблема в работе холодногнутого стального элемента, работающих на центральное и внецентренное сжатие-возможность потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения до достижения критической нагрузки (предельного состояния) [4,5]. Это значительно осложняет проведение аналитических расчетов, описанных в работах [6-9]. Поэтому часто исследователи используют метод конечных элементов или натурные испытания [4,5,9,10].

Численные эксперименты проводят в программных комплексах: “SCADOffice” [11,12], “Nastran” с пре-, пост- процессором FeMAP [4], ABAQUES [5], ANSYS [13], ЛИРА [12] и т.д. В них предусмотрена возможность проведения нелинейного расчета на устойчивость тонкостенных стержней практически любой конфигурации. Используют как оболочечные конечные элементы [11-13], так и стержневые с 7-ю степенями свободы. За последние несколько лет активно используются технологии машинного обучения, описанного в работах [14, 15]. В них приводится расчет на устойчивость при использовании нейронных сетей.

В статье [4] на основе проведенных натурных и численных испытаний ЛСТК профилей установлено, что форма потери устойчивости значительно зависит от перфорации поперечного сечения профиля. Также определены формы потери устойчивости для двух основных групп сечений: с перфорацией и без нее.

В работах [7,8] рассмотрены симметричные в 2-х плоскостях профили на центральное и внецентренное сжатие. Описаны методики определения фактического редуцирования обратным методом и приведены результаты аналитического, численного расчетов через коэффициент устойчивости. В данных статьях рассматриваются составные стержни и дважды симметричные стержни, но не рассматриваются одиночные С-профили.

В [16] авторами была определена несущая способность С-профилей с отгибами. По итогам исследования были определены зависимости между значениями критической силы и толщиной металла, высотой стенки, шириной фланцев, длиной стержня. В данной работе есть сравнения с расчетами по Eurocode, СП 260.13258000.2016 и СП 16.13330.2017.

Согласно выше сказанному, можно сформулировать цель исследования – оценить несущую способность центрально-сжатого тонкостенного стержня открытого профиля с одной осью симметрии с помощью аналитического расчета по действующим нормам и с использованием численного эксперимента на ЭВМ.

Задачи исследования:

1. Изучить и выполнить аналитический расчет стержней одного сечения с различными гибкостями на основе методик СП 260.1325800.2016 и СП 16.13330.2017.
2. Провести расчет нелинейной устойчивости стержней в программно-вычислительном комплексе Siemens FEMAP 11.4.2 с NX Nastran.
3. Сравнить полученные результаты по коэффициентам устойчивости.
4. Оценить различные формы потери местной устойчивости и потери устойчивости формы сечений.

2. Материалы и методы

Предлагается рассмотреть методику проверки центрально-сжатого С-профиля по СП 260.1325800.2016, выполнить численный эксперимент в программно-вычислительном комплексе Siemens FEMAP 11.4.2 с NX Nastran.

Для исследования примем стержни 6-ти различных длин:

$$l = \{2800; 3000; 3200; 3400; 3600; 3800\}$$

Толщина профиля $t = 2$ мм.

В качестве материала используется марка оцинкованного проката 390 с расчетным сопротивлением $R_y = 370 \frac{H}{мм^2}$. Для нелинейного расчета используется обобщенная расчетная диаграмма работы строительной стали по Прандтлю. Так как при формовке ЛСТК в местах перегиба возникают остаточные напряжения, эти напряжения компенсируются образованными зонами упрочнения.

При проведении численного эксперимента авторами были проведены расчеты оболочечных моделей в Siemens FEMAP 11.4.2 с NX Nastran. Вычисления проводились в упругой постановке с использованием режима расчета «Buckling» и в нелинейной постановке с использованием режима «Nonliner Static». Исследования проводились с помощью автоматического шагового нагружения и итерационного процесса Ньютона-Рафсона. Конечно-элементная модель стойки выполнялась с использованием четырехугольных конечных элементов типа plate. Толщина, свойства материала и закрепление стержней соответствуют описанным выше данным.

Геометрические характеристики поперечного полного и редуцированного сечений для аналитического расчета определены с использованием программы-сателлиты ВК «SCAD Office» Тонус (приведены на рис. 1 и в табл.1).

В таблице Д.3 СП 16.13330.2017 приведены коэффициенты устойчивости φ_b в зависимости от типов сечений и гибкостей стержней. Вычислены данные значения с учетом начальных несовершенств, приведенных в СП 294.1325800.2017. Для центрально-сжатых элементов начальные несовершенства определяются по формуле:

$$e_b = \frac{i}{20} + \frac{l}{750} \quad (1)$$

где i – радиус инерции сечения для для соответствующей плоскости;

l – геометрическая длина элемента.

При проектировании стержневых элементов наиболее важной является первая форма потери устойчивости и соответствующая ей критическая сила. Её значения для холоднодеформированных С-профилей определялись с использованием нелинейного расчета с учетом начальных несовершенств и больших перемещений. Это связано с тем, что ЛСТК могут терять местную устойчивость до общей потери устойчивости. В рамках данного исследования примем начальные несовершенства в плоскости малой жесткости профиля, расчеты на ЭВМ будут проводиться по деформированной схеме.

Таблица 1

Геометрические характеристики полного сечения

	Параметр	Значение	Единица измерения
A	Площадь поперечного сечения	6,2	см ²
I_x	Момент инерции относительно центральной оси x	300,157	см ⁴
I_y	Момент инерции относительно центральной оси y	21,358	см ⁴
I_ω	Секториальный момент инерции	1389,468	см ⁶
I_t	Момент инерции при свободном кручении	0,083	см ⁴
i_x	Радиус инерции относительно оси x	6,958	см
i_y	Радиус инерции относительно оси y	1,856	см
x_0	Расстояние между центром тяжести и центром сдвига вдоль оси x	-3,442	см
y_0	Расстояние между центром тяжести и центром сдвига вдоль оси y	0	см
x_m	Координата центра масс по оси x	1,29	см
y_m	Координата центра масс по оси y	9	см
Редуцированное сечение. Геометрические характеристики.			
	Параметр	Значение	Единица измерения
A	Площадь поперечного сечения	4,209	см ²
I_x	Момент инерции относительно центральной оси x	283,719	см ⁴
I_y	Момент инерции относительно центральной оси y	16,469	см ⁴
i_x	Радиус инерции относительно оси x	8,21	см
i_y	Радиус инерции относительно оси y	1,978	см
x_m	Координата центра масс по оси x	1,901	см
y_m	Координата центра масс по оси y	9	см

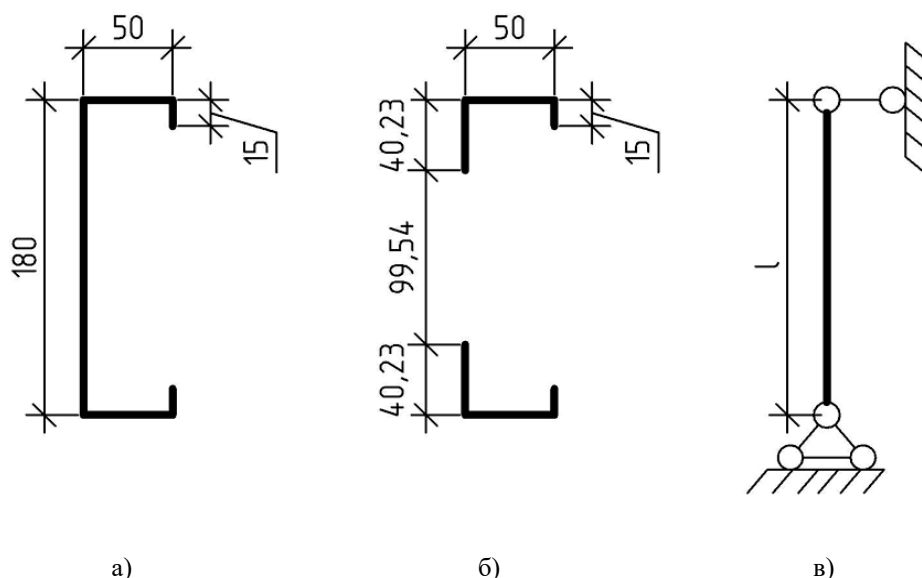


Рис.1. Стержень: а) размеры полного сечения; б) размеры редуцированного (эффективного) сечения; в) расчетная схема стойки (иллюстрация авторов)
 Fig.1 Profile: a) dimensions of the full cross-section; b) dimensions of the reduced (effective) cross-section; c) design diagram of the rack (illustration by the authors)

Условная гибкость для открытого сечения с одной осью симметрии при плоской форме потери устойчивости определяются по формулам 2,3:

$$\bar{\lambda}_x = \frac{l_{ef,x}}{\pi i_x} \sqrt{\frac{R_y \cdot A_{ef}}{E \cdot A_g}} \quad (2)$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{l_{ef,y}}{\pi i_y} \sqrt{\frac{R_y \cdot A_{ef}}{E \cdot A_g}} \quad (3)$$

где E – модуль упругости;

R_y – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию и изгибу;

i_y – радиус инерции полного сечения относительно оси у-у;

i_x – радиус инерции полного сечения относительно оси х-х;

l_{ef} – расчетная длина стержня, для шарнирного закрепления принимается равной длине стержня;

A_{ef} – эффективная площадь поперечного сечения;

A_g – площадь полного поперечного сечения.

При расчете на устойчивость гнутых оцинкованных стержней открытого сечения с одной осью симметрии при центральном сжатии следует дополнительно проверять по изгибно-крутильной форме.

Крутильная форма потери устойчивости вычисляется по формуле:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_\omega}{l_T^2} \right) \quad (4)$$

где $i_0^2 = i_x^2 + i_y^2 + x_0^2 + y_0^2$;

G – модуль сдвига;

I_t – момент инерции при свободном кручении полного сечения;

I_ω – секториальный момент инерции полного сечения;

l_T – расчетная длина элемента, теряющего устойчивость по крутильной форме (примем коэффициент расчетной длины равный 1);

x_0, y_0 – координаты центра сдвига относительно центра тяжести полного поперечного сечения.

Для изгибно-крутильной формы потери устойчивости в упругой стадии работы используется формула:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,x}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,x}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,x}}\right)^2 + 4 \left(\frac{x_0}{i_0}\right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,x}}} \right] \quad (5)$$

где $N_{cr,T}$ – крутильная форма потери устойчивости в упругой стадии (см. формулу 4).

$$\beta = 1 - \left(\frac{x_0}{i_0}\right)^2$$

$N_{cr,x}$ – критическая сила плоской формы потери устойчивости (продольного изгиба) для полного сечения относительно оси х-х по Эйлеру, определяемая по формуле:

$$N_{cr,x} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{g,x}}{l_{ef}^2} \quad (6)$$

где $I_{g,x}$ – момент инерции полного сечения брутто относительно оси х-х;

l_{ef} – расчетная длина стержня, для шарнирного закрепления принимается равной длине стержня.

Условная гибкость при изгибно-крутильной форме потери устойчивости определяется по формуле:

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{ef} \cdot R_y}{\tau_{cr,TF}}} \quad (7)$$

Затем для каждого исследуемого образца определяется предельная гибкость, которая будет использоваться для вычисления коэффициента устойчивости φ_{cn} . В последующем это значение будет сравниваться с полученными в вычислительно-программном комплексе значениями.

$$\bar{\lambda}_{СП} = \pi \cdot \text{MAX}\{\bar{\lambda}_x; \bar{\lambda}_y; \bar{\lambda}_{TF}\} \quad (8)$$

По методике, описанной в своде правил, φ_{cn} определяется в зависимости от $\bar{\lambda}_{СП}$, определенной в (7), по таблице Д.3 СП 16.13330.2017.

Для сравнения с результатами, полученными в результате численного эксперимента, введем значение коэффициента устойчивости $\varphi_{ЭВМ}$. Его вычислим из формулы (9) проверки на устойчивость центрально сжатых стержней.

$$\frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c} \leq 1 \quad (9)$$

где γ_c – коэффициент условия работы (примем равным 1).

Отсюда формула (9) преобразуется:

$$\varphi_{ЭВМ} = \frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} = \frac{N_{ЭВМ}}{A_{ef} R_y} \quad (10)$$

3. Результаты и обсуждение

Результаты расчета по инженерной методике на основе действующих норм и по итогам проведенного численного эксперимента на ЭВМ приведены в табл. 2 и на рис. 2,3.

Таблица 2

Результаты расчетов

$l, \text{мм}$	$e_b, \text{мм}$	$N_{cr,x}, \text{кН}$	$N_{cr,T}, \text{кН}$	$N_{cr,TF}, \text{кН}$	$\bar{\lambda}_{СП}$	φ_{cn}	$N_{ЭВМ}, \text{кН}$	$\varphi_{ЭВМ}$	$\Delta, \%$
2800	4,661	778,394	66,854	65,727	4,943	0,294	45,809	0,294	0,00
3000	4,928	678,068	59,564	58,535	5,296	0,263	40,162	0,258	-1,94
3200	5,195	595,956	53,597	52,649	5,649	0,237	37,031	0,238	0,42
3400	5,461	527,907	48,652	47,769	6,002	0,211	33,346	0,214	1,40
3600	5,728	470,880	44,509	43,678	6,355	0,189	29,779	0,191	1,05
3800	5,995	422,618	41,002	40,215	6,708	0,169	23,939	0,154	-9,7

В табл. 2 разница вычислена по формуле (11).

$$\Delta = \left(1 - \frac{\varphi_{сн}}{\varphi_{ЭВМ}}\right) * 100\% \quad (11)$$

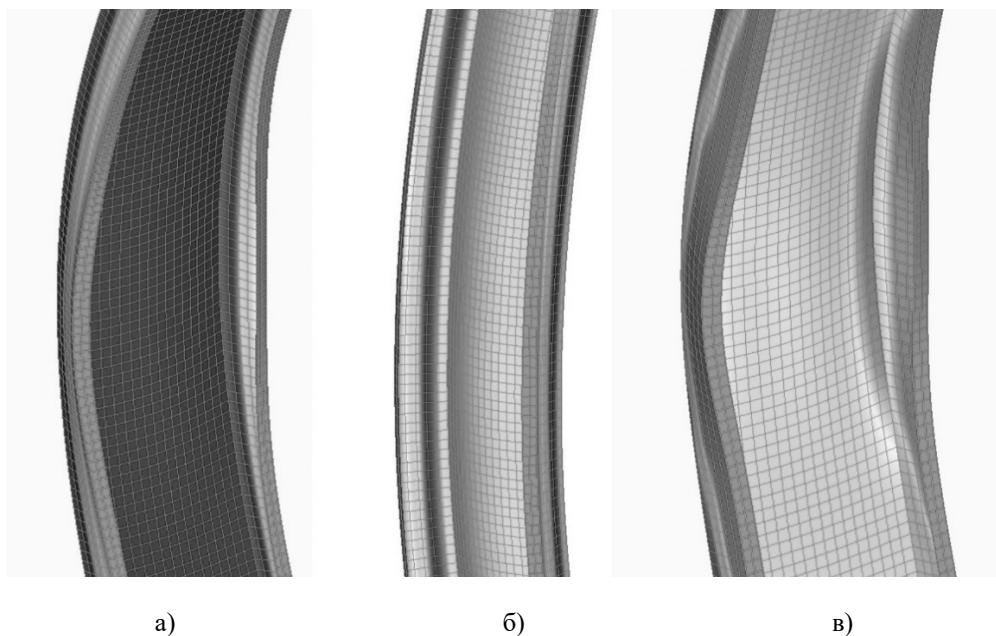


Рис.2. Деформирование контура сечения профилей с длиной: а) $l=2800$ мм; б) $l=3000$ мм; в) $l=3200$ мм (иллюстрация авторов)
 Fig.2. Deformation of the contour section of profiles with length: а) $l=2800$ mm; б) $l=3000$ mm; в) $l=3200$ mm (illustration by the authors)

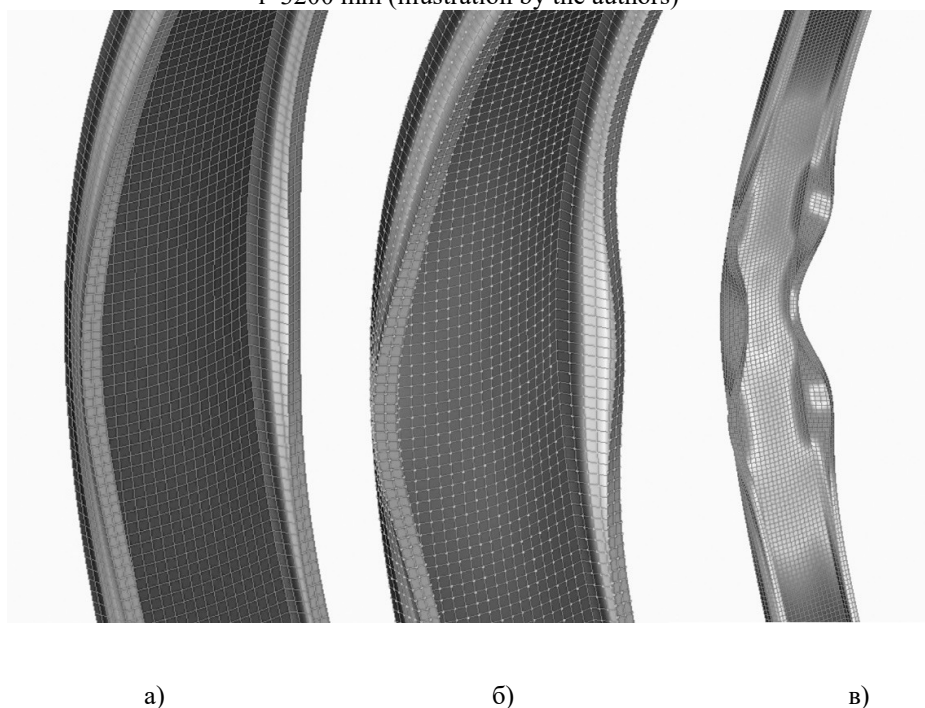


Рис.3. Деформирование контура сечения профилей с длиной: а) $l=3400$ мм; б) $l=3600$ мм; в) $l=3800$ мм (иллюстрация авторов)
 Fig.3. Deformation of the contour of the section sections with length: а) $l=3400$ mm; б) $l=3600$ mm; в) $l=3800$ mm (illustration by the authors)

По результатам табл. 2 построим график зависимости коэффициентов снижения допустимого напряжения, найденных по описанным выше методикам, от значений гибкостей. График приведен на рис.4.

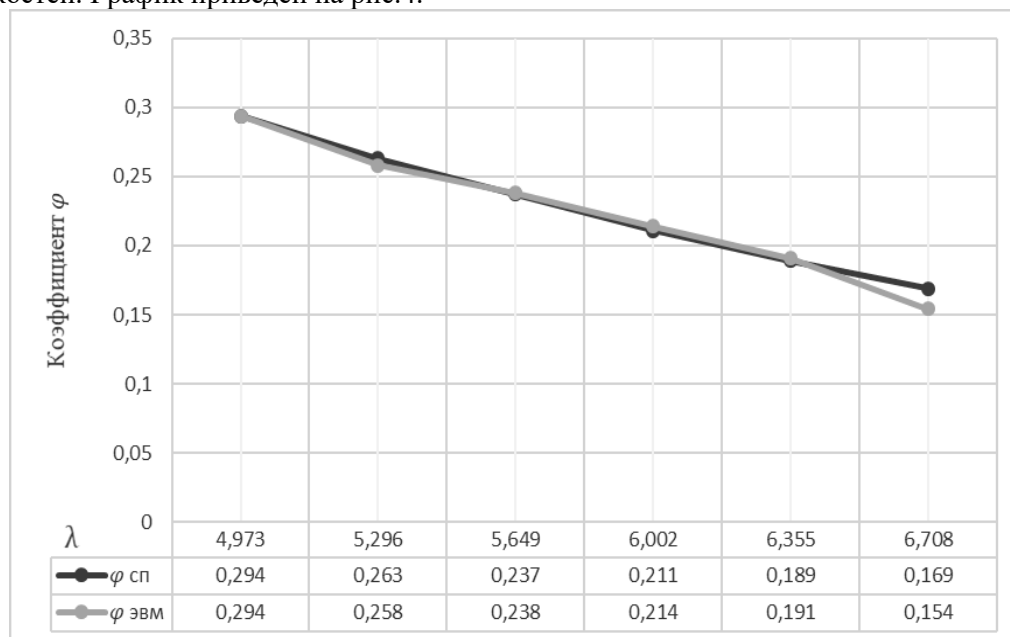


Рис.4.График $\varphi_{сп}(\bar{\lambda}_{СП})$ и $\varphi_{ЭВМ}(\bar{\lambda}_{СП})$ (иллюстрация авторов)
 Fig.4 Graph $\varphi_{сп}(\bar{\lambda}_{СП})$ and $\varphi_{ЭВМ}(\bar{\lambda}_{СП})$ (illustration by the authors)

На основании проведенных расчетов и исследований устойчивости тонкостенного С-профиля получены значения критических сил и коэффициентов устойчивости.

Установлено, что при определенных значениях гибкостей достигается хорошая сходимость результатов расчетов аналитическим методом на основе утвержденных в нормах методик и результатов проведенного численного эксперимента в расчетном программном комплексе на основе метода конечных элементов.

Основные результаты исследования заключаются в следующем:

1. При малых значениях гибкостей погрешность вычислений по аналитическому и численному методам меньше 2%. Значит, при расчете несущей способности сжатых стержней при незначительных гибкостях достаточно использовать методику, описанную в актуальных сводах правил. Нет необходимости проводить трудоемкие вычисления на ЭВМ.
2. При значительном значении гибкости при $l=3800$ мм погрешность вычислений резко возрастает, но не превышает 10%. Это можно объяснить тем, что при увеличении значений гибкости коэффициент устойчивости в нормативно-технической документации был вычислен по методу Эйлера с коэффициентом надежности 1,3. Данный прием был использован для того, чтобы ограничить прогибы сжатых стержней при значительных длинах и учесть упругопластическую работу стержней.
3. По рис. 2 можно сделать вывод, что потеря местной устойчивости и потеря устойчивости формы характерна для центрального сечения шарнирно-закрепленного стержня.
4. Общая форма потери устойчивости при данных параметрах стержня происходит по плоской форме. Для С-профиля возможны 3 основные общие формы потери устойчивости: по плоской форме, по крутильной и по изгибно-крутильной. Для каждой из этих форм определяются гибкости. При аналитическом расчете плоская форма потери общей устойчивости доказывается тем, что при определении расчетной гибкости выбиралась наибольшая из трех.
5. Концентрация напряжений в опасном сечении наблюдается в отгибах и полках. Также следует отметить, что в явном виде не наблюдается корреляции редуцированного сечения, рассчитанного по сводам правил, с результатами расчетов в программно-вычислительном комплексе методом конечных элементов. Это происходит из-за того,

что при аналитическом расчете принимают эффективные участки сечения, исключая те, что испытывают местную потерю устойчивости в зависимости от вида нагружения и соотношений напряжений в сечении.

4. Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполнен расчет холоднодеформированного профиля стойки по методике, описанной в актуальной нормативно-правовой документации. Вычислены значения критических сил в упругой стадии ЛСТК-профиля С-образного сечения по плоской, крутильной и изгибно-крутильной формам потери устойчивости для 6-ти разных значений гибкостей.
2. Проведен численный эксперимент в программно-вычислительном комплексе Siemens FEMAP 11.4.2 с NX Nastran. Моделировались оболочками стержни различных гибкостей. Расчет проводился с учетом геометрической нелинейности, начальные несовершенства были заданы в плоскости с меньшей жесткостью.
3. Анализ полученных данных по коэффициентам устойчивости показал, что при значительных гибкостях сходимость решений по 2-ум методикам не достигается. Отклонение достигает значения 9,7 %. При меньших длинах профиля отклонения в результатах расчетов минимальны и не превышают 2 %.
4. Результаты оценки различных форм потери устойчивости подтверждают, что использование современных расчетных комплексов, основанных на методе конечных элементов, позволяет эффективно решать задачи оценки надежности конструкций из ЛСТК профилей. В дальнейшем, возможно, выполнить оценку влияния различных факторов, не учитываемых в аналитических методиках, на величину критической нагрузки ЛСТК профилей. Например, оценить влияние ребер жесткости в сечении на величину критической силы.

Список литературы/ References

1. Советников Д.О., Азаров А.А., Иванов С.С., Рыбаков В.А. Методы расчета тонкостенных стержней: статика, динамика, устойчивость // Alfabuild. 2018. № 2(4). С. 7-33. DOI: 10.34910/ALF.4.1[Sovetnikov D., Azarov A., Ivanov S., Rybakov V. Methods of calculation of thin-walled bars: statics, dynamics and stability // Alfabuild. 2018. № 2(4). p. 7-33. DOI: 10.34910/ALF.4.1]
2. Советников Д. О., Виденков Н. В., Трубина Д. А. Легкие стальные тонкостенные конструкции в многоэтажном строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 3. С. 152–165. DOI: 10.18720/CUBS.30.11[Sovetnikov D.O., Videnkov N.V., Trubina D.A. Light gauge steel framing in construction of multi-storey buildings // Construction of Unique Buildings and Structures. 2015. № 3(30), p. 152-165. DOI: 10.18720/CUBS.30.11]
3. Булатов Б.Г., Шигапов Р.И., Ивлев М.А., Недосеко И.В. Каркасно-монолитная технология строительства малоэтажных зданий из пеногипса и стальных тонкостенных конструкций // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 36–39. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-36-39 [Bulatov B.G., Shigapov R.I., Ivlev M.A., Nedoseko I.V. Frame-monolithic technology of construction of low-rise buildings made of foam gypsum and steel thin-walled structures// Construction Materials. 2018. № 8., p. 36–39. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-36-39]
4. Назмеева Т.В. Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошного и перфорированного сечения из холодногнутого С-профиля // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5(40). С. 44-51. DOI: 10.5862/MCE.40.5 [Nazmeeva T.V. Bearing capacity of compressed continuous and perforated thin-walled steel members of C-shaped cold-formed profiles. // Magazine of Civil Engineering. 2013. № 5(40). p. 44-51. DOI: 10.5862/MCE.40.5]
5. Dar M. A. et al. Structural performance of cold-formed steel composite beams // Steel Compos. Struct. 2018. T. 27. №. 5. С. 545-554. DOI: 10.1016/j.tws.2018.09.012
6. M. Casafont, J. Bonada, M.M. Pastor, F. Roure, A. Susín, Linear buckling analysis of perforated cold-formed steel storage rack columns by means of the Generalised Beam

- Theory, Int. J. Struct. Stabil. Dynam. 2018. № 18(1). 1850004. DOI: 10.1142 / S0219455418500049
7. Белый, Г. И. «Обратный» метод расчета усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечений // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6. С. 46-55. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-55 [Bely, G. I. Reverse calculation method for load reinforced bar elements of steel structures by increasing cross sections. // Bulletin of Civil Engineers. 2020. № 6 (83). p. 46–55. p]
 8. Смирнов, М. О. Совершенствование обратного численно-аналитического метода расчета ЛСТК на устойчивость при внецентренном сжатии / М. О. Смирнов // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 1 (84). С. 46-52. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52 [Smirnov, M.O. Improvement of the inverse numerical-analytical method for calculating the light steel thin-walled structures for stability under eccentric compression // Bulletin of Civil Engineers. 2021. № 1 (84). С. 46-52. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52]
 9. Семенов А. А., Порываев И.А. и др. Алгоритм поиска оптимальных параметров центрально сжатых стоек трубчатого сечения переменной жесткости // Строительство и реконструкция. 2018. №. 2. С. 51-60 [Semenov A. A., Porivaev I.A., Shamilova E.R., Semenov S.A. Algorithm of searching the optimum parameters of centrally compressed streams of tubular cross section of variable rigidity // Building and reconstruction. 2018. №. 2. p. 51-60.]
 10. Неведов Г. В. Строительство домов средней этажности на каркасах из легких стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 7. С. 10-15. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.10-15 [Nefedov G.V. Construction of medium-storey residential buildings on frames of light steel thin-walled structures. // Industrial and Civil Engineering. 2020. № 7. p. 10-15. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.07.10-15]
 11. Синельников А.С. Прочность просечно-растяжного профиля // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5. С. 74-85. DOI: 10.5862/MCE.57.7 [Sinelnikov A.S. Reticular-Stretched Thermoprofile: a numerical and analytical study // Magazine of Civil Engineering. 2015. № 5. p. 74-85. DOI: 10.5862/MCE.57.7]
 12. Савченко А.В., Иоскевич А.В., Хазиева Л.Ф., Нестеров А.А., Иоскевич В.В. Продольно-поперечный изгиб балки. Решение в различных программных комплексах // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 11 (38). С. 89-105 [Sinelnikov A.S. Reticular-Stretched Thermoprofile: a numerical and analytical study // Magazine of Civil Engineering. 2015. № 5. p. 74-85. DOI: 10.5862/MCE.57.7]
 13. Degtyarev V.V., Finite element modeling of cold-formed steel deck in bending. Magazine of Civil Engineering. 2020. 94(2). P. 129–144. DOI: 10.18720/MCE.94.11
 14. Degtyarev V.V. et al. Buckling and ultimate load prediction models for perforated steel beams using machine learning algorithms // J. Build. Eng. 2022. DOI: 10.1016/j.job.2022.104316
 15. Н.-Т. Thai Machine learning for structural engineering: a state-of-the-art review // Structures. 2022. DOI: 10.1016/j.job.2022.104316
 16. Кашеварова Г. Г., Косых П. А. Определение несущей способности легких стальных тонкостенных конструкций на основе компьютерного моделирования // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2014. Т. 10. № 2. С. 85-92 [Kashevarova G.G, Kosykh P.A Defining buckling resistance of cold formed light gauge steel members utilizing computer modeling // International journal for computational civil and structural engineering. 2014. V. 10. № 2. p. 85-92.]
 17. Каюмов Р.А., Тезисы (сборник научных трудов (международные конференции)), За критическое поведение сжатых стержней с нелинейно упругими опорами., издательство: Аэтерна, Уфа, Россия, номер: 2, 2021, 201-202 с., [Kayumov R.A., Abstracts (collection of scientific papers (international conferences)), Supercritical behavior of compressed rods with nonlinearly elastic supports., Publisher: Aeterna, Ufa, Russia, number: 2, 2021, pp. 201-202,]

Информация об авторах

Кинзябулатова Диана Фидратовна, лаборант, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация.

Email: kinzyabulatovadddd@yandex.ru

Порываев Илья Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация.

Email: iporivaev@gmail.com

Недосеко Игорь Вадимович, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация.

Email: nedoseko1964@mail.ru

Information about the authors

Diana F. Kinzyabulatova, laboratory assistant, Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa, Russian Federation.

Email: kinzyabulatovadddd@yandex.ru

Ilya A. Porivaev, candidate of technical sciences, Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa, Russian Federation.

Email: iporivaev@gmail.com

Igor V. Nedoseko, doctor of technical sciences, professor, Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa, Russian Federation.

Email: nedoseko1964@mail.ru