УДК 624.072.2.014.2-415

© М. О. Смирнов, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: smirnov.maxim.sk@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-46-52

© М. О. Smirnov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: smirnov.maxim.sk@gmail.com

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБРАТНОГО ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ЛСТК НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ВНЕЦЕНТРЕННОМ СЖАТИИ

IMPROVEMENT OF THE INVERSE NUMERICAL-ANALYTICAL METHOD FOR CALCULATING THE LIGHT STEEL THIN-WALLED STRUCTURES FOR STABILITY UNDER ECCENTRIC COMPRESSION

В работе предложен усовершенствованный обратный численно-аналитический метод расчета тонкостенных холодногнутых элементов на устойчивость с учетом потери местной устойчивости и формы сечения. Представленный подход позволяет автоматизировать и ускорить процесс аналитического расчета, позволяя быстро получать коэффициенты потери общей устойчивости стержней ЛСТК. В результате сложный и трудоемкий расчет сводится к использованию единственной формулы в сочетании с табличными данными.

Ключевые слова: тонкостенные холодногнутые профили, устойчивость, редукция сечения, внецентренное сжатие, автоматизация расчета.

The paper proposes an improved reverse numerical-analytical method for calculating thin-walled cold-formed rod elements for stability, taking into account the loss of local stability and the section shape. The presented approach makes it possible to automate and speed up the process of analytical calculation, which enables quickly obtaining the coefficients of loss of overall stability of rods of the LSTW structures. As a result, a complex and time-consuming calculation process is reduced to using a single formula in combination with the tabular data.

Keywords: thin-walled cold-formed profiles, stability, section reduction, eccentric compression, automation of calculation.

Конструкции из легких стальных тонкостенных элементов (ЛСТК) получили широкое распространение за рубежом, а также в России. Данный вид конструктивных элементов имеет много конкурентных преимуществ, а именно: широкий спектр изготавливаемых форм и профилей; легкость в сочетании с прочностью, позволяющую выполнять строительно-монтажные работы без использования тяжелых грузоподъемных механизмов; возможность использовать соединение элементов на самонарезающих винтах или заклепках, тем самым ускоряя процесс монтажа конструкций¹ [1].

Однако эти конструкции обладают рядом особенностей: потеря местной устойчивости

и формы сечения [2–3] до достижения предельного состояния. Эти особенности отражены в отечественных нормативных документах², которые во многом опираются на соответствующие зарубежные³. Учет влияния этих факторов базируется на методе «эффективной ширины», основанном на большом количестве теоретических и экспериментальных исследований (например, [4–6]). Такой подход подразумевает замену профиля на совокупность отдельных пластин и исключение из работы участков сечения, теряющих местную устойчивость [7–8].

² СП 260.1325800. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутого оцинкованного профиля и гофрированных листов. М., 2016. 116 с.

³ EN 1993-1-3–2006. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. European Committee for Standardization, 2006.

¹ Durability of Cold-Formed Steel Framing Members. Design Guide. Second Edition, September 2004. AISI. Steel Framing Alliance.

В случаях, когда на стержневой элемент ЛСТК действуют несколько силовых факторов: продольная сила N и изгибающие моменты M_x , M_y , в нормах проектирования^{2,3} характеристики эффективного сечения рекомендуется определять раздельно для каждой составляющей [9]. Такой подход не соответствует основным положениям механики. Кроме того, в задачах устойчивости разделение редукиции приводит к использованию принципа наложения, являющегося недопустимым. Чтобы компенсировать допущенные нарушения, в нормативных документах^{2,3} предлагается использовать коэффициенты совместного действия параметров загрузки. Однако в работе [10] отмечается несоответствие результатов расчета на устойчивость по нормам и численных экспериментов при общем случае приложения нагрузки.

Методика расчета фактической редукиции сечения при многопараметрическом нагружении предлагается в работах [11–13]. Данный метод базируется на использовании полного сечения с догрузением фиктивными силами, которые компенсируют потерю местной устойчивости и формы сечения. Такой подход требует определять редукицию итерационным методом, что несколько усложняет процесс расчета. Для ускорения расчета предлагается использовать обратный метод решения [10], который основывается на результатах исследования [14].

Процесс определения редуцированного сечения, изложенный в СП 260.1325800, является достаточно трудоемким, так как зависит от напряженного состояния в элементе, гибкости пластинок, а также параметров профиля. В связи с этим инженеры часто отказываются от использования легких стальных тонкостенных стержней в пользу менее эффективных, но более простых для расчета конструктивных элементов. Для упрощения инженерных вычислений активно разрабатывается специальное программное обеспечение, а также алгоритмы [15], позволяющие автоматизированным способом получать эффективные характеристики сечения стержней ЛСТК.

Расчет внецентренно сжатых тонкостенных элементов на устойчивость по действующим нормам проектирования также является трудоемким. К тому же его достоверность вызывает

сомнения, что отмечалось в [10]. Достаточно точные результаты можно получить, используя метод конечных элементов и программы типа Ansys, однако такой способ является весьма чувствительным к заданию граничных условий и существенно уступает в быстродействии аналитическим методам. В настоящей работе предлагается алгоритм, позволяющий быстро выполнять расчеты стержневых элементов ЛСТК на устойчивость при внецентренном сжатии (действии продольной силы с эксцентриситетом в плоскости и случайным эксцентриситетом из плоскости) обратным способом.

Рассмотрим стержень из тонкостенного холодногнутого профиля, нагруженный продольной силой N с эксцентриситетом e_y в плоскости наибольшей жесткости и эксцентриситетом e_x в другой плоскости (рис. 1). Тогда, согласно [10], напряженно-деформированное состояние в элементе можно представить в виде

$$\bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi_{\text{пр}} (1 + m_x \bar{y} + m_y \bar{x}), \quad (1)$$

где

$$\varphi_{\text{пр}} = (1 + m_x + m_y)^{-1}; \quad (2)$$

$m_x = e_y / \rho_x$; $m_y = e_x / \rho_y$; $\bar{x} = x / x_*$; $\bar{y} = y / y_*$; $\rho_x = W_x / A$; $\rho_y = W_y / A$; W_x , W_y — моменты сопротивления наиболее нагруженного волокна с координатами x_* , y_* .

Используя автоматизированный алгоритм [15], определяем редуцированные характеристики, которые затем позволяют воспользоваться алгоритмом «Сечение» [14, 16]. Далее устанавливаем параметр действующей продольной силы $\varphi_{\text{пр},ef} = N_{ef} / (R_y A)$, учитывающий редукицию сечения [10]:

$$\varphi_{\text{пр},ef} = \varphi_{\text{пр}} \left(\bar{A}_{ef} - m_x \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c - m_y \frac{\rho_y}{x_*} \bar{x}_c \right). \quad (3)$$

Также определяем параметр фиктивной силы $\varphi_{\text{пр},ф} = N_{ф} / (R_y A)$, которая компенсирует редукицию, и его относительные эксцентриситеты $m_{xф}^0$ и $m_{yф}^0$:

$$\varphi_{\text{пр},ф} = \varphi_{\text{пр}} C_{1ф}; m_{xф}^0 = C_{2ф} / C_{1ф};$$

$$m_{yф}^0 = C_{3ф} / C_{1ф}, \quad (4)$$

где $\bar{A}_{ef}$, $C_{1ф}$, $C_{2ф}$, $C_{3ф}$ — параметры алгоритма «Сечение», определяемые согласно [10].

Таким образом, редуцированное сечение стержня заменяется на полное с введением параметра фиктивной продольной силы с эксцентриситетами, компенсирующего потерю

Рис. 1. Схема нагружения стержня

местной устойчивости и формы сечения. Далее, рассматривая пространственную форму потери устойчивости как наиболее полно отражающую деформирование стержня, по [10] предельное напряженное состояние получим в следующем виде:

$$\bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi_{\text{пр}, \text{ef}} \left(1 + m_{x, \text{ef}}^0 \bar{y} K_{d, xu} + m_{y, \text{ef}}^0 \bar{x} K_{d, yu} \right) + \varphi_{\text{пр}, \text{ф}} \left(1 + m_{x, \text{ф}}^0 \bar{y} K_{d, xu} + m_{y, \text{ф}}^0 \bar{x} K_{d, yu} \right) = 1, \quad (5)$$

где $m_{x, \text{ef}}^0$ и $m_{y, \text{ef}}^0$ — концевые относительные эксцентриситеты действующей продольной силы; $K_{d, xu}$ и $K_{d, yu}$ — деформационные коэффициенты, характеризующие изгибную и изгибно-крутильную формы потери устойчивости соответственно, определяемые согласно [10].

В результате, задаваясь деформационными относительными эксцентриситетами и определяя редукцию сечения в предельном состоянии, получаем значение параметра действующей продольной силы и относительные эксцентриситеты, с которыми он прикладывается. По сути, параметр $\varphi_{\text{пр}, \text{ef}}$ может восприниматься как коэффициент потери общей устойчивости тонкостенного холодногнутого стержня, учитывающий потерю местной устойчивости и формы сечения элемента. Тогда расчет на устойчивость сводится к выражению

$$\frac{N}{\gamma_c R_y A \varphi_{\text{пр}, \text{ef}}} \leq 1. \quad (6)$$

Представленная аналитическая методика расчета ЛСТК на общую устойчивость имеет доста-

точно высокую точность в сравнении с другими методами и позволяет значительно сократить время расчета. Это подтверждается результатами исследования [10]. Однако особенность обратного метода состоит в том, что, если задаться относительными эксцентриситетами и определять $\varphi_{\text{пр}, \text{ef}}$, заранее неизвестно, какие относительные эксцентриситеты действующей силы ($m_{x, \text{ef}}^0$ и $m_{y, \text{сл}, \text{ef}}^0$) мы получим в результате расчета. То есть, зная значения сжимающей продольной силы и моментов в тонкостенном холодногнутом стержне, коэффициент потери общей устойчивости $\varphi_{\text{пр}, \text{ef}}$ можно получить только итерационным путем, перебирая параметры деформационных относительных эксцентриситетов.

Для решения этого вопроса предлагается использовать автоматизированный алгоритм определения коэффициентов потери общей устойчивости при внецентренном сжатии. Его суть состоит в автоматизации процесса перебора деформационных эксцентриситетов, получении редуцированных характеристик по методике [15] и использовании обратного метода расчета устойчивости [10], описанного выше.

Рассматривая внецентренное сжатие стержня с эксцентриситетом e_y в одной плоскости и случайным эксцентриситетом $e_{x, \text{сл}} = l_y / 750 + i_y / 20$ в другой (здесь l_y — расчетная длина элемента из плоскости; i_y — радиус инерции сечения в плоскости случайного эксцентриситета), будем выполнять перебор параметра m_x с достаточно мелким шагом (например, 0,01) до некоторого предельного значения $m_{x, \text{пр}}$, при котором внецентренное сжатие будет вырождаться в изгиб. Следуя [10], для расчета необходимо задаться значением условной гибкости стержня $\bar{\lambda}_y$. Его мы также можем перебирать с определенным шагом, тем самым получая полноценную выборку результатов расчета. В результате подстановки вышеприведенных параметров в алгоритм, на каждом шаге получаем некоторые значения $\varphi_{\text{пр}, \text{ef}}$, $m_{x, \text{ef}}^0$ и $m_{y, \text{ef}}^0$. Полученные данные удобно представить в табличном виде согласно шаблонам (см. табл. 1 и 2).

В случае сжатия с изгибом ($m_y = 0$, $m_{y, \text{ef}}^0 = 0$) алгоритм можно было бы считать завершенным, однако, рассматривая вероятность возникновения случайного эксцентриситета (более общий случай), необходимо внутри каждого шага про-

Таблица 1

Таблица соответствия $\bar{\lambda}_y$, m_x и $m_{x,ef}^0$ (записано как $m_{x,ef}$)

$\bar{\lambda}_y$	m_x				
	0,01	0,02	0,03	...	$m_{x,пр}$
0,5	$m_{x,ef}(1,1)$	$m_{x,ef}(2,1)$	$m_{x,ef}(3,3)$	...	$m_{x,ef}(m,1)$
1	$m_{x,ef}(1,2)$	$m_{x,ef}(2,2)$	$m_{x,ef}(3,3)$	...	$m_{x,ef}(m,1)$
1,5	$m_{x,ef}(1,3)$	$m_{x,ef}(2,3)$	$m_{x,ef}(3,3)$	...	$m_{x,ef}(m,1)$
...	...	...	...	...	...
n	$m_{x,ef}(1,n)$	$m_{x,ef}(2,n)$	$m_{x,ef}(3,n)$	...	$m_{x,ef}(m,n)$

Таблица 2

Таблица соответствия $\bar{\lambda}_y$, m_x и $\varphi_{пр,ef}$ (записано как φ_{ef})

$\bar{\lambda}_y$	m_x				
	0,01	0,02	0,03	...	$m_{x,пр}$
0,5	$\varphi_{ef}(1,1)$	$\varphi_{ef}(2,1)$	$\varphi_{ef}(3,3)$	...	$\varphi_{ef}(m,1)$
1	$\varphi_{ef}(1,2)$	$\varphi_{ef}(2,2)$	$\varphi_{ef}(3,3)$	...	$\varphi_{ef}(m,1)$
1,5	$\varphi_{ef}(1,3)$	$\varphi_{ef}(2,3)$	$\varphi_{ef}(3,3)$	...	$\varphi_{ef}(m,1)$
...	...	...	...	...	...
n	$\varphi_{ef}(1,n)$	$\varphi_{ef}(2,n)$	$\varphi_{ef}(3,n)$	...	$\varphi_{ef}(m,n)$

изводить дополнительный циклический перебор значений параметра m_y по аналогии с m_x , до тех пор пока $m_{y,ef}^0$ не будет соответствовать $m_{y,сл,ef}^0 = e_{x,сл}/\rho_y$, и только тогда заносить данные в табл. 1 и 2. Так как результаты работы алгоритма удобно анализировать в табличном виде, для автоматизации процесса воспользуемся программным комплексом Microsoft Excel и сфор-

мируем упомянутые выше вложенные циклы на языке программирования Visual Basic (рис. 2).

После получения таблиц соответствия образуется большой массив данных, состоящий из относительных эксцентриситетов $m_{x,ef}^0$ и соответствующих им $\varphi_{пр,ef}$. В результате, зная значение момента и сжимающей силы в элементе, можно определить действительный относитель-

```

Sub Iter_step()
Application.ScreenUpdating = False
For i = 3 To 16 'перебор гибкости
    For j = 2 To 3001 'перебор  $m_x$ 
        'перенос гибкости из листа с таблицей в алгоритм
        gibkost = Worksheets("mx,ef").Cells(i, 1)
        'перенос  $m_x$  из листа с таблицей в алгоритм
        mx = Worksheets("mx,ef").Cells(2, j)
        'далее получение эффективных характеристик по [16]
        'и перебор внутри цикла значений  $m_y$  (от 3 до 0)
        For k = 3 To 0 Step -0.025
            Worksheets("Алгоритм").Cells(15, 76) = k
            'Из алгоритма получаем  $m_{y,ef}$ 
            'Если  $m_{y,ef} > m_{y,сл,ef}$ , то подцикл завершает работу
            If Worksheets("Алгоритм").Cells(17, 80) > Worksheets("Алгоритм").Cells(34, 76) Then
                Exit For
            End If
        Next k
        'переносим из алгоритма полученные значения  $m_{x,ef}$  и  $\varphi_{пр,ef}$  обратно в соответствующие таблицы
        Worksheets("mx,ef").Cells(i, j) = Worksheets("Алгоритм").Cells(28, 76)
        Worksheets("фи,пр,ef").Cells(i, j) = Worksheets("Алгоритм").Cells(20, 76)
    Next j
Next i
Application.ScreenUpdating = True
End Sub

```

Рис. 2. Программный код для автоматизированного определения значений $m_{x,ef}^0$ и соответствующих $\varphi_{пр,ef}$

Таблица 3

Коэффициенты потери общей устойчивости $\varphi_{пр,ef}$ для профиля Double Channel 190×90×20×2

$\bar{\lambda}_y$	$m_{x,ef}^0$ с учетом $m_{y,сл,ef}^0$									
	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	3	5	7	10
0,5	0,538	0,465	0,414	0,368	0,305	0,261	0,202	0,140	0,106	0,077
1	0,526	0,460	0,406	0,364	0,302	0,258	0,201	0,139	0,106	0,077
1,5	0,515	0,450	0,398	0,358	0,297	0,254	0,199	0,138	0,105	0,077
2	0,494	0,433	0,386	0,346	0,290	0,250	0,196	0,137	0,104	0,076
2,5	0,459	0,407	0,366	0,332	0,280	0,242	0,191	0,134	0,102	0,075
3	0,417	0,376	0,340	0,311	0,265	0,232	0,184	0,131	0,100	0,074
3,5	0,367	0,336	0,308	0,283	0,245	0,215	0,173	0,123	0,095	0,071
4	0,319	0,294	0,272	0,251	0,219	0,192	0,154	0,110	0,088	0,069
4,5	0,276	0,256	0,237	0,219	0,189	0,167	0,135	0,105	0,087	0,069
5	0,239	0,221	0,205	0,190	0,171	0,156	0,134	0,104	0,086	0,068

ный эксцентриситет и, используя аппроксимацию, получить соответствующий коэффициент потери устойчивости. Этот процесс также выполняется автоматизированным способом.

Итогом работы данного алгоритма является таблица коэффициентов потери общей устойчивости для холодногнутых тонкостенных стержней, которую можно представить в удобном виде по аналогии с табл. Д.3 из СП 16.13330.2017⁴ (табл. 3).

Выводы

Представленная методика в связке с алгоритмом [15] и обратным методом расчета [10] позволяет автоматически получать коэффициенты потери общей устойчивости для ЛСТК. Пользователю достаточно задаться геометрией сечения, далее программа автоматически определит редуцию на каждом шаге расчета, деформационные эксцентриситеты и составит сводную таблицу. То есть инженеру не придется выполнять трудоемкие аналитические или конечно-элементные расчеты, а достаточно будет лишь обратиться к таблице коэффициентов потери устойчивости и выполнить расчет стержня по формуле (6). Данный алгоритм был апробирован в исследовании [10], которое показало достаточную достоверность. Вместе с тем алгоритм весьма хорошо коррелирует с методом конечных элементов (см. [10]), значительно превосходя его по быстродействию.

Библиографический список

1. Катранов И. Г. Несущая способность винтовых и заклепочных соединений стальных тонкостенных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 202 с.
2. Dubina D., Ungureanu V., Landolfo R. Design of Cold-formed Steel Structures // ECCS – European Convention for Constructional Steelwork. 2012. Pp. 13–15.
3. Уэй Э., Хэйвуд М., Беляев Н. А., Билюк С. И., Билюк А. С. Расчет элементов из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3 / Украинский центр стального строительства (УЦСС). 2015. 104 с.
4. Peköz T. Development of a Unified Approach to the Design of Cold-Formed Steel Members // American Iron and Steel Institute Research Report, 1987. CF 87-1.
5. Moldovan A. Compression Tests on Cold-Formed Steel Columns with Monosymmetrical Section // Thin-Walled Structures. 1994. Vol. 20 (1–4). Pp. 241–252.
6. Shafer B. W. Designing Cold-Formed Steel Using the Direct Strength Method // 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures October 26–27, 2006, Orlando, Florida.
7. Айрумян Э. Л. Рекомендации по расчету стальных конструкций из тонкостенных гнутых профилей // СтройПРОФИль. 2009. № 8 (78). С. 12–14.
8. Айрумян Э. Л., Галстян В. Г. Исследование действительной работы тонкостенных холодногнутых прогонов из оцинкованной стали // Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 6. С. 31–34.
9. Белый Г. И. К определению редуцированных сечений стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 5 (64). С. 33–37.
10. Белый Г. И., Смирнов М. О. Влияние фактической редуции сечения на прочность и устойчивость

⁴ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. М., 2017. 139 с.

стержневых элементов ЛСТК при общем случае загрузки // Промышленное и гражданское строительство. 2021 (в печати).

11. Белый Г. И. К расчету на устойчивость стержневых элементов конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3 (56). С. 46–51.

12. Белый Г. И., Кузнецов А. Ю. Влияние редукиции сечения на устойчивость стержневых элементов конструкций из спаренных холодногнутых тонкостенных профилей // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 4 (57). С. 57–63.

13. Белый Г. И. Новые положения в инженерной методике расчета на устойчивость стальных стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 75–80.

14. Белый Г. И. Аналитически-численный метод расчета на устойчивость стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 39–46.

15. Смирнов М. О. Совершенствование методики определения редуцированных сечений стержней из холодногнутых профилей при однопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 2 (79). С. 60–67.

16. Белый Г. И. Развитие методов расчета стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 3 (80). С. 43–54.

References

1. Katranov I. G. *Nesushchaya sposobnost' vintovykh i zaklepochnykh soedineniy stal'nykh tonkostennykh konstruktsiy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Load-bearing capacity of screw and rivet joints of thin-walled steel structures. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2011, 202 p..

2. Dubina D., Ungureanu V., Landolfo R. Design of cold-formed steel structures. *ECCS – European Convention for Constructional Steelwork*, 2012, pp. 13–15.

3. Uey E., et al. *Raschet elementov iz stal'nykh kholodnoformovannykh profiley v sootvetstvii s Evrokodom 3* [Calculation of elements made of cold-formed steel profiles in accordance with EUROCODE 3]. Ukrainian Steel Construction Center Publ., 2015, 104 p.

4. Peköz T. *Development of a unified approach to the design of cold-formed steel members*. American Iron and Steel Institute Research Report, 1987. CF 87-1.

5. Moldovan A. Compression tests on cold-formed steel columns with mono-symmetrical section. *Thin-Walled Structures*, 1994, vol. 20 (1–4), pp. 241–252.

6. Shafer B. W. *Designing cold-formed steel using the direct strength method*. Proc. of the 18th International

specialty conference on cold-formed steel structures October 26–27, 2006, Orlando, Florida.

7. Ayrumyan E. L. *Rekomendatsii po raschetu stal'nykh konstruktsiy iz tonkostennykh gnutykh profiley* [Recommendations for the calculation of steel structures made of thin-walled bent profiles]. *StroyPROFIL* 2009, no. 8 (78), pp. 12–14.

8. Ayrumyan E. L., Galstyan V. G. *Issledovanie deystvitel'noy raboty tonkostennykh kholodnognutykh progono iz otsinkovannoy stali* [Study of the actual operation of thin-walled cold-rolled girders made of galvanized steel]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2002, no. 6, pp. 31–34.

9. Belyy G. *K opredeleniyu reduktirovannykh secheniy sterzhnevyykh elementov legkikh stal'nykh tonkostennykh konstruktsiy* [About calculation of reduced cross-sections of bar elements of light weight thin-walled cold formed steel structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 5 (64), pp. 33–37.

10. Belyy G. I., Smirnov M. O. *Vliyanie fakticheskoy reduktzii secheniya na prochnost' i ustoychivost' sterzhnevyykh elementov LSTK pri obshchem sluchae zagruzheniya* [The effect of the actual reduction of the cross-section on the strength and stability of the LSTC rod elements in the general case of loading]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil engineering*, 2021 (in print).

11. Belyy G. I. *K raschetu na ustoychivost' sterzhnevyykh elementov konstruktsiy iz tonkostennykh kholodnognutykh profiley* [To the calculation of rod element stability of structures made of thin-walled cold-formed profiles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 3 (56), pp. 46–51.

12. Belyy G. I., Kuznetsov A. Yu. *Vliyanie reduktzii secheniya na ustoychivost' sterzhnevyykh elementov konstruktsiy iz sparenykh kholodnognutykh tonkostennykh profiley* [The influence of the section reduction on the stability of bar structural elements of the design made of doubled cold-formed profiles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 4 (57), pp. 57–63.

13. Belyy G. I. *Novye polozheniya v inzhenernoy metodike rascheta na ustoychivost' stal'nykh sterzhnevyykh elementov konstruktsiy iz kholodnognutykh profiley* [New provisions in the engineering calculation procedure on the stability of steel bar elements of structures made of cold-formed profiles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 75–80.

14. Belyy G. I. *Analiticheski-chislennyi metod rascheta na ustoychivost' sterzhnevyykh elementov legkikh stal'nykh tonkostennykh konstruktsiy* [Analytical-numerical method for calculating the stability of rod elements of lightweight

steel structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 4 (81), pp. 39–46.

15. Smirnov M. O. *Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya redutsirovannykh secheniy sterzhney iz kholodnognutykh profiley pri odnoparametricheskom zagruzhении* [Improving the methodology for determining reduced cross-sections of rods from cold-formed profiles at one-parameter loading]. *Vestnik grazhdanskikh*

inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers, 2020, no. 2 (79), pp. 60–67.

16. Belyy G. I. *Razvitie metodov rascheta sterzhnevyykh elementov stal'nykh konstruktsey pri mnogoparametricheskom zagruzhении* [Development of methods for calculating rod elements of steel structures under multi-parameter loading] *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 3 (80), pp. 43–54.