

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ



УДК 624.075.2.014.2

А.А. КОЛЬЗЕЕВ

СРАВНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ УСТОЙЧИВОСТИ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТЫХ СТАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ ТРУБЧАТОГО СЕЧЕНИЯ

Проанализированы коэффициенты устойчивости центрально-сжатых стержней трубчатого сечения из круглых и прямоугольных труб. Исследование проведено численным методом с использованием компьютерной программы PSK. Уточнены параметры, влияющие на величину предельной нагрузки. Проведено сравнение с нормативными документами. Установлено, что при использовании кривой устойчивости φ_b для стержней из труб возможна экономия стали до 5–7 %.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сжатый стержень, трубчатое сечение, коэффициент устойчивости.

DOI 10.32683/0536-1052-2018-718-10-5-12

Несущая способность центрально-сжатого стержня по устойчивости может быть вычислена по формуле

$$N = \varphi A R_y \gamma_c,$$

где φ – коэффициент устойчивости при центральном сжатии;

A – площадь поперечного сечения стержня;

R_y – расчетное сопротивление стали сжатию по пределу текучести;

γ_c – коэффициент условий работы.

Коэффициенты устойчивости впервые появились в отечественных нормах в 1934 г. (Нормы и технические условия – НТУ 1934). В то время они назывались коэффициентами продольного изгиба. Коэффициенты φ были уточнены в НТУ 1939 г. и с тех пор не менялись более 30 лет.

В последующих нормах на проектирование стальных конструкций СНиП П-В. 3–72* значения коэффициентов φ уменьшили на 2–5 %, а в СНиП П-23–81* понизили еще на 1–7 %.

Фактически, до 2011 г. в Советском Союзе и России коэффициенты φ вычислялись без явного учета формы поперечного сечения сжатого стержня. Правда, в СНиП П-23–81* была возможность косвенно учесть влияние трубчатой формы сечения с помощью коэффициента γ_c , который для сжатых

элементов стержневых конструкций покрытий и перекрытий из труб при расчетах на устойчивость принимался равным единице, а для прочих типов сечений $\gamma_c = 0,95$.

В то же время исследования, проведенные в ряде стран Западной Европы (ECCS – European Convention of Constructional Steelwork) и США, показали, что сжатые стержни из труб обладают большей несущей способностью по устойчивости в сравнении с открытыми типами сечений (двутавр, тавр, швеллер и др.) [1]. Это объяснялось меньшей величиной начальных несовершенств: общей начальной погиби стержня, случайных эксцентриситетов, вариаций прочностных свойств и остаточных напряжений от прокатки, сварки, резки. На основе результатов этих исследований в нормах Бельгии, Франции, Германии и других стран (EN 1993-1-1) стали учитывать влияние формы сечения сжатого стержня на его устойчивость (5 кривых коэффициентов устойчивости).

В российских сводах правил по проектированию стальных конструкций 2011 и 2017 гг. (СП 16.13330) на основе исследований, проведенных в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко и ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, предлагается учитывать форму поперечного сечения сжатого стержня при расчетах на устойчивость с помощью трех кривых коэффициентов φ :

кривая a – наивысшая для круглых и гнутосварных прямоугольных труб; кривая b – для прокатных и сварных двутавров, сварных прямоугольных труб и еще некоторых типов сечений; кривая c – наинизшая для открытых профилей (тавр, швеллер, уголок).

Сравнение новых коэффициентов φ с отмененными по СНиП П-23–81* приведено в табл. 1. Анализ показывает, что коэффициенты φ по кривой a увеличились на 4–13 %, по кривой b возросли на 2–6 %, а по кривой c уменьшились на 3–10 %.

Таблица 1. Сравнение нормативных коэффициентов устойчивости

λ	СНиП П-23–81*	СП 16.13330.2017		
	φ	φ_a	φ_b	φ_c
30	0,931	0,967	0,947	0,900
50	0,852	0,911	0,869	0,796
70	0,754	0,826	0,765	0,678
90	0,612	0,695	0,635	0,555
120	0,419	0,462	0,444	0,394
130	0,364	0,395	0,394	0,352

В связи с этим возникает ряд вопросов:

1. Насколько надежна кривая a , включающая горячедеформированные и сварные круглые трубы? Учитываются ли остаточные сварочные напряжения?

2. Почему кривая b предлагается и для двутавров, и для сварных прямоугольных труб, хотя жесткость на кручение для труб в десятки раз больше, чем у двутавров?

3. Почему по аналогии с внецентренно сжатыми стержнями не учитывается соотношение площади полки A_f к площади стенки A_w профиля?

Для ответов на эти и другие вопросы на кафедре металлических и деревянных конструкций НГАСУ (Сибстрин) были проведены исследования моделей сжатых стержней из круглых труб, прямоугольных труб с соотношением $A_f/A_w = 0,26-0,95$ и квадратных труб, теряющих устойчивость в диагональной плоскости (рис. 1). Длина моделей стержней l варьировалась от 2 до 12 м. Гибкость $\lambda_z = l_{eff}/i_z = 27-126$. Стержни шарнирно закреплены по концам (рис. 2).

Материал моделей – малоуглеродистая сталь обычной прочности С255 ($R_y = 240$ МПа) и низколегированная сталь С345 ($R_y = 320$ МПа).

Известно, что факторами, оказывающими наибольшее влияние на устойчивость стержня, являются его общая начальная погибь и случайная расцентровка [2–5]. В отечественные нормы заложена синусоидальная начальная погибь с максимальной стрелкой $f_0 = 1/750l$ [6], которая была принята на основе работ А.В. Геммерлинга [7]. В то же время в нормах западноевропейских стран $f_0 = 1/1000l$ [1].

В НГАСУ (Сибстрин) выполнена оценка влияния трубчатой формы сечения на величину начальной погиби на основе критерия равенства работ [8]. Установлено, что внешние силовые воздействия при совершении одинаковой

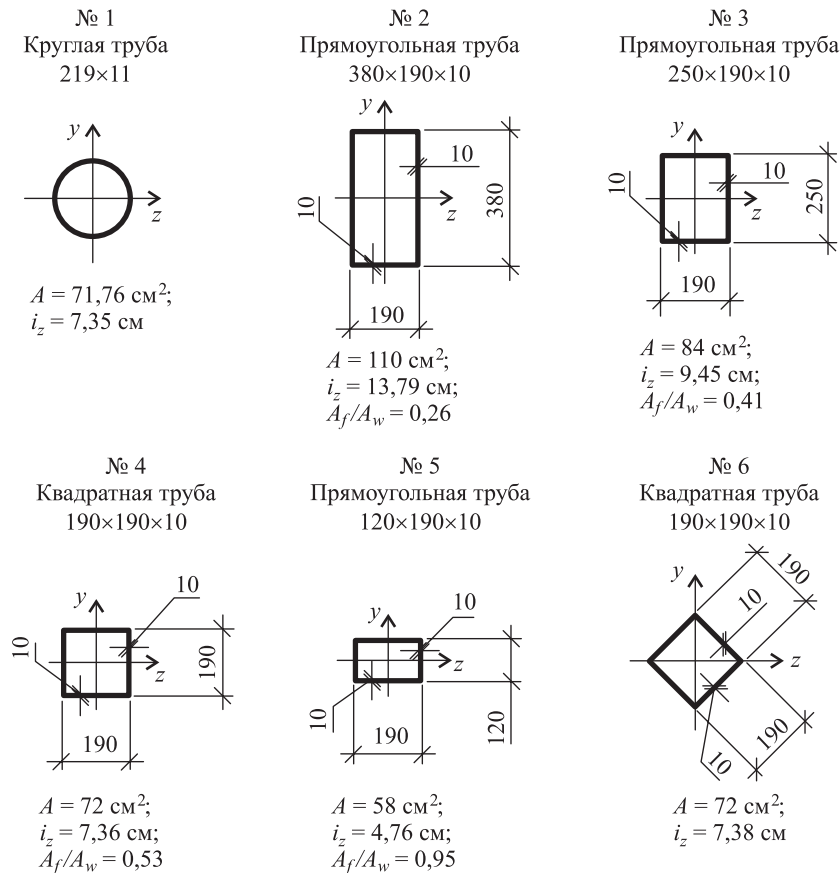


Рис. 1. Типы сечений сжатых стержней

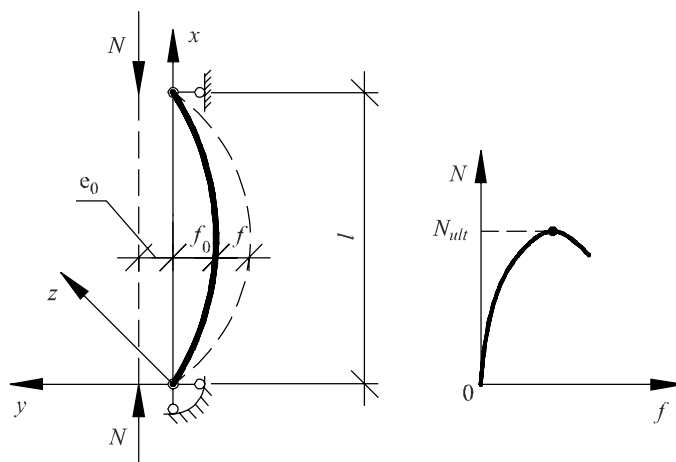


Рис. 2. Расчетная схема стержня

работы приведут к образованию меньшей начальной погиби в стержнях из труб по сравнению с открытыми сечениями. Другим параметром, влияющим на величину стрелки начальной погиби, является гибкость.

При гибкости стержня не более 80 стрелка может быть принята $\frac{1}{1000}l$.

В интервале гибкостей от 80 до 120 – линейная зависимость

$$\text{от } f_0 = \frac{1}{1000}l \text{ до } \frac{1}{750}l. \text{ При } \lambda > 120 \text{ } f_0 = \frac{1}{750}l.$$

Случайные эксцентриситеты e_0 , возникающие при изготовлении и монтаже металлоконструкций и заложенные в отечественные нормы, приняты $e_0 = i/20$ (i – радиус инерции сечения) на основе исследований А.Р. Ржаницына [9]. Влияние остаточных напряжений и вариация прочностных свойств в данной работе не учитывались.

Расчеты выполнялись по компьютерной программе PSK, разработанной в ЦНИИПСК им. Мельникова и реализованной в НГАСУ (Сибстрин) на языке программирования «С». В основе алгоритма этой программы – метод перемещений с использованием суперэлементов. Предельная нагрузка вычисляется с учетом физической и геометрической нелинейности, а также развития зон упругопластических деформаций по длине стержня. Физическая нелинейность работы материала модели учитывается с помощью диаграммы сжатия стали, предложенной ЦНИИПСК им. Кучеренко и задаваемой координатами точек. Программа PSK кроме N_{ult} выдает перемещения узлов на каждом этапе нагружения, углы закручивания, а также продольные силы и изгибающие моменты по краям каждого элемента. В данной работе стержень по длине разбивался на 8 одинаковых элементов. Вычисляя нормальные напряжения в элементах, можно определить момент появления пластических деформаций в стержне.

Результаты расчетов по программе PSK подтверждаются экспериментом, проведенным в НГАСУ (Сибстрин) (испытаны 20 моделей сжатых стержней длиной 3 м из сварных прямоугольных труб) [10].

Сравнение коэффициентов устойчивости центрально-сжатых стальных стержней...

Расчетная схема модели сжатого стержня дана на рис. 2. Для каждого варианта вычислялась предельная нагрузка и коэффициент устойчивости $\varphi = \frac{N_{ult}}{AR_y}$. Всего рассчитано более 100 вариантов сжатых стержней.

Результаты вычислений по PSK приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчетов в сравнении с нормами

Сечение стержня, № (см. рис. 1)	λ	$R_y = 240 \text{ МПа}$				$R_y = 320 \text{ МПа}$			
		N_{ult} , кН	φ_{PSK}	φ_a	φ_b	N_{ult} , кН	φ_{PSK}	φ_a	φ_b
1	27	1636	0,950	0,973	0,956	2161	0,941	0,964	0,942
	54	1451	0,842	0,895	0,849	1851	0,806	0,861	0,807
	82	1181	0,686	0,755	0,691	1422	0,619	0,662	0,604
	109	876	0,509	0,554	0,509	984	0,428	0,422	0,414
	122	751	0,436	0,444	0,431	819	0,357	0,333	0,333
2	36	2433	0,921	0,951	0,924	3186	0,905	0,936	0,903
	51	2271	0,860	0,908	0,865	2914	0,828	0,879	0,829
	65	2077	0,787	0,850	0,792	2597	0,738	0,795	0,732
3	32	1886	0,935	0,963	0,941	2484	0,924	0,950	0,923
	53	1712	0,849	0,901	0,856	2192	0,815	0,868	0,815
	106	1065	0,528	0,576	0,527	1201	0,447	0,446	0,432
4	27	1635	0,946	0,973	0,956	2164	0,939	0,964	0,942
	54	1452	0,841	0,895	0,849	1857	0,806	0,861	0,807
	82	1200	0,695	0,755	0,691	1451	0,630	0,664	0,606
	95	1047	0,606	0,658	0,600	1216	0,528	0,549	0,504
	122	756	0,438	0,446	0,432	832	0,361	0,334	0,334
5	32	1300	0,934	0,964	0,942	1713	0,923	0,952	0,924
	63	1108	0,796	0,860	0,805	1395	0,752	0,811	0,749
	126	587	0,421	0,420	0,412	641	0,345	0,314	0,314
6	27	1650	0,955	0,973	0,956	2179	0,946	0,964	0,942
	54	1462	0,846	0,897	0,851	1866	0,810	0,861	0,807
	68	1337	0,774	0,836	0,777	1663	0,722	0,776	0,713

Анализ результатов расчетов показывает:

1. Для всех рассмотренных стержней трубчатого сечения независимо от формы:

– в области малых и средних гибкостей $\lambda = 30\text{--}100$ стержень работает упруго до $(0,98\text{--}0,99)N_{ult}$, далее появляются пластические деформации со стороны наиболее сжатых волокон; в момент потери устойчивости при $\lambda = 30\text{--}50$ пластичность – в четырех-трех элементах по длине стержня; при $\lambda = 50\text{--}100$ зона пластичности уменьшается до трех-двух элементов;

– при $\lambda > 100$ стержень работает упруго до потери устойчивости; пластические деформации отсутствуют;

– максимальный угол закручивания стержней варьируется от 3 мин при малых гибкостях до 20 мин при $\lambda > 100$.

2. Стержни из круглых труб:

– при $R_y = 240$ МПа нормативные коэффициенты устойчивости φ_a больше вычисленных по PSK на 2–10 % во всем интервале гибкостей; нормативные коэффициенты устойчивости φ_b практически совпадают с вычисленными по PSK (расхождение в пределах не более 0,5–1 %);

– для легированной стали ($R_y = 320$ МПа) в области $\lambda = 30–100$ φ_a больше φ_{PSK} на 2–8 %, а $\varphi_b \approx \varphi_{PSK}$; при $\lambda > 100$ $\varphi_a < \varphi_{PSK}$ и $\varphi_b < \varphi_{PSK}$ на 1–7 %;

3. Стержни из прямоугольных труб:

– при $A_f/A_w = 0,26–0,41$ нормативные коэффициенты устойчивости φ_a больше вычисленных по PSK на 3–10 % во всем интервале гибкостей; нормативные коэффициенты устойчивости φ_b совпадают с вычисленными по PSK (расхождение не более 1 %) и для обычной, и для легированной стали;

– при $A_f/A_w = 0,53$ (квадратная труба) и $A_f/A_w = 0,95$, сталь С255 ($R_y = 240$ МПа) $\varphi_a > \varphi_{PSK}$ на 2–9 %; $\varphi_b \approx \varphi_{PSK}$; легированная сталь ($R_y = 320$ МПа) $\varphi_a > \varphi_{PSK}$ на 3–8 %; $\varphi_b \approx \varphi_{PSK}$ при $\lambda = 30–70$; для стержней с гибкостью $\lambda > 70$ $\varphi_a < \varphi_{PSK}$ и $\varphi_b < \varphi_{PSK}$ на 3–9 %;

– стержни из квадратных труб, теряющих устойчивость в диагональной плоскости: для стали С255 почти полная аналогия с квадратными трубами; для стали С345 при $\lambda = 30–100$ $\varphi_a > \varphi_{PSK}$ на 2–7 %; при $\lambda > 100$ $\varphi_a < \varphi_{PSK}$ на 1–6 %; коэффициенты устойчивости $\varphi_b \approx \varphi_{PSK}$ при $\lambda < 70$; $\varphi_b < \varphi_{PSK}$ на 1–6 % при $\lambda > 70$.

С учетом полученных результатов оценим возможную экономию металла на примере расчета центрально-сжатой колонны. Требуется подобрать и проверить поперечное сечение шарнирно закрепленной по концам колонны из круглой горячедеформированной трубы длиной 8 м под нагрузку 2100 кН; материал – сталь С255 с $R_y = 240$ МПа.

Принимаем круглую трубу Тр. 299×14.

$A = 125,3$ см²; $i = 10,1$ см; гибкость $\lambda \approx 79$; условная гибкость 2,67.

При проверке по СНиП П-23–81*:

$\varphi \approx 0,693$; $2100 / (0,693 \cdot 125,3 \cdot 10^{-4} \cdot 240 \cdot 10^3 \cdot 1) \approx 1,01 > 1$.

При проверке по СП 16.13330.2017:

по кривой b $\varphi_b \approx 0,709$; $2100 / (0,709 \cdot 125,3 \cdot 10^{-4} \cdot 240 \cdot 10^3 \cdot 1) \approx 0,98 < 1$.

При расчете по СП 16.13330.2017 устойчивость колонны обеспечена.

При расчете по СНиП П-23–81* необходимо принять трубу Тр. 299×15.

Экономия стали в данном случае составляет 7 %.

Выводы. 1. Влияние формы поперечного сечения центрально-сжатого стержня на предельную нагрузку и соответственно коэффициенты устойчивости φ нужно учитывать. Это повышает надежность расчетов на устойчивость и позволяет экономить металл.

2. Для сжатых стержней трубчатого сечения (круглая и прямоугольная труба) из стали С255 при $\lambda = 30–120$ коэффициенты устойчивости $\varphi_a > \varphi_{PSK}$

на 2–10 %; в то же время $\varphi_b \approx \varphi_{PSK}$. В случае легированной стали С345 в области гибкостей $\lambda = 30–90$ результаты аналогичны. В области гибкостей $\lambda = 100–120$ φ_a и φ_b меньше φ_{PSK} на 2–8 %.

3. Соотношение A_f/A_w для прямоугольных труб незначительно влияет на предельную нагрузку.

4. Малые углы закручивания трубчатых стержней в момент потери устойчивости объяснимы огромной крутильной жесткостью труб. Это позволяет отказаться от дополнительных элементов (ребер жесткости, диафрагм, связей), которые необходимы для стержней и колонн из двутавров и других открытых сечений.

5. В реальных профилях есть остаточные напряжения от прокатки, сварки и резки, а также перераспределение прочности стали по сечению. В то же время в действующих нормах нет методики учета этих факторов на несущую способность центрально-сжатых стержней. С учетом этого представляется, что более надежен расчет всех сжатых стержней трубчатого сечения с использованием кривой коэффициентов φ_b , в то же время это позволит получить дополнительную экономию металла до 5–7 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Stability of metal structures – a world view // Engineering Journal. 1981. Vol. 18, No. 3. P. 90–126.
2. Лейтес С.Д. Устойчивость сжатых стальных стержней. М.: Госстройиздат, 1954. 308 с.
3. Стрелецкий Н.С. Работа сжатых стоек. Материалы к курсу стальных конструкций. Вып. 2. Ч. 1. М.: Госстройиздат, 1959. 283 с.
4. Ривкин А.М. Результаты исследования устойчивости сжатых стержней решетки в фермах из стальных труб // Пром. стр-во. 1971. № 9. С. 42–44.
5. Кошутин Б.Н., Косорук В.А. Статистическое исследование влияния погнутостей сжатых стержней решетки стропильных ферм на их несущую способность // Исследование нагрузок на сооружения и надежности строительных конструкций: Тр. ЦНИИСК. М., 1976. С. 52–61.
6. Бельский Г.Е. Обоснование нормативных предложений по расчету сжатых и сжато-изогнутых стержней из высокопрочных сталей // Металлические конструкции: Сб. ст. ЦНИИСК / Под ред. В.А. Балдина. М.: Стройиздат, 1968. С. 79–85.
7. Геммерлинг А.В. Несущая способность стержневых стальных конструкций. М.: Госстройиздат, 1958. 216 с.
8. Бирюлев В.В., Кользеев А.А. Исследование устойчивости стержней из сварных прямоугольных труб // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1984. № 5. С. 122–125.
9. Ржаницын А.Р. Устойчивость равновесия упругих систем. М.: Гостехиздат, 1955. 476 с.
10. Кользеев А.А. Исследование устойчивости стержней ферм из прямоугольных сварных труб // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1986. № 8. С. 9–13.

Кользеев Андрей Александрович, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: andrey.kolzeev@cotes-group.com

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 24.09.18

Kolzeyev Andrey Aleksandrovich, PhD, Ass. Professor;
E-mail: andrey.kolzeev@cotes-group.com
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

COMPARISON OF THE STABILITY COEFFICIENTS OF CENTRALLY COMPRESSED STEEL BARS OF TUBE SECTION

The stability coefficients for centrally compressed bars of tube section of round and rectangular tubes are analyzed. Research held by numerical method with use computer program PSK. Parameters affecting the ultimate load are specified. Comparison with normative documents were held. Found that using stability curve φ_b for rods by tubes can save steel up to 5–7 %.

Key words: compressed bar, tube section, stability coefficient.

REFERENCES

1. Stability of metal structures – a world view. Engineering Journal. 1981. Vol. 18, No. 3. Pp. 90–126.
2. Leytes S.D. Ustoychivost' szhatykh stal'nykh sterzhney [Stability of compressed steel rods]. Moscow, 1954. 308 p. (in Russian)
3. Strel'tskiy N.S. Rabota szhatykh stoek. Materialy k kursu stal'nykh konstruksiy. Vypusk 2. Chast' 1 [Work of compressed pillars. Materials for the steel constructions course. No. 2. P. 1]. Moscow, 1959. 283 p. (in Russian)
4. Rivkin A.M. Rezul'taty issledovaniya ustoychivosti szhatykh sterzhney reshetki v fermakh iz stal'nykh trub [The results of study of stability of compressed lattice rods in trusses of steel tubes]. Promyshlennoe stroitel'stvo [Industrial construction]. 1971. No. 9. Pp. 42–44. (in Russian)
5. Koshutin B.N., Kosorukov V.A. Statisticheskoe issledovanie vliyaniya pognutostey szhatykh sterzhney reshetki stropil'nykh ferm na ikh nesushchuyu sposobnost' [The statistical study of the influence of bent compressed rods of lattice trusses on their bearing capacity]. Issledovanie nagruzok na sooruzheniya i nadezhnosti stroitel'nykh konstruksiy: Trudy TsNIISK [Research of loads on structures and reliability of building constructions. Tr. TSNIISK]. Moscow, 1976. Pp. 52–61. (in Russian)
6. Belskiy G.E. Obosnovanie normativnykh predlozheniy po raschetu szhatykh i szhato-izognutykh sterzhney iz vysokoprochnykh staley [Justification of regulatory proposals for the calculation of compressed and compressed-bent rods made of high-strength steels]. Metallicheskie konstruksii: Sbornik statey TsNIISK [Metal constructions: Digest of TSNIISK articles]. Moscow, 1968. Pp. 79–85. (in Russian)
7. Gemmerling A.V. Nesushchaya sposobnost' sterzhneykh stal'nykh konstruksiy [Bearing capacity of rod steel constructions]. Moscow, 1958. 216 p. (in Russian)
8. Biryulyov V.V., Kolzeyev A.A. Issledovanie ustoychivosti sterzhney iz svarnykh pryamougol'nykh trub [The research of the stability of rods of welded rectangular tubes]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture]. 1984. No. 5. Pp. 122–125. (in Russian)
9. Zhani'tsyn A.R. Ustoychivost' ravnovesiya uprugikh sistem [Stability of balance of elastic systems]. Moscow, 1955. 476 p. (in Russian)
10. Kolzeyev A.A. Issledovanie ustoychivosti sterzhney ferm iz pryamougol'nykh svarnykh trub [The research of the stability of trusses rods of rectangular welded tubes]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture]. 1986. No. 8. Pp. 9–13. (in Russian)