

# К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОСВАРНЫХ ПРЯМОШОВНЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ В СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ

## ON THE USE OF ELECTRIC-WELDED SINGLE-SEAM PIPES OF STEELS OF INCREASED STRENGTH IN BUILDING METAL STRUCTURES

И. И. ВЕДЯКОВ, д-р техн. наук

Д. В. КОНИН, канд. техн. наук

А. Р. ОЛУРОМБИ

*Рассмотрен вопрос актуальности использования электросварных прямошовных труб из сталей повышенной прочности в стальных конструкциях. Описаны преимущества трубы как элемента конструкции, а также опыт их использования на примере уникальных сооружений. Приведены результаты натурных испытаний полномасштабных моделей труб на центральное и внецентренное сжатие. Представлены результаты исследований рассматриваемых сталей. Результаты натурных испытаний сравниваются с численными расчетами в программном комплексе Ansys и с действующим нормативным расчетом по СП 16.13330.2017.*

### Ключевые слова:

*Высокопрочная сталь, испытания, конечно-элементный расчет, сжатие, труба, устойчивость*

*A study was made of the physicommechanical and engineering properties of electrically welded straight-seamed high-strength pipes. The issue of the relevance of their use in steel structures is considered. The article describes the advantages of a pipe as a structural element as well as the experience of using them as an example of unique structures. The results of full-scale tests of full-scale pipe models for central and eccentric compression are presented. The results of investigations of the steels under consideration are presented. Results of full-scale tests are compared with numerical calculations in the software complex Ansys and with the current normative calculation for SP 16.13330.2017.*

### Key words:

*Compression, finite element test, high-strength steel, pipe, resist*

## Введение

При проектировании металлических конструкций приходится учитывать множество факторов, которые влияют на форму и размеры используемых поперечных сечений. В стальном строительстве наибольшую популярность имеет фасонный прокат [1]. Его использование является наиболее универсальным в отношении монтажа, экономики и несущей способности. Однако в некоторых случаях (проектирование уникальных сооружений) вместо фасонных целесообразнее использовать замкнутые профили [2], например, трубы круглого сечения.

В работе [3] подробно описывается преимущество использования трубчатых конструкций, в частности, на примере фермы пролетом 30 м из высокопрочной стали с пределом текучести 450 - 500 МПа (рис. 1). В этой статье обосновывается экономическая эффективность данного решения по сравнению с фермой из уголков. При наличии необходимого заводского оборудования трубчатая ферма обходится дешевле примерно на 17 % и снижает расход стали до 50 %.

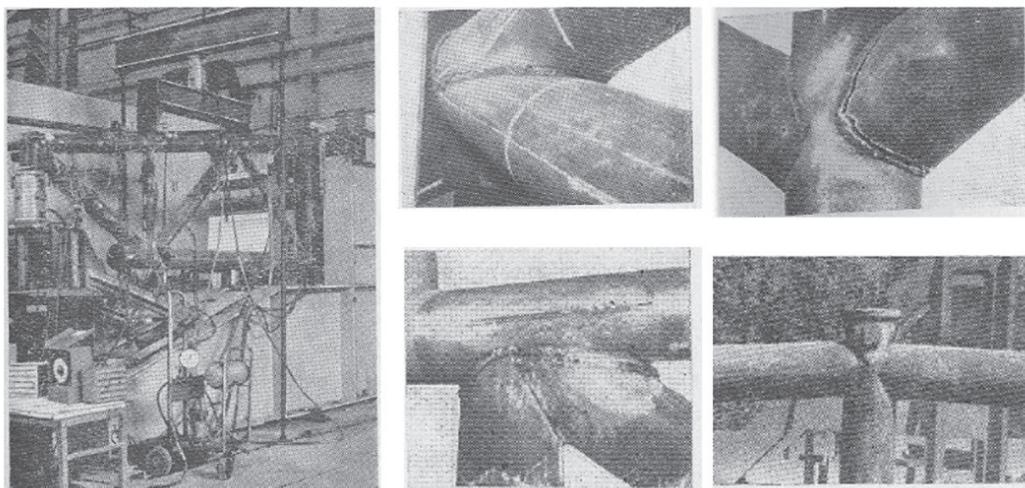


Рис. 1. Исследования трубчатых ферм из высокопрочной стали в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко под руководством д.т.н., проф. С. А. Ильясевича

## Трубы в металлических конструкциях

В последние годы наблюдается тенденция использования труб большого диаметра для уникальных сооружений. К таким сооружениям можно отнести Останкинскую телебашню, крытый конькобежный центр в Крылатском, стадион «Спартак» в Москве (рис. 2), универсально-футбольный стадион в Казани, терминал А аэропорта Внуково. В Останкинской телебашне использовались трубы диаметром до 4 м с толщиной стенок до 30 мм. В покрытии конькобежного центра применялись трубы диаметром 2,5 м с толщиной стенок 50 мм.



**Рис. 2.** Электросварные прямошовные трубы в конструкциях футбольного стадиона в Казани

Помимо уникальных сооружений из труб, в мировой практике строительства широко используются структурные плиты покрытий из трубчатых профилей.

В настоящее время идет активное расширение сортамента строительных металлоконструкций, и трубы все более прочно закрепляются в качестве рядового элемента для проектирования. Их преимущественно используют в качестве стержней, работающих на сжатие или растяжение. Они находят применение в качестве раскосов, стоек, поясов ферм, вертикальных и горизонтальных связей, колонн. Также достаточно большое распространение получили трубы, заполненные бетоном, так называемый трубобетон, его активно используют в качестве колонн высотных зданий и большепролетных сооружений.

На данный момент разработан и утвержден новый ГОСТ Р 58064-2018 «Трубы стальные сварные для строительных конструкций. Технические условия», разработанный при участии авторов настоящей статьи. Этот стандарт распространяется на стальные сварные трубы для зданий и сооружений любого назначения и уровня ответственности с диаметром до 1420 мм. Также в 2018 г. выпущена новая редакция СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции», в которой расширен список разрешенных для использования стальных труб в строительстве. Ранее трубы были выделены в отдельную таблицу, в которой наиболее прочная сталь имела предел текучести 345 МПа. В новой редакции трубы объединены с листовым и сортовым прокатом, стало доступно применение высокопрочных сталей вплоть до С690, что соответствует современному уровню развития металлургии.

К достоинствам круглого трубного профиля можно отнести симметричность поперечного сечения относительно центра тяжести, что дает одинаковую изгибную жесткость, а, следовательно, одинаковую гибкость в любой продольной плоскости. Исходя из этого, трубы хорошо работают на сжатие [4]. В сравнении с двутаврами аналогичной площади поперечного сечения значение критической силы у труб на 7-10 % больше (рис. 3). Также они обладают большим резервом несущей способности на изгиб

$$c = \frac{W_{пл}}{W} \approx 2 .$$

Для двутавров это значение составляет около 1,1. Этот коэффициент характеризует увеличение несущей способности на изгиб при учете пластической работы материала [7].



Рис. 3. Сравнение трубы и двутавра при центральном сжатии

В эксплуатационном отношении достоинство труб в силу их формы заключается в отличной устойчивости к коррозионным, температурным и ветровым воздействиям.

Также необходимо отметить, что в зарубежной практике использование труб считается достаточно технологичным решением и широко распространено.

### Исследование трубных сталей

Авторами проведены исследования основного металла трубы путем стандартных испытаний на растяжение и ударный изгиб.

#### • Прочность

Испытания проводились на цилиндрических продольных пятикратных образцах диаметром 5 мм в соответствии с ГОСТ 1497-84.

Металл по прочности полностью соответствует стали С440 ( $\sigma_T \geq 440$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_B = 540-700$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\delta_5 \geq 20$  %)  $\sigma_{шц}/\sigma_T$  и  $\sigma_T/\sigma_B > 0,9$ ; на диаграммах « $\sigma - \epsilon$ » (рис. 4) наблюдается площадка текучести; равномерное удлинение  $\delta_p \geq 5$  %. В разрушенном образце наблюдалось высокое относительное сужение ( $\psi \geq 65$  %), при этом шейка разрушенного образца имела существенную эллипсность:  $d_{k1}$  (по направлению прокатки) составлял  $\approx 3$  мм; в поперечном направлении диаметр составлял  $d_{k2} \approx 2$  мм. Обозначения здесь даны по ГОСТ 1497-84.

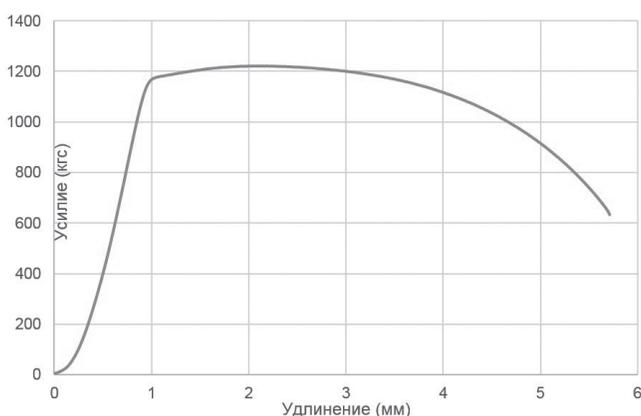


Рис. 4. Диаграмма растяжения трубной стали

#### • Ударная вязкость

Ударная вязкость основного металла труб оценивалась на ударных образцах  $7,5 \times 10 \times 55$  мм с острым надрезом (KCV) по ГОСТ 9454 при температурах ( $t, ^\circ\text{C}$ ): +20, -20, -40, -70, -100 (табл. 1).

Таблица 1

**Ударная вязкость металла труб (KCV)**

<i>Температура испытания</i>	<i>Ударная вязкость, Дж/см<sup>2</sup></i>
+20	312,3
-20	248,5
-40	196,2
-70	186,4
-100	37,6

Видно, что в интервале климатических температур ( $t \geq -70$  °С) ударная вязкость существенно выше жесткой нормы ГОСТ 27772-2015: KCV-60 > 66 Дж/см<sup>2</sup>. Полученные высокие результаты при самых низких климатических температурах типичны для металла обсуждаемых труб.

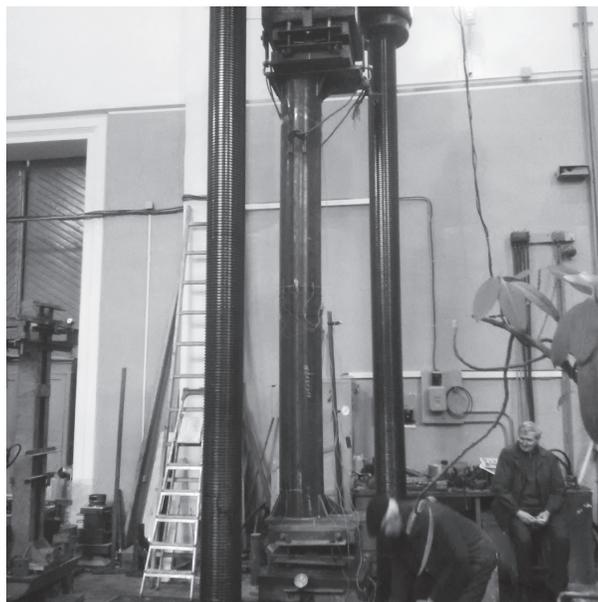
**Натурные испытания труб**

Испытаниям были подвергнуты 13 прямошовных труб различного диаметра и из разной стали (таблица 2)

Таблица 2

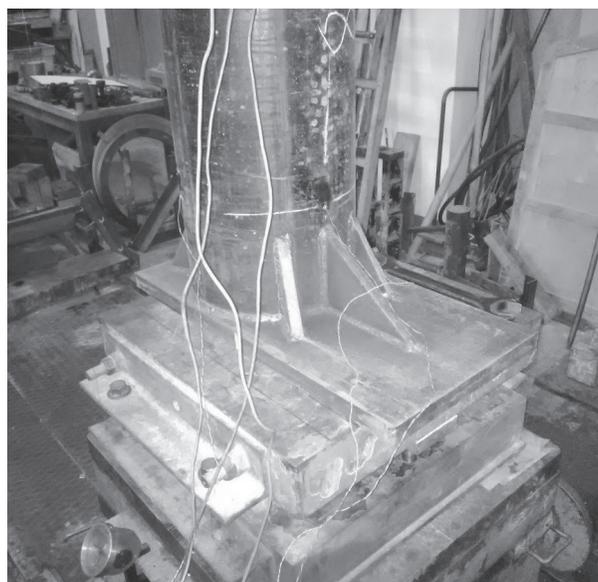
**Испытательные образцы труб**

<i>Маркировка</i>	<i>Сечение</i>	<i>Заявленная сталь</i>	<i>Эксцентриситет, мм</i>	<i>Длина, м</i>
T1.1	325 × 9	C390	120	3,3
T1.2	325 × 9	C345	120	2
T1.3	325 × 9	C345	120	2
T1.4	325 × 9	C390	120	3,3
T1.5	325 × 9	C390	70	3,3
T1.6	325 × 9	C390	0	3,3
T2.1	325 × 5	C390	120	3,3
T2.2	325 × 5	C390	120	3,3
T2.3	325 × 5	C390	70	3,3
T2.4	325 × 5	C390	0	3,3
T3.1	530 × 8	C390	150	3,3
T3.2	530 × 8	C390	210	3,3
T3.3	530 × 8	C390	0	3,3



**Рис. 5.** Общий вид испытательной модели Т1.1

Трубы изготовлены по ТУ-1380-060-05757848-2011. Имеют высоту 3300 (рис. 5) и 2000 мм. По торцам каждой модели приварены пластины толщиной 30-35 мм для равномерного распределения нагрузки от пресса (рис. 6). Размеры труб – по ГОСТ 10704-91. Марка стали торцевых пластин 09Г2С по ГОСТ 19281-89 эквивалентна стали С345 по ГОСТ 27772-88\*.



**Рис. 6.** Торцевая пластина и ребра жестки модели Т1.1

Испытания на сжатие проводились с использованием пресса MAN1000. Этот пресс способен обеспечить нагрузку до 1000 т, максимальная рабочая высота испытуемого образца 4 м.

Для проведения испытаний на центральное сжатие (рис. 7, а) испытуемый образец устанавливали между верхним и нижним столами пресса так, чтобы центральная ось трубы совпадала с центральной осью пресса. Тем самым равнодействующая прикладываемой нагрузки проходит непосредственно через ось трубы. Верхний и нижний столы пресса представляют собой шарниры в продольных плоскостях трубы.

Для испытаний на внецентренное сжатие (рис. 7, б) на верхний и нижний столы пресса дополнительно устанавливаются специальные ножи. Ножи позволяют сделать шарнир в однопродольной плоскости и точно установить значение эксцентриситета.

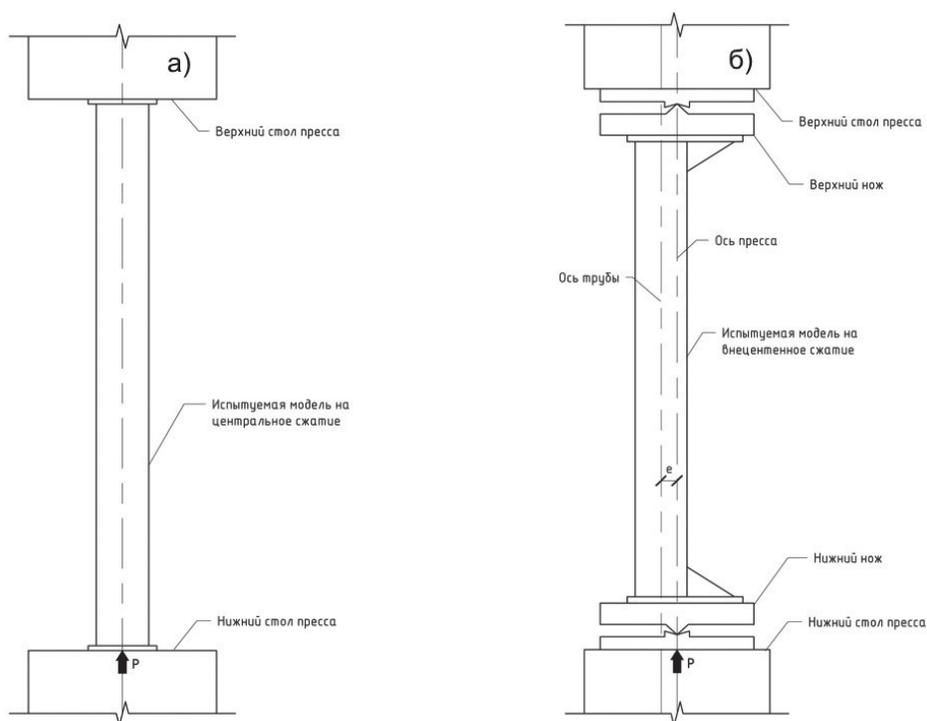


Рис. 7. Схемы испытаний труб: а – центральное сжатие; б – внецентренное сжатие

Для определения напряженно-деформированного состояния трубы применяли тензодатчики. Восемь тензорезисторов устанавливали в середине трубы и шесть – у торцов.

Вблизи верхней грани и посередине устанавливали прогибомеры Максимова для контроля общих вертикальных и горизонтальных перемещений модели. Верхний и нижний «столы» пресса должны свободно вращаться для моделирования шарнирного закрепления по концам.

### Результаты испытаний и сравнение с численным и нормативным расчетом

Вычисление коэффициентов устойчивости для труб, производилось в соответствии с СП 16.13330.2017 [5, 6]: для центрального сжатия – в соответствии с п. 7.1.3, а для внецентренно сжатых труб – по п. 9.1.2 как для сжато-изгибаемого элемента, теряющего устойчивость в плоскости изгиба (табл. 3).

Устойчивость труб также исследовалась при помощи конечно-элементных программных комплексов, в частности, в программе Ansys (рис. 8).

Расчетные схемы труб [8 – 10] задавали двумерными конечными элементами в виде треугольников. Шаг сетки подбирали путем тестовых итерационных расчетов трубы на устойчивость. При каждой новой итерации шаг сетки уменьшали в два раза до тех пор, пока разность с предыдущим расчетом стала менее 0,5 %. Размер элемента принимали в соответствии с предпоследней итерацией.

Торцевые узлы трубы между собой соединяли абсолютно жесткими конечными элементами. Снизу жесткий элемент закрепляли шарнирно, сверху по той же оси прикладывали сжимающую нагрузку с ограничением боковых смещений.

Задачу решали с учетом физической и геометрической нелинейностей. График работы материала принимали по Прандтлю. Начальное число шагов нелинейной задачи – 50.

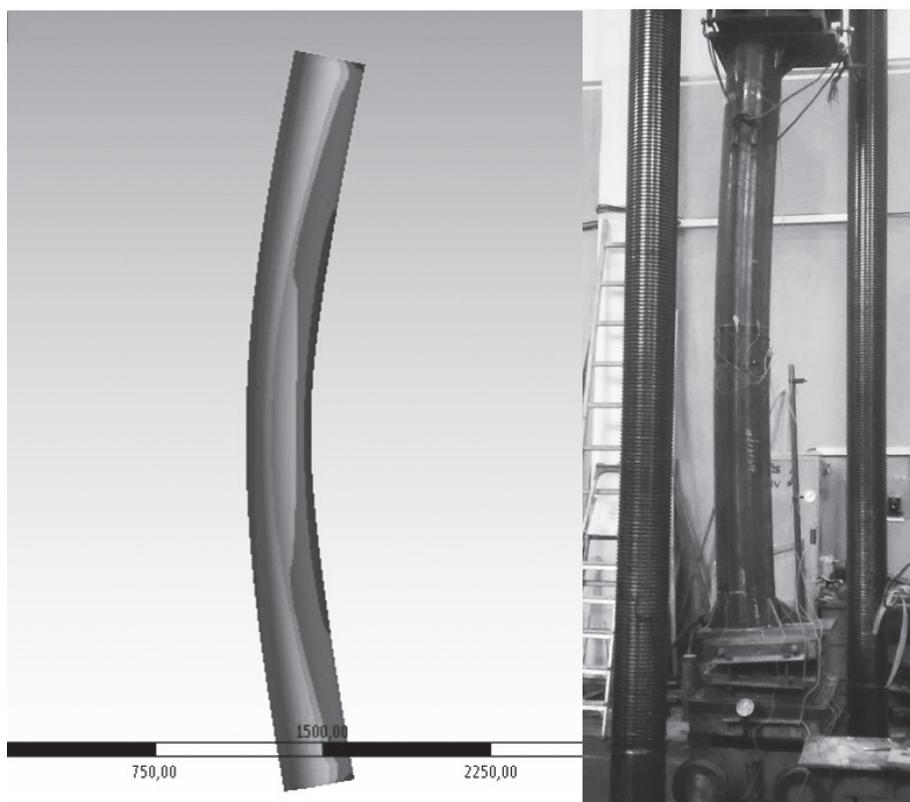


Рис. 8. Деформации по результатам численных и натуральных испытаний

Таблица 3

## Сравнение результатов испытаний с численным и нормативным расчетом

Маркировка	$P_{\text{исп}}$	$P_{\text{ан}}$	$P_{\text{сп}}$	$\Delta_1$	$\Delta_2$
T1.1	210	221,54	166,75	5,50	-20,60
T1.2	208	210,60	163,71	1,25	-21,29
T1.3	208	210,60	163,71	1,25	-21,29
T1.4	210	221,54	166,75	5,50	-20,60
T1.5	270	284,33	210,18	5,31	-22,16
T1.6	480	487,62	336,46	1,59	-29,90
T2.1	120	123,80	95,26	3,17	-20,62
T2.2	118	119,33	95,26	1,13	-19,27
T2.3	165	172,25	119,62	4,39	-27,50
T2.4	276	280,99	189,54	1,81	-31,33
T3.1	370	381,97	309,29	3,23	-16,41
T3.2	294	306,20	263,06	4,15	-10,52
T3.3	650	687,02	512,40	5,69	-21,17

Примечания:

$P_{\text{исп}}$  – критическая нагрузка по результатам испытаний;

$P_{\text{ан}}$  – критическая нагрузка по результатам расчета в Ansys;

$P_{\text{сп}}$  – критическая нагрузка по результатам расчета по СП 16.13330.2017;

$$\Delta_1 = \left( \frac{P_{\text{ан}}}{P_{\text{исп}}} - 1 \right) \cdot 100 \% ; \quad \Delta_2 = \left( \frac{P_{\text{сп}}}{P_{\text{исп}}} - 1 \right) \cdot 100 \% .$$

В расчетах применялись прочностные характеристики, полученные по итогам испытаний стальных.

### Выводы

1. Проведены полномасштабные натурные испытания 13 прямошовных труб сечением  $350 \times 9$ ,  $325 \times 5$ ,  $530 \times 8$  на центральное и внецентренное сжатие. Получены критические нагрузки, формы потери устойчивости, деформации, перемещения, напряжения.

2. Выявлено, что наличие шва в исследуемых прямошовных трубах, сваренных при помощи ТВЧ, не влияет на их несущую способность, поскольку разница распределения напряжений между численным (идеализированным) расчетом и экспериментом, минимальная.

3. Нормативный расчет по СП 16.13330.2017 дает запас несущей способности до 31 %. Численный расчет по МКЭ близок к действительности, его результаты дают критическую нагрузку на 1 - 5 % выше экспериментальных.

4. Результаты описанных испытаний будут использованы для актуализации СП 16.13330.2017, которую ведет ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. В частности, уточнения коснутся разделов 7.1 и 9.2.

5. По результатам испытаний прямошовных труб можно заключить, что такие трубы полностью удовлетворяют требованиям СП 16.13330.2017. Эти трубы можно рекомендовать к использованию в промышленном и гражданском строительстве для изготовления стальных конструкций любой группы. Также можно утверждать, что данная металлопродукция удовлетворяет всем требованиям надежности, в том числе ФЗ-384.

## Библиографический список

1. О внедрении новых профилаэразмеров и сталей различного класса прочности на примерах наиболее востребованных зданий / Д. В. Конин [и др.] // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. №2. С. 71-75;

2. Конин Д. В., Одесский П. Д., Олуромби А. Р. Влияние диаграммы «б - е» на несущую способность при сжатии труб из стали высокой прочности, // Строительство и реконструкция. 2017. №5. С. 15-19;

3. Ильясевич С. А. Стальные конструкции из труб. М.: Стройиздат, 1973.

4. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. М.: Издательство СКАД СОФТ, 2007.

5. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*). М.: (ЦИТП) Госстроя СССР, 1989.

6. Кудишин Ю. И., Беленя Е. И., Игнатьева В. С. и др. Металлические конструкции. М.: Издательство «Академия», 2011.

7. Кользеев А. А. Оценка влияния замкнутой формы сечения на устойчивость сжатых стальных стержней трехпоясных ферм // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. №11-12. С. 108-113.

8. Лейтес С. Д. Устойчивость сжатых стальных стержней. М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952.

9. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967.

10. Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959.

## Авторы:

Иван Иванович ВЕДЯКОВ, д-р техн. наук, проф., заведующий лабораторией металлических конструкций, директор ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Ivan VEDYAKOV, Doctor of Engineering, Full Professor, Head of Metal structures Laboratory, Director of TSNIISK named after V. A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: vedykov@gmail.com

тел.: +7 (499) 171-26-50

Денис Владимирович КОНИН, канд. техн. наук, заведующий сектором ВЗиС ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Denis KONIN, Ph.D. in Engineering, Chief manager of Sector HRB&C, TSNIISK named after V. A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: konden@inbox.ru

Александр Ричардович ОЛУРОМБИ, старший научный сотрудник лаборатории металлических конструкций ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Alexander OLUROMBI, Senior researcher of Metal structures Laboratory, TSNIISK named after V. A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: alexolrich@gmail.com