

А.Л. КРИШАН¹, В.И. РИМШИН², В.Д. КОЛЕСНИКОВ¹, М.А. АСТАФЬЕВА¹,
М.А. ЛИХИДЬКО¹

¹ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск,
Россия

² Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия

ПРОЧНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Аннотация. Предложена усовершенствованная конструкция изгибаемого трубобетонного элемента прямоугольного сечения, имеющая большую прочность и требующая значительно больших затрат энергии на разрушение по сравнению с известными аналогами. Для проверки эффективности предложенной конструкции проведены экспериментальные исследования прочности нормальных сечений и жесткости трубобетонных балок при четырех точечном изгибе. Исследования показали, что за счет одновременного усиления сжатой и растянутой зон удалось повысить прочность нормальных сечений балок. Рост прочности балок усовершенствованной конструкции в среднем составил 42%. Жесткость не усиленных трубобетонных балок оказалась значительно выше по сравнению с балками без заполнения стальной трубы бетоном. В балках усовершенствованной конструкции жесткость была еще примерно на 20 % выше. Результаты сопоставления расчетной прочности трубобетонных балок по методу предельных усилий с опытными данными свидетельствует об их удовлетворительном соответствии.

Ключевые слова: изгибаемый трубобетонный элемент, усовершенствованная конструкция, прочность нормальных сечений, жесткость.

A.L. KRISHAN, V.I. RIMSHIN, V.D. KOLESNIKOV, M.A. ASTAFEVA, M.A. LIKHIDKO

¹Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

² Scientific Research Institute of Structural Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

STRENGTH OF BENDING CONCRETE FILLED STEEL ELEMENTS OF IMPROVED DESIGN

Abstract. An improved design of concrete filled steel tube element of rectangular cross-section subjected to bending has been proposed, which has greater strength and requires significantly greater energy consumption for destruction compared to known analogues. To test the effectiveness of the proposed design, experimental studies were carried out on the strength of normal sections and the beam rigidity of concrete filled steel tube beams under four-point bending. Research has shown that by simultaneously strengthening the compressed and tensile zones, it was possible to increase the strength of normal sections of beams. The increase in strength of beams of the improved design averaged 42%. The rigidity of non-reinforced concrete filled steel tube beams turned out to be significantly higher compared to beams without filling the steel pipe with concrete. In the improved beams, the stiffness was still approximately 20% higher. The results of comparing the calculated strength of concrete filled steel tube beams using the limit force method with experimental data indicate their satisfactory agreement.

Keywords: concrete filled steel tube subjected to bending, improved design, strength of normal sections, rigidity.

Введение

Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном (СТБ), широко используются при строительстве зданий во многих странах мира.

© Кришан А.Л., Римшин В.И., Колесников В.Д., Астафьева М.А., Лихидько М.А., 2024

Они удачно сочетают в себе преимущества как стальных, так и железобетонных конструкций: высокие прочность и жесткость, пластический характер разрушения, хорошую скорость возведения, относительно небольшую стоимость и т. д. [1-5].

Поведение СТБ конструкций изучали многие ученые, среди которых можно отметить Ахмед М. [6], Ду Г. [7], Джи Х. и Усами Т. [8], Хан Л.-Х. и Лам Д. [9], Хассанен М., Елкалакани М. и Пател В. [10], Кибрия Т. [11], О Шиа М. и Бридж Р. [12], Ю Б. и Тао З. [13]. Однако большинство предыдущих исследований было сосредоточено на поведении центрально и внецентренно сжатых СТБ. Исследований, посвященных СТБ конструкциям, подвергавшимся изгибу, крайне мало. В СССР под руководством Л.И. Стороженко проводили исследования изгибаемых трубобетонных элементов, но их эффективность оказалась невысока, поскольку они имели круглое или кольцевое поперечное сечение. В последние годы проведено ряд зарубежных исследований элементов с квадратным или прямоугольным поперечным сечением [14-26]. Очевидно, что более эффективны были балки с прямоугольным сечением. Основные результаты этих исследований следующие:

- разрушение балок происходило по нормальным сечениям в зоне действия максимального изгибающего момента;
- прочность на изгиб прямоугольных СТБ элементов на 10–50% выше, по сравнению с со стальными профилями. Прирост прочности зависит от прочности бетона, геометрических и механических характеристик стальной трубы;
- по сравнению со стальными профилями заметно возросла жесткость элементов;
- возросла площадь под криволинейной зависимостью «нагрузка-прогиб», что свидетельствует об увеличении энергии поглощения;
- к моменту разрушения прямоугольных СТБ элементов проявляется локальный изгиб сжатой полки стальной трубы и трещины в растянутой зоне бетона в средней части пролета.

Для еще большего увеличения прочности нормальных сечений и пластического характера разрушения была предложена усовершенствованная конструкция изгибаемого СТБ элемента. Целью данного исследования являлась экспериментальная проверка эффективности предложенной усовершенствованной конструкции балки.

Материалы и методы

Экспериментальному исследованию подвергались СТБ балки прямоугольного сечения. Для внешнего армирования балок использовались трубы с размерами поперечного сечения 160×80×4 мм из стали С345. Отношение высоты и ширины поперечного сечения к толщине стенки входит в пределы, рекомендуемые действующими стандартами стран (EuroCode 4, СП 266.1325800.2016), в которых достаточно широко применяются подобные конструкции [27].

Трубы заполнялись самоуплотняющейся бетонной смесью (СУБ). Использовался тяжелый бетон класса В70. Пролет балок составлял 2,9 м (рисунок 1).

Всего было изготовлено и испытано девять балок, разделенных на три серии (по три балки в серии). Балки разных серий отличались между собой конструктивным исполнением. Первая серия Б-1 включала в себя три балки «классической» конструкции, которую можно коротко охарактеризовать как бетон в трубе. Вторая серия Б-2 имела усовершенствованную конструкцию. В сжатой зоне средней части пролета балок этой серии размещался арматурный каркас, состоящий из четырех продольных стержней и навитой на них спирали. В качестве продольной арматуры применялась Ø6 А400, а в качестве косвенной арматуры Ø6 А240. Среднее значение предела текучести этой арматура составляло, соответственно 450 МПа и 310 МПа. Шаг стержней спирали был принят 25 мм, диаметр спирали – 60 мм. Провисание спирали в пролете исключали небольшим предварительным напряжением продольных

стержней за счет накручивания на резьбу по концам этих стержней гаек с опиранием в стальные торцевые пластины.

Для полного включения спирали в работу балки необходимо было обеспечить усиление растянутой зоны замкнутой металлической оболочки. С этой целью увеличивалась толщина нижней полки стальной трубы. Ко всей внутренней поверхности этой полки на сварке прикрепляли металлический лист толщиной 4 мм из стали С345. Хорошее сцепление листа с бетоном растянутой зоны обеспечивали анкера в виде приваренных к нему стальных равнополочных уголков 25×2 мм.

Третья серия Б-3 имела лишь одно отличие от серии Б-2. В трубах балок этой серии срезались верхние полки, которые затем использовались для усиления нижних полок замкнутых металлических оболочек. Такой вариант конструкции облегчал процесс бетонирования балок. Применение СУБ для обеспечения качественного заполнения трубы смесью становилось здесь необязательным.

Испытания балок проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 8829-94 с целью определения прочности нормальных сечений при кратковременном нагружении при четырехточечном изгибе, а также контроля жесткости и трещиностойкости. Балки устанавливались на специально изготовленный испытательный стенд (рисунок 2).

Нагрузка создавалась гидравлическим домкратом грузоподъемностью 50 т. В процессе ступенчатого нагружения проводились замеры прогибов и деформаций поперечного сечения трубы в средней части пролета балки. Для этого использовались прогибомеры, тензометры Аистова и электротензорезисторы. В наиболее сжатой зоне с помощью индикаторов часового с ценой деления 0,001 мм проводились замеры продольных деформаций бетона. Методика таких измерений подробно описана в [1]. На рисунке 2 можно увидеть расстановку измерительных приборов.

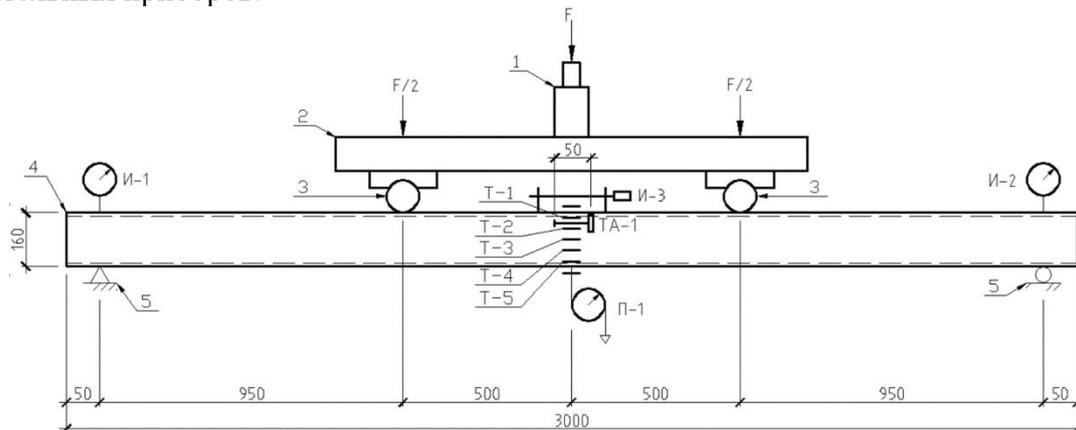


Рисунок 1 – Конструкция СТБ балок

1 – гидравлический домкрат; 2 – распределительная траверса; 3 – грузовые шарниры;
4 – стальная оболочка (160x80x4, ГОСТ 30245-2003); 5 – опоры; 6 – бетонное ядро;
И – индикаторы часового типа; П – прогибомер; ТА – тензометр Аистова



Рисунок 2 – Балка серии Б.ІІ в момент испытания

Результаты и обсуждения

Основные результаты испытаний, а также расчетное значение предельного изгибающего момента, сведены в таблицу 1. В ней представлены:

- призмная прочность бетона R_{bi} ;
- осредненная прочность бетона сжатой зоны с учетом косвенного армирования спиралью R_{br} ;
- фактическая высота сжатой зоны бетона перед разрушением балки x_{ϕ} ;
- максимальный изгибающий момент в середине пролета балки M_u^{exp} ;
- теоретическое значение разрушающего изгибающего момента M_u^{th} .

Данные таблицы 1 свидетельствуют о следующем. Наличие высокопрочного бетона в трубе положительно сказалось на прочности балок. Прочность балок серии Б.І оказалась в 1,52 раза выше по сравнению с расчетной прочностью стальной трубы. Одновременно достигнут существенный рост прочности СТБ балок усовершенствованной конструкции.

Таблица 1 – Прочность исследованных трубобетонных образцов

№ n/n	Серия, образец	R_{bi} , МПа	R_{br} , МПа	x_{ϕ} , мм	M_u^{exp} , кН×м	M_u^{th} , кН×м,	$\frac{M_u^{exp}}{M_u^{th}}$
1	Б.І – 1	73,3	73,3	64	51,47	53,62	0,96
2	Б.І – 2	70,8	70,8	64	57,71	53,44	1,08
3	Б.І – 3	71,8	71,8	64	49,76	53,51	0,93
4	Б.ІІ-1	74,5	111,1	62	76,95	73,99	1,04
5	Б.ІІ-2	71,3	106,3	64	71,70	73,92	0,97
6	Б.ІІ-3	72,2	107,6	63	75,50	74,02	1,02
7	Б.ІІІ-1	72,5	108,0	79	64,04	69,60	0,92
8	Б.ІІІ-2	71,8	107,0	79	74,35	69,50	1,07
9	Б.ІІІ-3	73,4	109,4	78	72,56	69,77	1,04

Предельное значение изгибающего момента M_u^{exp} в балках серии Б.ІІ в среднем на 42% выше, чем в балках серии Б.І. Для серии Б.ІІІ этот прирост немногим меньше – 34%, однако и такой результат следует считать очень хорошим. Рост прочности нормальных сечений в балках этих серий обусловлен увеличением прочности сжатого бетона за счет косвенного армирования и усилением растянутой полки.

Дополнительным подтверждением проявления эффекта косвенного армирования сжатой зоны бетона являются данные, полученные по деформациям бетона и стальной трубы в нормальном сечении. На рисунке 3 приведены характерные графические зависимости продольных деформаций в различных точках по высоте нормального сечения от уровня нагружения для всех трех серий. Они свидетельствуют о заметно большей предельной деформативности балок усовершенствованной конструкции.

Зависимости прогиба от изгибающего момента (рисунок 4) свидетельствуют о том, что жесткость балок обеспечивает их пригодность к нормальной эксплуатации. При значении изгибающего момента 60% от предельного (примерный уровень максимальных эксплуатационных нагрузок) прогиб составлял 13÷16 мм, что составляет менее 1/150 пролета. Для балки из стальной трубы расчетный прогиб при таком же значении момента равен 23 мм. К моменту потери прочности прогиб СТБ балок был равен 40÷55 мм и далее начинал резко нарастать. Сравнение зависимостей, приведенных на рисунке 4 балками серии Б.І. Основной вывод из этого сравнения заключается в том, что площадь под зависимостью «нагрузка-прогиб» в балках усовершенствованной конструкции существенно больше, что свидетельствует о заметно больших затратах энергии на их разрушение.

В целом характер разрушения балок всех серий был схож. В сжатой зоне балок серий Б.І и Б.ІІІ наблюдалась местная потеря устойчивости верхней полки стальной трубы. В зоне чистого изгиба в растянутой зоне бетона образовывались нормальные трещины. Факт их наличия определяли после вырезания стенок стальных труб испытанных балок (рисунок 5). Параметры этих трещин в балках всех серий были примерно одинаковы. Расстояние между трещинами составляло от 125 до 150 мм. По высоте сечения они распространялись от нижней полки вверх на 85÷90 мм, т.е. почти достигали нейтральной оси. Максимальная ширина раскрытия этих трещин оказалась равной 0,6 мм. Очевидно, что при уровне эксплуатационных нагрузок ширина раскрытия трещин значительно меньше.

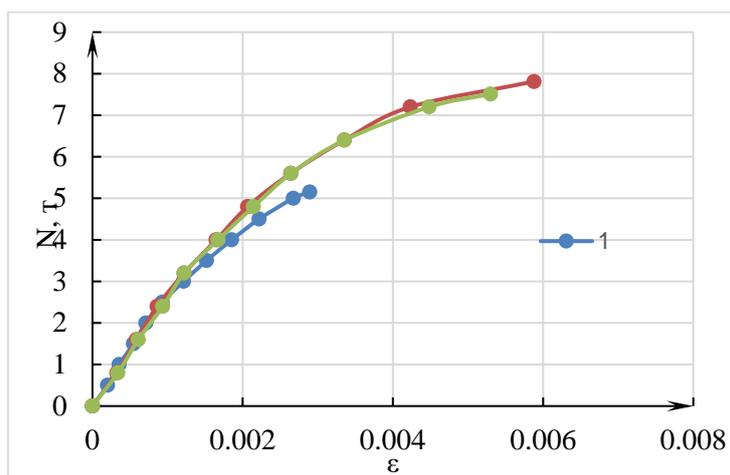


Рисунок 3 – Характерные зависимости продольных деформаций в различных точках по высоте нормального сечения от уровня нагружения для балок серий: 1 – Б.І ; 2 – Б.ІІ ; 3 – Б.ІІІ

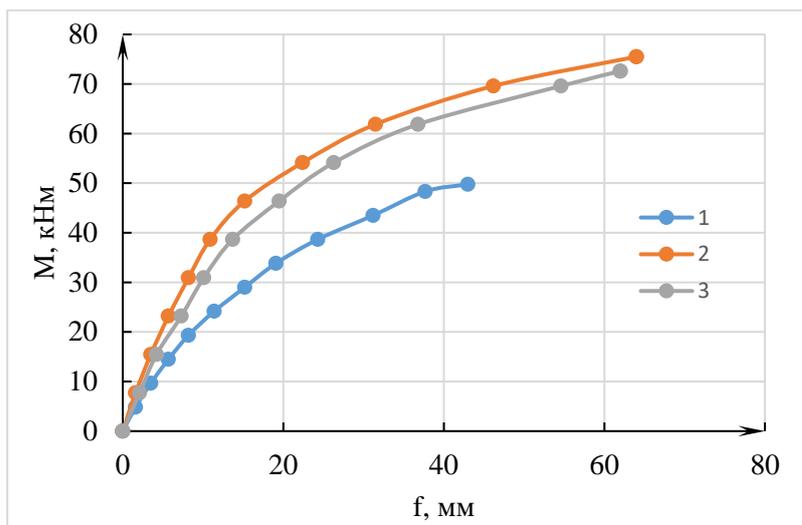


Рисунок 4 – Зависимость прогиба от изгибающего момента для балок трех серий



Рисунок 5 – Нормальные трещины в бетоне растянутой зоны балок

Расчет прочности

Расчет прочности нормальных сечений балок выполнен с использованием метода предельных усилий. Принятая расчетная схема усилий и эпюра напряжений показаны на рисунке 6.

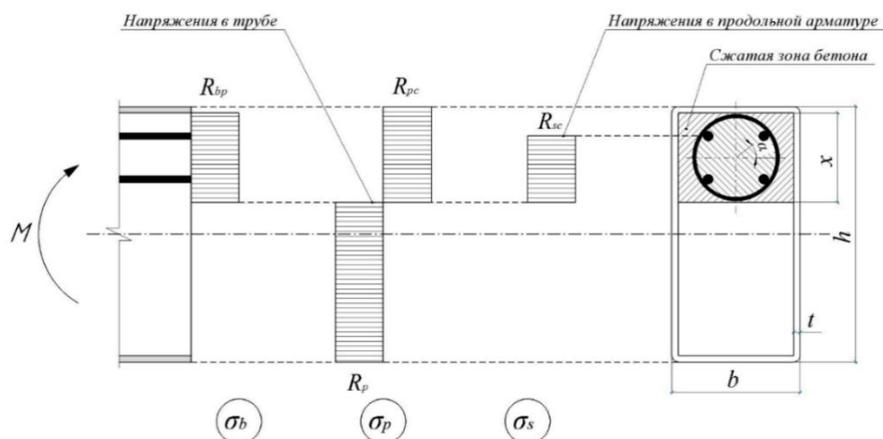


Рисунок 6 – Расчетная схема усилий и напряжений в нормальном сечении балки

Предельное напряжение в бетоне сжатой зоны балки R_{bp} принимается в зависимости от наличия спирального армирования. Для балок серии Б.1 $R_{bp} = R_{bu}$. Для балок со спиральной арматурой оно вычисляется по формуле

$$R_{bp} = \frac{R_{bu}(A_b - A_c) + R_{b3}A_c}{A}, \quad (1)$$

где A_b – площадь сжатой зоны бетона в поперечном сечении;

A_c – площадь поперечного сечения бетонного ядра, ограниченного спиральной арматурой;

R_{b3} – прочность объемно сжатого бетонного ядра, для тяжелого бетона определяемая по формуле

$$R_{b3} = R_{bu} \left[1 + \left(0,5\bar{\sigma} + \frac{\bar{\sigma}-2}{4} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma}-2}{4}\right)^2 + \frac{\bar{\sigma}}{0,096}} \right) \right], \quad (2)$$

в которой $\bar{\sigma}$ – относительная величина бокового давления со стороны стальной оболочки на бетонное ядро в предельном состоянии

$$\bar{\sigma} = \frac{2A_{sc}}{d_{sc}s} \cdot \frac{\sigma_{yc}}{R_{bu}} \quad (3)$$

В формуле (3) приняты следующие обозначения: σ_{yc} , A_{sc} , s – предел текучести, площадь поперечного сечения и шаг арматуры спирали; d_{sc} – диаметр спирали.

Площади A_b и A_c в формуле (1) зависят от высоты сжатой зоны, которая вначале расчета неизвестна. Косвенное армирование в балке должно использоваться эффективно. Для этого подбирается такая толщина δ листа усиления нижней полки трубы, чтобы вся спираль располагалась в сжатой зоне. С учетом данного фактора предлагается следующая последовательность расчета. Сначала положение нейтральной оси принимается совпадающей с нижней точкой спирали. Производятся расчеты и уточняются высота сжатой зоны из условия равновесия продольных усилий. Формула для расчета высоты сжатой зоны балки с верхней полкой трубы (серия Б.2) имеет следующий вид:

$$x = \frac{R_p [2(h-2t-\delta) + b(1 + \frac{\delta}{t})] - R_{pc}b - R_{sc} \frac{\delta A_{sc}}{t}}{R_{bp}(\frac{\delta}{t} - 2) + 2R_{pc} + 2R_p}. \quad (4)$$

После определения x площади A_b и A_c уточняются и при необходимости расчет предельного напряжения в бетоне R_{bp} повторяется.

Расчетная величина разрушающего момента определяется из условия прочности

$$M \leq R_{bp}x(b - 2t)z_1 + 2R_{pc}x \cdot t \cdot z_1 + R_{pc}bt(h - 1,5t) + R_p t(z_2 + \delta)z_2 + \sum R_{sc,i}A_{sc,i}z_i, \quad (5)$$

в котором z_1 , z_2 , z_i – плечи внутренних усилий сжатого бетона и сжатых стенок трубы, растянутых стенок трубы, соответствующего ряда продольной арматуры, рассчитываемые относительно центра тяжести растянутой полки трубы.

Теоретические значения разрушающего изгибающего момента для балок всех серий представлены в таблице 1. Сопоставление и свидетельствует об удовлетворительной точности использованной методики расчета. Одновременно расчеты подтвердили значительное повышение прочности балок усовершенствованной конструкции.

Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования показали, что за счет усовершенствования конструкции удалось значительно повысить прочность нормальных сечений трубобетонных балок прямоугольного поперечного сечения. Рост прочности в балках с косвенным армированием сжатой зоны бетона спиралью и усилением растянутой полки трубы дополнительным стальным листом по сравнению с аналогичной СТБ балкой

«классической» конструкции составил 42%. В усовершенствованных балках со срезанной верхней полкой стальной трубы прочность возросла на 33%.

2. Жесткость не усиленных СТБ балок оказалась не менее, чем в 1,5 раза выше по сравнению с балками без заполнения стальной трубы бетоном. В балках усовершенствованной конструкции жесткость была еще примерно на 20 % выше.

3. Теоретическое определение прочности СТБ балок, в том числе имеющих усовершенствованную конструкцию, может осуществляться с использованием метода предельных усилий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кришан А. Л., Римшин В. И., Астафьева М.А. Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика. Москва, 2020. 375 с.
2. Кришан А. Л., Римшин В. И., Астафьева М.А. Самозаклинивающиеся элементы в трубобетонных колоннах. *Academia. Архитектура и строительство*. 2023. № 3. С. 140-148. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2023-3-140-148> (дата обращения: 27.06.2024).
3. Кришан А. Л., Римшин В.И., Анпилов С.М., Астафьева М.А., Ступак А.А. Прочность коротких трубобетонных колонн квадратного сечения // *Русский инженер*, 2023. № 2 . С.46-48.
4. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А., Сагадатов А.И., Семенова М.Н., Ступак А.А. Прочность и деформативность сжатых трубобетонных элементов квадратного сечения // *БСТ: Бюллетень строительной техники*, 2022. № 6(1054). С. 16-18.
5. Кришан А.Л., Суровцов М.М. Экспериментальные исследования прочности гибких трубобетонных колонн // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2013. № 1(41). С. 90-92.
6. Ahmed M., Liang Q.Q., Patel V.I., Hadi M.N.S. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns // *Thin-Walled Structures*, 2019. (138). С. 105–116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.02.001>. (дата обращения: 27.06.2024).
7. Du, G.; Andjelic, A.; Li, Z.; Lei, Z.; Bie, X. Residual Axial Bearing Capacity of Concrete-Filled Circular Steel Tubular Columns // *Applied Sciences*, 2018. № 8 (793). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/5/793/htm> (дата обращения: 27.06.2024).
8. Ge H.B., Usami T. Strength analysis of concrete-filled tin-walled steel box columns // *Journal of Constructional Steel Research*, 1994. С. 259-281.
9. Han, L.-H., Lam, D., & Nethercot, D. Design Guide for Concrete-filled Double Skin Steel Tubular Structures (1st ed.). CRC Press. URL: <https://doi.org/10.1201/9780429440410>.
10. Hassanein M.F, Elchalakani M., Patel V.I. Overall buckling behaviour of circular concrete-filled dual steel tubular columns with stainless steel external tubes // *Journal Thin-Walled Structures*, 2017. №115. С. 336–348.
11. Kibriya T. Performance of Concrete Filled Steel Tubular Columns // *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2017. № 5(2). С. 35–39.
12. O'Shea M.D., Bridge R.Q. Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes // *Journal of Structural Engineering*, 2000. №126(11). С. 1295–1303.
13. Uy B., Tao Z., Han L.H. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns // *Journal of Constructional Steel Research*, 2011. №67. С. 360-378.
14. Abed F.H., Abdelmageed Y.I., Ilgun A.K. Flexural response of concrete-filled seamless steel tubes // *Journal of Constructional Steel Research*, 2018. №149. С. 53–63.
15. Jiang A., Chen J., Jin W-L. Experimental investigation and design of thin-walled concrete-filled steel tubes subject to bending // *Thin-Walled Structures*, 2013. № 63. С. 44–50.
16. Gho W.M., Liu D. Flexural behavior of high-strength rectangular concrete- filled steel hollow sections // *Journal of Constructional Steel Research*, 2004. №60. С.1681–96.
17. Guochang Li, Di Liu, Zhijian Yang, Chunyu Zhang. Flexural behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube // *Journal of Constructional Steel Research*, 2017. №128. С. 732–744.
18. Han L.-H., Lu H., Yao G.-H., Liao F. Further Study on the Flexural Behavior of Concrete-filled Steel Tubes // *Journal of Constructional Steel Research*, 2006. №62(6). С. 554-565.
19. Hemzah S.A., Al-Obaidi S., Salim T. Flexural behavior of concrete filled steel tube composite with different concrete compressive strength // *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2018. № 9(7). С. 824–832.
20. Ming-Xiang Xiong, De-Xin Xiong, J.Y. Richard Liew. Flexural performance of concrete filled tubes with high tensile steel and ultra-high strength concrete // *Journal of Constructional Steel Research*, 2017. № 132. С. 191–202.

21. Tomii, Masahide and Kenji Sakino. Elasto-plastic behavior of concrete filled square steel tubular beam-columns // Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1979. №280. С. 111–20.
22. Uy B. Strength of short concrete filled high strength steel box columns // Journal of Constructional Steel Research, 2001. №57. С. 113–134.
23. Wang R., Han L-H., Nie J-G., Zhao X-L. Flexural performance of rectangular CFST members // Thin-Walled Structures, 2014. №79. С.154–165.
24. Арленинов, П.Д., Крылов С.Б., Смирнов П.П. Расчетно-экспериментальные исследования изгибаемых трубобетонных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2017. № 4. С. 34-38.
25. Хазов П.А., Помазов А.П. Экспериментальное исследование продольного и поперечного изгиба трубобетонных стержней // Жилищное строительство, 2023. № 12. С. 66–71.
26. Якупова, Л.З., Астанков К. Ю., Овчинников И. Г. О возможности применения свода правил СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» для проектирования трубобетонных конструкций в малом мостостроении // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология, 2023. № 2. С. 112-121.
27. American Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 360-10. American Institute of Steel Construction, 2010.

REFERENCES

1. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafieva M.A. Szhatyye trubobetonnyye elementy. Teoriya i praktika [Compressed pipe concrete elements. Theory and practice]. Moscow: ASV. 2020. 375 p.
2. Rimshin V.I., Krishan A.L., Astafieva M.A. Self-jamming elements in pipe-concrete columns. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2023. No. 3. Pp. 140—148. (rus). [Online]. URL: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2023-3-140-148> (date of application: 27.06.2024).
3. Rimshin V.I., Anpilov S.M., Krishan A.L., Astafieva M.A., Stupak A.A. Strength of short tube-concrete columns of square section. *Russkii in zhener*. 2023. No. 2 (79). Pp. 46—48. (rus).
4. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafieva M.A., Sagadatov A.I., Semenova M.N., Stupak A.A. Strength and deformability of compressed tube-concrete elements of square section. *BST*. 2022. No. 6 (1054), pp. 16–18.(rus).
5. Krishan A.L., Surovtsov M.M. Experimental reserches of strength of flexible concrete-filled tube (CFT) columns. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013. No. 1(41). Pp. 90-92. (rus).
6. Ahmed M., Liang Q.Q., Patel V.I., Hadi M.N.S. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns. *Thin-Walled Structures*. 2019. (138). Pp. 105–116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.02.001>. (date of application: 27.06.2024).
7. Du, G.; Andjelic, A.; Li, Z.; Lei, Z.; Bie, X. Residual Axial Bearing Capacity of Concrete-Filled Circular Steel Tubular Columns. *Applied Sciences*. 2018. No. 8 (793). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/5/793/htm> (date of application: 27.06.2024).
8. Ge H.B., Usami T. Strength analysis of concrete-filled tin-walled steel box columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 1994. Pp. 259-281.
9. Han, L.-H., Lam, D., & Nethercot, D. Design Guide for Concrete-filled Double Skin Steel Tubular Structures (1st ed.). CRC Press. URL: <https://doi.org/10.1201/9780429440410>. (date of application: 27.06.2024).
10. Hassanein M.F, Elchalakani M., Patel V.I. Overall buckling behaviour of circular concrete-filled dual steel tubular columns with stainless steel external tubes. *Journal Thin-Walled Structures*. 2017. No. 115. Pp. 336–348.
11. Kibriya T. Performance of Concrete Filled Steel Tubular Columns. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2017. No. 5(2). Pp. 35–39.
12. O'Shea M.D., Bridge R.Q. Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes. *Journal of Structural Engineering*. 2000. No. 126(11). Pp. 1295–1303.
13. Uy B., Tao Z., Han L.H. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011. No.67. Pp. 360-378.
14. Abed F.H., Abdelmageed Y.I., Ilgun A.K. Flexural response of concrete-filled seamless steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. No.149. Pp. 53–63.
15. Jiang A., Chen J., Jin W-L. Experimental investigation and design of thin-walled concrete-filled steel tubes subject to bending. *Thin-Walled Structures*. 2013. No. 63. Pp. 44–50.
16. Gho W.M., Liu D. Flexural behavior of high-strength rectangular concrete- filled steel hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2004. No.60. PP.1681–96.
17. Guochang Li, Di Liu, Zhijian Yang, Chunyu Zhang. Flexural behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. No.128. Pp. 732–744.
18. Han L.-H., Lu H., Yao G.-H., Liao F. Further Study on the Flexural Behavior of Concrete-filled Steel Tubes. *Journal of Constructional Steel Research*. 2006. No.62(6). PP. 554-565.
19. Hemzah S.A., Al-Obaidi S., Salim T. Flexural behavior of concrete filled steel tube composite with different concrete compressive strength. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. No. 9(7). Pp. 824–832.
20. _Ming-Xiang Xiong, De-Xin Xiong, J.Y. Richard Liew. Flexural performance of concrete filled tubes with

high tensile steel and ultra-high strength concrete. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. No. 132. Pp. 191–202.

21. Tomii, Masahide and Kenji Sakino. Elasto-plastic behavior of concrete filled square steel tubular beam-columns. *Transactions of the Architectural Institute of Japan*. 1979. No.280. Pp. 111–20.

22. Uy B. Strength of short concrete filled high strength steel box columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2001. No.57. Pp. 113–34.

23. Wang R., Han L-H., Nie J-G., Zhao X-L. Flexural performance of rectangular CFST members. *Thin-Walled Structures*. 2014. No.79. Pp.154–165.

24. Arleninov, P.D., Krylov P.P., Smirnov P.P. Calculation of the central and eccentrically compressed pipe-concrete structures strength. *Sejstmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. 2017. No. 4. Pp. 34–38. (rus).

25. Khazov P.A., Pomazov A.P. Experimental study of longitudinal and transverse bending of pipe concrete rods. *Zhilishhnoe stroitel'stvo*. 2023. No. 12. Pp. 66–71. (rus).

26. Yakupova L.Z., Astankov K.Yu., Ovchinnikov I.G. The code of norms SP 266.1325800.2016 "Composite steel and concrete structures. Design rules" applicability for the low-span bridges made of concrete-filled steel tubes design. *Transport. Transportny'e sooruzheniya. E'kologiya*. 2023. No. 2. Pp. 112-121. (rus).

27. American Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 360-10. American Institute of Steel Construction. 2010.

Информация об авторах:

Кришан Анатолий Леонидович

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия,

доктор технических наук, профессор, советник РААСН, профессор кафедры проектирования и строительства зданий.

E-mail: kris_al@mail.ru

Колесников Владислав Дмитриевич

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия,

аспирант кафедры проектирования и строительства зданий.

E-mail: vladislav-kolesnikov74@mail.ru

Римшин Владимир Иванович

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия,

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН

E-mail: v.rimshin@niisf.ru

Астафьева Мария Анатольевна

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия,

кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и строительства зданий.

E-mail: skymanika@mail.ru

Лихидько Михаил Алексеевич

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия,

аспирант кафедры проектирования и строительства зданий.

E-mail: likhidkom@yandex.ru

Information about authors:

Krishan A.L.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation,

Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Adviser of RAACS, Professor of the Department of Design and Construction of Buildings.

E-mail: kris_al@mail.ru

Kolesnikov V. D.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation,

Postgraduate student of the Department of Design and Construction of Buildings.

E-mail: vladislav-kolesnikov74@mail.ru

Rimshin V. I.

Scientific-Research Institute of Building Physics of RAACS, Moscow, Russian Federation,

Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Corresponding Member of RAACS.

E-mail: v.rimshin@niisf.ru

Astafeva M.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation,

Candidate of Sciences (Engineering), Docent of the Department of Design and Construction of Buildings.

E-mail: skymanika@mail.ru

Likhidko M. A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation,

Postgraduate student of the Department of Design and Construction of Buildings.

E-mail: likhidkom@yandex.ru