

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 2. С. 141–153.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (2): 141–153.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.046

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-141-153

ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ И ТРУБОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Владимир Иванович Ерофеев¹, Павел Алексеевич Хазов²,
Анна Константиновна Ситникова²

¹*Институт проблем машиностроения РАН –
филиал Института прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

²*Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Существующая нормативная база и несовершенство методик расчета препятствуют широкому распространению трубобетонных конструкций, имеющих большой потенциал для промышленных и гражданских объектов, требующих малогабаритных сечений несущих элементов. С целью решения этой проблемы авторами проведена серия экспериментов, направленных на изучение поведения образцов различных сочетаний стальных и бетонных материалов при статическом нагружении. В статье рассматривается напряженно-деформированное состояние железобетонных и трубобетонных элементов. Представлены материалы испытаний образцов, выполнен анализ показателей несущей способности испытываемых образцов.

Экспериментальные исследования образцов проводились с использованием гидравлического пресса в 2 этапа.

В ходе испытаний получены критические нагрузки разрушения образцов, для каждого образца выявлен характер потери несущей способности и разрушения, построены диаграммы деформирования. Выполнен сравнительный анализ показателей несущей способности исследуемых образцов.

Анализ экспериментальных исследований показал нелинейное увеличение несущей способности при обеспечении совместности работы стальной оболочки и железобетонного ядра трубобетонного образца, а также подтвердил существенные преимущества трубобетонных конструкций перед «классическими» типами конструкций.

Ключевые слова: трубобетон, напряженно-деформированное состояние, малогабаритные сечения, эффективность трубобетона, несущая способность

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на фундаментальные научные исследования на 2021–2023 годы по теме № 0030-2021-0025 и при поддержке РФФИ (грант № 20-07-00914).

Для цитирования: Ерофеев В.И., Хазов П.А., Ситникова А.К. Прочность и устойчивость композитных железобетонных и трубобетонных образцов при статическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 2. С. 141–153. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-141-153.

ORIGINAL ARTICLE

STRENGTH AND STABILITY OF COMPOSITE CONCRETE AND PIPE-CONCRETE STRUCTURES UNDER STATIC LOAD

Vladimir I. Erofeev¹, Pavel A. Khazov², Anna K. Sitnikova²

¹Mechanical Engineering Research Institute RAS,
Branch of the Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The existing regulatory framework and imperfect calculation methods hinder the widespread use of pipe-concrete structures, which have great potential for industrial and civil facilities requiring small cross-sections of load-bearing elements. In order to solve this problem, a series of experiments is conducted to study the behavior of various combinations of steel and concrete materials under static load. Stress-strain state of composite and pipe-concrete structures is investigated. The analysis is given to the bearing capacity of test specimens. The critical load of specimen fracture is calculated, the bearing capacity loss and fracture are determined, deformation diagrams are suggested herein. The comparative analysis of bearing capacity of test specimens is conducted.

The analysis of experimental investigations shows the non-linear increase of bearing capacity during the joint operation of steel shell and reinforced concrete core of the pipe-concrete element, and advantages of pipe-concrete structures over conventional structures.

Keywords: pipe concrete, stress-strain state, small-sized sections, efficiency, bearing capacity

Funding: This work was carried out within the government contract No. 0030-2021-0025 of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and financially supported by Grant N 20-07-00914 from the Russian Foundation for Basic Research.

For citation: Erofeev V.I., Khazov P.A., Sitnikova A.K. Strength and stability of composite concrete and pipe-concrete structures under static load. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (2): 141–153. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-141-153.

Введение

В последние десятилетия широкое применение в подземных и гидротехнических инженерных сооружениях получили крупногабаритные трубобе-

тонные конструкции. Использование труб в качестве несъемной опалубки, а также обоймы, ограничивающей возможность бетона разрушаться в поперечном направлении, оказалось весьма эффективным и способным повысить несущую способность на десятки процентов. Тем не менее применение трубобетонных элементов в наземном строительстве не так распространено и ограничено в основном высотными объектами. Характерный размер поперечного сечения в таких конструкциях редко оказывается ниже 1000 мм, что ограничивает их использование в промышленных и гражданских объектах. Изучению свойств трубобетонных конструкций, а также поведения трубобетонных элементов значительных диаметров под воздействием различного рода нагрузок в отечественном [1, 2, 3, 4, 5] и зарубежном [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] научном сообществе уделяется большое внимание.

В отличие от предшественников [1, 2, 4, 5], авторы настоящей статьи считают, что применение трубобетонных конструкций малогабаритных (до 500 мм) сечений может оказаться весьма эффективным, если в перечне требований одновременно оказываются следующие:

- 1) сохранение повышенной несущей способности;
- 2) сопротивление накоплению повреждений и микродефектов различной природы;
- 3) сопротивление удару;
- 4) демпфирующие свойства, сопротивление резонансу.

Пунктам 1–3 соответствуют металлические конструкции, широко применяемые в промышленности. Тем не менее несоответствие пункту 4 является недостатком металлических конструкций, что приводит в ряде случаев к глобальному удорожанию.

Бетонные и железобетонные конструкции, в свою очередь, заметно проигрывают по пунктам 1–3, обладая при этом значительными демпфирующими свойствами.

В условиях тяжелого производства с наличием тяжелых динамических режимов работы важными являются все 4 перечисленных пункта, таким образом, внедрение трубобетонных конструкций малогабаритных сечений может оказаться актуальной задачей.

Несмотря на преимущества трубобетона, в настоящее время неполноценной представляется нормативная база и методики по расчету. Существующие документы не всегда четко раскрывают вопрос о внутренней статической неопределимости трубобетонного сечения, проблемы адгезии бетона и металла, устойчивости элементов даже при статическом нагружении. Несмотря на обозначенную «динамическую» область применения данных конструкций, изучение устойчивости должно опираться на статические испытания.

Работы [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23] посвящены экспериментальному исследованию устойчивости малогабаритных трубобетонных образцов. Неясным, как правило, остается вопрос влияния длины элемента на значения критических нагрузок – задача потери устойчивости в технике неразрывно связана с коэффициентами продольного изгиба. Таким образом, на данный момент не существует решения классической задачи Эйлера об устойчивости стержня, если сечение стержня является композитным. Также

активно проводятся численные исследования [10, 24, 25] расчета трубобетонных конструкций, однако данная область по-прежнему остается открытой.

С учетом вышесказанного проведение экспериментов по исследованию прочности и устойчивости трубобетонных стержней является актуальной темой для научных исследований и может привести к разработке действенных инженерных методик по расчету и конструированию трубобетонных элементов.

Методы

Объектом исследования являются специально изготовленные образцы из различных сочетаний стальных и бетонных материалов: бетон (рис. 1, а), железобетон с гибким армированием (рис. 1, б), трубобетон неармированный (рис. 1, в), трубобетон армированный (рис. 1, г). Все образцы имеют диаметр 76 мм, длина образцов составляет 100 мм.

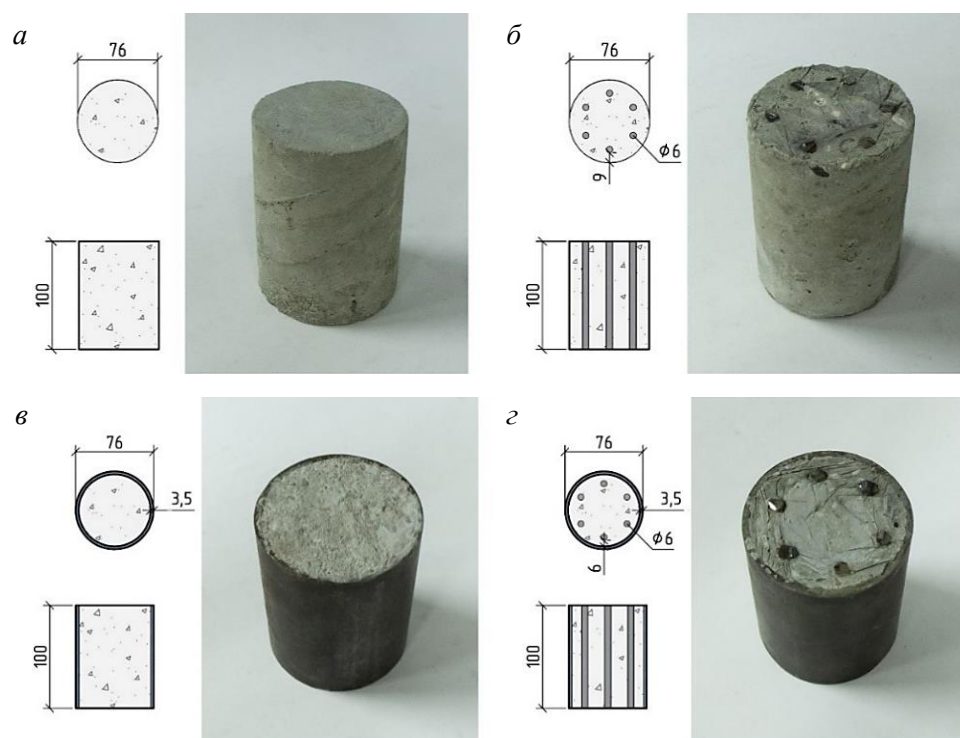


Рис. 1. Изготовленные образцы:

а – бетон; б – железобетон; в – трубобетон неармированный; г – трубобетон армированный

Fig. 1. Manufactured samples:

а – concrete; б – reinforced concrete; в – unreinforced pipe concrete; г – reinforced pipe concrete

Дополнительно были изготовлены железобетонный (рис. 2, а) и армированный трубобетонный (рис. 2, б) образцы длиной 700 мм для исследования вопросов потери устойчивости.

Испытания проводились в 2 этапа.

На первом этапе испытаны образцы длиной 100 мм (рис. 3) [15]. Испытания были проведены с помощью пресса П-125 (максимальная сила – 1250 кН) до разрушения и полной потери несущей способности. При этом фиксировалась разрушающая нагрузка, а также сближение пластин пресса для получения диаграммы деформирования.

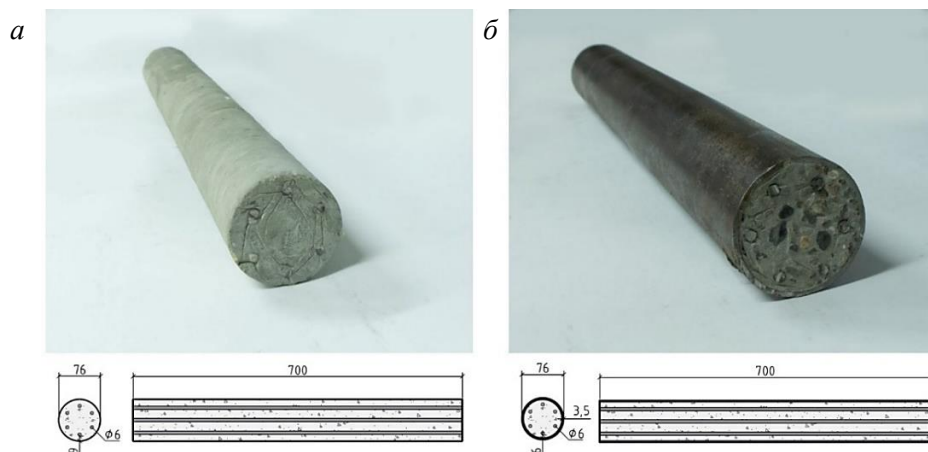


Рис. 2. Дополнительно изготовленные образцы:

a – железобетон; *б* – трубобетон армированный

Fig. 2. Additional fabricated samples:

a – reinforced concrete; *b* – reinforced pipe concrete

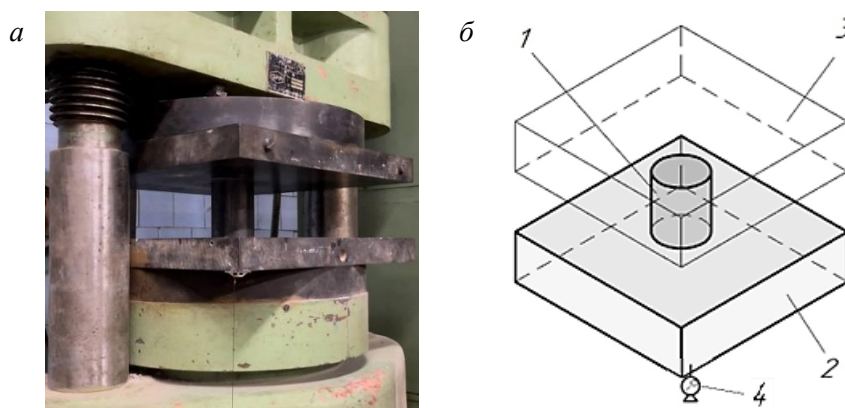


Рис. 3. Испытания образцов длиной 100 мм:

a – общий вид; *б* – принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – испытуемый образец; 2 – подвижная загрузающая пластина; 3 – неподвижная загрузающая пластина; 4 – индикатор для регистрации сближения пластин

Fig. 3. Testing of 100 mm long samples:

a – general view; *b* – schematic of experimental setup: 1 – test sample; 2 – movable loading plate; 3 – stationary loading plate; 4 – indicator for recording plate approach

На втором этапе испытаны образцы длиной 700 мм (рис. 4). Для построения характерных диаграмм была установлена дополнительная оснастка

(рис. 4, б) – прогибомеры в плоскости и из плоскости потери устойчивости, а также индикатор, фиксирующий сближение пластин.

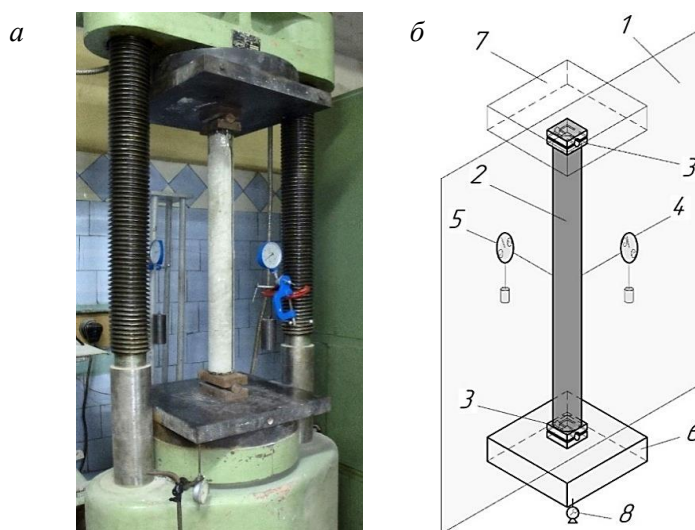


Рис. 4. Испытания образцов длиной 700 мм:

а – общий вид; б – принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – плоскость потери устойчивости; 2 – испытуемый образец; 3 – цилиндрический опорный шарнир; 4 – прогибомер в плоскости потери устойчивости; 5 – прогибомер из плоскости потери устойчивости (контрольный, диаграммы не приводятся); 6 – подвижная загрузающая пластина; 7 – неподвижная загрузающая пластина; 8 – индикатор для регистрации сближения пластин

Fig. 4. Testing of 700 mm long samples:

а – general view; б – schematic of experimental setup: 1 – stability loss plane; 2 – test sample; 3 – cylindrical supporting joint; 4 – deflectometer in stability loss plane; 5 – deflectometer from stability loss plane (diagrams are not shown); 6 – movable loading plate; 7 – stationary loading plate; 8 – indicator for recording plate approach

Испытания проводились в лаборатории кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО ННГАСУ. Нагрузка прикладывалась плавно, с применением видеофиксации показаний приборов. В соответствии с требованием ГОСТ 28570–2019 перед проведением испытаний торцы образцов выравнивались путем нанесения слоя состава на основе эпоксидной композиции. По ссылкам¹ представлены видеозаписи проведенных экспериментов.

Результаты

Для оценки результатов исследования были введены следующие критерии:

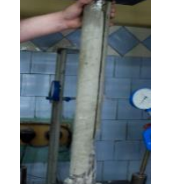
- нагрузка, при которой произошла полная потеря несущей способности;
- характер потери несущей способности;
- характер разрушения.

Результаты по каждому образцу сведены в таблицу.

¹ Испытания трубобетонных образцов на прочность // YouTube. URL: <https://youtu.be/SxxQ3lr5i54>; Испытали бетон В12,5 // YouTube. URL: https://www.youtube.com/watch?v=bmgA_B_WWto; Разрушаем железобетонную стойку // YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=vlk8VahSAIA>

Результаты испытаний образцов

Test results

Вид образца	Образец после испытания	Критическая нагрузка, кН	Характер потери несущей способности	Характер разрушения
		49	Потеря прочности	Хрупкое разрушение
		58	Потеря прочности	Хрупкое разрушение
		498	Переход в пластическое состояние	Пластические деформации с последующим взрывом
		612	Переход в пластическое состояние	Пластические деформации с последующим взрывом
		59	Потеря прочности	Хрупкое разрушение
		370	Переход в пластическое состояние + потеря устойчивости	Разрушения образца добиться не удалось

Диаграммы продольного деформирования образцов показаны на рис. 5. На рис. 5, а приводится диаграмма деформирования трубобетонного неармированного образца длиной 100 мм и ее сравнение с полученной ранее диаграммой для полый трубы соответствующих размеров и сечения. Можно увидеть, что даже в закритической зоне до начала неограниченного пластического деформирования (сближение пластин около 3 мм) диаграммы практически

пропорциональны, что может говорить о соизмеримом вкладе бетона на каждом этапе деформирования. Данная информация подтверждает и несколько расширяет применимость формулы, предложенной для несущей способности трубобетонного элемента [26]:

$$N = (cR_b + d)A_b + \alpha R_p A_p,$$

где R_b , R_p – расчетные сопротивления бетона и стали; A_b , A_p – площади поперечных сечений бетонного сердечника и трубы; c , d – константы, учитывающие упрочнение бетона за счет эффекта обоймы; α – коэффициент, учитывающий упрочнение трубы, связанный с ограниченной потерей местной устойчивости.

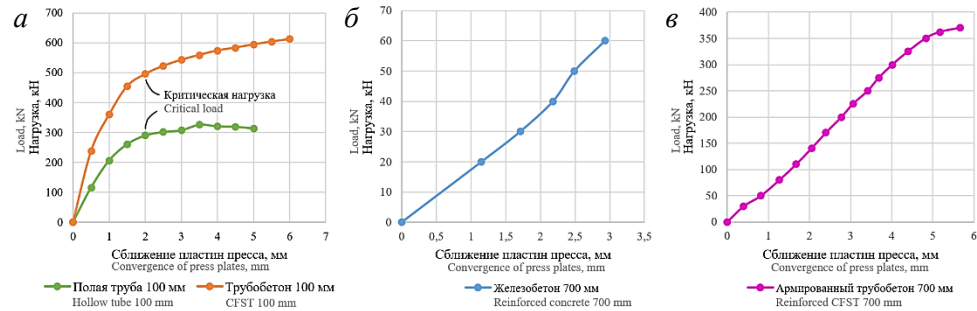


Рис. 5. Диаграммы деформирования образцов при продольном сжатии:

а – полая труба и неармированный трубобетон 100 мм; б – железобетон 700 мм; в – армированный трубобетон 700 мм

Fig. 5. Deformation of samples at longitudinal compression:

а – 100 mm hollow pipe and unreinforced pipe concrete; б – 700 mm reinforced concrete; в – 700 mm reinforced pipe concrete

На рис. 6 показаны диаграммы потери устойчивости железобетонного и трубобетонного образцов.

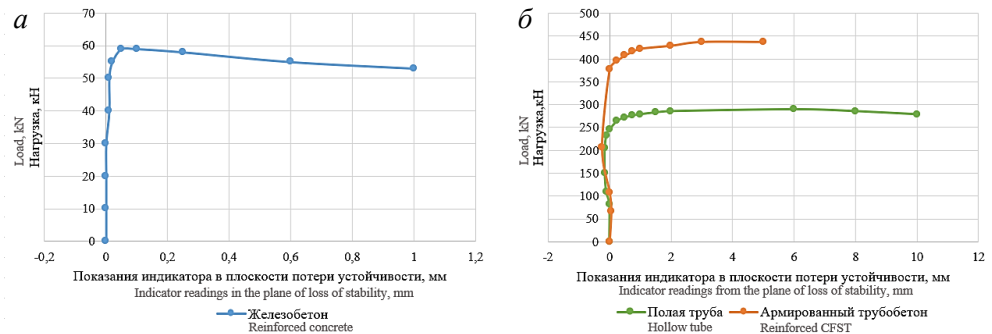


Рис. 6. Диаграммы с индикаторов в плоскости потери устойчивости для образцов длиной 700 мм:

а – железобетон; б – армированный трубобетон и полая труба

Fig. 6. Diagrams from stability loss plane indicators for 700 mm samples:

а – reinforced concrete; б – reinforced pipe concrete and hollow pipe

Для оценки влияния железобетонного сердечника на рис. 6, б диаграмма приводится в сравнении с ранее полученной диаграммой для полой трубы.

Заключение

На основании проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. Железобетонные образцы длиной 100 и 700 мм продемонстрировали одинаковую несущую способность. Это означает, что потеря устойчивости образца длиной 700 мм не наступила, а он разрушился как центрально-сжатый, чему свидетельствует тот факт, что разрушение зародилось в приопорной зоне образца. Анализ видеозаписей экспериментов показал, что разрушение произошло в первую очередь в результате потери устойчивости арматуры. Это подтверждается их видом после разрушения (таблица), а также тем, что суммарная нагрузка, которую способны выдержать 6 стержней, изготовленных из арматуры А500, составляет 57,7 кН [21], что практически соответствует итоговой разрушающей нагрузке образцов, равной 59 кН.

2. Введение стальной трубы-обоймы увеличило несущую способность бетона на 449 кН, в то время как несущая способность трубы 76×3,5 мм марки 09Г2С составляет 291 кН (рис. 5, а). Следовательно, вклад в повышение несущей способности увеличивается на 43 %. Это объясняется, с одной стороны, тем, что бетонный сердечник препятствует потере устойчивости стенки трубы, а труба, в свою очередь, препятствует поперечному деформированию бетона и его последующему выкрашиванию. Таким образом, суммарная несущая способность превосходит алгебраическую сумму несущих способностей составляющих системы.

3. Введение арматуры в трубобетонный образец увеличивает несущую способность на 114 кН, в то время как несущая способность арматуры составляет 57,7 кН [21]. Таким образом, ее вклад в несущую способность трубобетонного элемента за счет стесненности сечения увеличивается на 98 %.

4. Несущая способность трубобетонного армированного образца длиной 700 мм составила 370 кН (рис. 5, в), что составляет 60 % от несущей способности образца длиной 100 мм (таблица). Несмотря на уменьшение несущей способности образца в целом за счет процесса потери устойчивости, вклад введения стальной трубы-оболочки составляет 311 кН. При этом несущая способность трубы длиной 700 мм из стали марки 09Г2С при расчете по СП 16.13330.2017 составляет 272 кН, следовательно, вклад в несущую способность возрастает на 14 %. Важным является пластический характер разрушения, в отличие от хрупкого разрушения железобетона и мгновенной потери устойчивости стальной трубы.

5. Характер деформирования (рис. 6, б) трубобетонных образцов при их сопоставлении с аналогичными полыми трубами показывает, что диаграммы центрального сжатия и устойчивости практически пропорциональны, это может говорить о соизмеримом вкладе бетона на каждом этапе деформирования. Следует отметить, что для центрально-сжатых коротких образцов (рис. 5) переход в неограниченное пластическое состояние для трубобетонных и полых образцов наступает при одинаковых значениях деформаций, следовательно,

именно потеря несущей способности трубы приводит к потере несущей способности образца, в то время как бетон, находящийся в закритической зоне, оказывает поддерживающий эффект и мгновенно разрушается при наступлении критических деформаций трубы.

Исследованиями обоснована эффективность применения композитных трубобетонных элементов и нелинейное увеличение несущей способности при обеспечении совместной работы материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Трулль В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. Москва : Стройиздат, 1974. 144 с.
2. Акаев А.И., Магомедов М.Г., Пайзулаев М.М. Перспективы возведения сейсмостойких зданий из трубобетонных конструкций // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. Т. 44. № 1. С. 138–149. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-1-138-149.
3. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 2. Расчет трубобетонных конструкций с металлической оболочкой // Наукоедение. 2015. Т. 7. № 4 (29). С. 91. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/02TVN116.pdf>. DOI: 10.15862/112TVN415.
4. Дуванова И.А., Сальманов И.Д. Трубобетонные колонны в строительстве высотных зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 6 (21). С. 89–103.
5. Афанасьев А.А., Курочкин А.В. Трубобетонные конструкции для возведения каркасных зданий // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 2. С. 113–118.
6. Morino S., Tsuba K. Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column System in Japan // Earthquake and Engineering Seismology. 2005. № 1. V. 4. P. 51–73.
7. Lehman D.E., Kuder K.G., Gunnarsson A.K., Roeder C.W., Berman J.W. Circular Concrete-Filled Tubes for Improved Sustainability and Seismic Resilience // Journal of Structural Engineering. 2015. № 141. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001103.
8. Li P., Zhang T., Wang C. Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Columns Subjected to Axial Compression // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. P. 1–15. DOI: 10.1155/2018/4059675.
9. Lu Y., Na Li, Li S., Liang H. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression // Construction and Building Materials. 2015. № 95. P. 74–85. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.114.
10. Dai X.H., Lam D., Jamaluddin N. Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression. // Thin-Walled Structures. 2014. № 77. P. 26–35. DOI: 10.1016/j.tws.2013.11.015.
11. Lazovic Radovanovic M.M., Nikolic J.Z., Radovanovic J.R., Kostic S.M. Structural Behaviour of Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tube Columns during the Top-Down Construction Method // Applied Sciences. 2022. № 12 (8). 3771. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12083771>.
12. Dundu M. Compressive strength of circular concrete filled steel tube columns // Thin-Walled Structures. 2012. V. 56. P. 62–70. DOI: 10.1016/j.tws.2012.03.008.
13. Manikandan K.B., Umarani C. Understandings on the Performance of Concrete-Filled Steel Tube with Different Kinds of Concrete Infill // Advances in Civil Engineering. 2021. V. 2021. Article ID 6645757. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6645757>.
14. Римишин В.И., Семенова М.Н., Шубин И.Л. и др. Исследования несущей способности внецентренно сжатых сталетрубобетонных колонн // Строительные материалы. 2022. № 6. С. 8–14. DOI 10.31659/0585-430X-2022-803-6-8-14.
15. Римишин В.И., Кришан А.Л., Астафьева М.А. и др. Исследования несущей способности центрально-сжатых сталетрубобетонных колонн // Жилищное строительство. 2022. № 6. С. 33–38. DOI 10.31659/0044-4472-2022-6-33-38.

16. 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.
17. Кришан А.Л. Трубобетонные колонны для многоэтажных зданий // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009. № 4. С. 75–80.
18. Кришан А.Л., Римшин В.И., Рахманов В.А. и др. Несущая способность коротких трубобетонных колонн круглого сечения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 4 (370). С. 220–225.
19. Krishan A.L., Astafeva M.A., Rimshin V.I. et al. Compressed Reinforced Concrete Elements Bearing Capacity of Various Flexibility // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. V. 182. P. 283–291. – DOI: 10.1007/978-3-030-85236-8_26.
20. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. Испытание трубобетонных образцов малого диаметра с высоким коэффициентом армирования // Строительство и реконструкция. 2017. № 4 (72). С. 57–62.
21. Хазов П.А., Ерофеев В.И., Лобов Д.М., Ситникова А.К., Помазов А.П. Экспериментальное исследование прочности композитных трубобетонных образцов малогабаритных сечений // Приволжский научный журнал. 2021. № 3. С. 36–43.
22. Wang J., Sun Q., Li J. Experimental study on seismic behavior of high-strength circular concrete-filled thin-walled steel tubular columns. // Engineering Structures. 2019. V. 182. P. 403–415. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.12.098.
23. Канищев Р.А. Анализ местной устойчивости трубобетонных конструкций прямоугольного сечения // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 4 (64). С. 59–68.
24. Белый Г.И., Ведерникова А.А. Исследование прочности и устойчивости трубобетонных элементов конструкций обратным численно-аналитическим методом // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 26–35. DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-26-35.
25. Лапшин А.А., Хазов П.А., Кожанов Д.А., Лихачева С.Ю. Оценка прочности и устойчивости композитных сталежелезобетонных элементов с совместным применением стержневых и твердотельных расчетных моделей // Приволжский научный журнал. 2021. № 3. С. 9–16.
26. Несветаев Г.В., Резван И.В. Оценка прочности трубобетона // Фундаментальные исследования. 2011. № 12-3. С. 580–583.

REFERENCES

1. Kikin A.I., Sanzharovskij R.S., Trull' V.A. Steel pipes filled with concrete. Moscow: Stroiizdat, 1974. 144 p. (In Russian)
2. Akaev A.I., Magomedov M.G., Pajzulaev M.M. Construction of earthquake-resistant buildings made of pipe concrete. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2017; 44 (1): 138–149. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-1-138-149. (In Russian)
3. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mihaldykin E.S. Calculation of pipe-concrete structures with a shell made of different materials. Part 2. Strength analysis of pipe concrete structures. *Naukovedenie*. 2015. 7 (4); 91. Available: <http://naukovedenie.ru/PDF/02TVN116.pdf>. DOI: 10.15862/112TVN415. (In Russian)
4. Duvanova I.A., Sal'manov I.D. Concrete filled steel tubes in the construction of high-rise buildings and structures. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzheni*. 2014; 6 (21): 89–103. (In Russian)
5. Afanas'ev A.A., Kurochkin A.V. Concrete filled steel tubes for the construction of frame buildings. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2016; (2): 113–118. (In Russian)
6. Morino S., Tsuba K. Design and construction of concrete-filled steel tube column system in japan. *Earthquake and Engineering Seismology*. 2005; 1 (4): 51–73.
7. Lehman D.E., Kuder K.G., Gunnarsson A.K., Roeder C.W., Berman J.W. Circular concrete-filled tubes for improved sustainability and seismic resilience. *Journal of Structural Engineering*. 2015; 141. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001103.
8. Li P., Zhang T., Wang C. Behavior of concrete-filled steel tube columns subjected to axial compression. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018: 1–15. DOI: 10.1155/2018/4059675.

9. Lu Y., Na Li, Li S., Liang H. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression. *Construction and Building Materials*. 2015; (95): 74–85. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.114.
10. Dai X.H., Lam D., Jamaluddin N. Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression. *Thin-Walled Structures*. 2014; (77): 26–35. DOI: 10.1016/j.tws.2013.11.015.
11. Lazovic Radovanovic M.M., Nikolic J.Z., Radovanovic J.R., Kostic S.M. Structural behaviour of axially loaded concrete-filled steel tube columns during the top-down construction method. *Applied Sciences*. 2022; 12 (8): 3771. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12083771>.
12. Dundu M. Compressive strength of circular pipe-concrete columns. *Thin-Walled Structures*. 2012; (56): 62–70. DOI: 10.1016/j.tws.2012.03.008.
13. Manikandan K.B., Umarani C. Understandings on the performance of concrete-filled steel tube with different kinds of concrete infill. *Advances in Civil Engineering*. 2021; (2021): 12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6645757>.
14. Rimshin V.I., Semenova M.N., Shubin I.L., et al. Studies of the bearing capacity of non-centrally compressed concrete filled steel tubes. *Stroitel'nye materialy*. 2022; (6): 8–14. DOI 10.31659/0585-430X-2022-803-6-8-14. (In Russian)
15. Rimshin V.I., Krishan A.L., Astafeva M.A., et al. Bearing capacity of centrally compressed pipe concrete structures. *Zhishchik stroitel'stvo*. 2022; (6): 33–38. DOI 10.31659/0044-4472-2022-6-33-38. (In Russian)
16. Krishan A.L., Surovcov M.M. Experimental studies of strength of flexible pipe concrete structures. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2013; 1 (41): 90–92. (In Russian)
17. Krishan A.L. Concrete filled steel tubes for multi-storey buildings. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstrukcij i sooruzhenij*. 2009; (4): 75–80. (In Russian)
18. Krishan A.L., Rimshin V.I., Rahmanov V.A., et al. Bearing capacity of short round-section pipe concrete. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*. 2017; 4 (370): 220–225. (In Russian)
19. Krishan A.L., Astafeva M.A., Rimshin V.I., et al. Compressed reinforced concrete elements bearing capacity of various flexibility. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; (182): 283–291. DOI: 10.1007/978-3-030-85236-8_26.
20. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K. Testing of small diameter pipe-concrete samples with high reinforcement coefficient. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2017; 4 (72): 57–62. (In Russian)
21. Khazov P.A., Erofeev V.I., Lobov D.M., Sitnikova A.K., Pomazov A.P. Experimental study of strength of pipe-concrete small-sized sections. *Privolzhskij nauchnyj zhurnal*. 2021; (3): 36–43. (In Russian)
22. Wang J., Sun Q., Li J. Experimental study on seismic behavior of high-strength circular pipe-concrete thin-walled columns. *Engineering Structures*. 2019; (182): 403–415. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.12.098.
23. Kanishchev R.A. Analysis of local stability of rectangular pipe-concrete structures. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*. 2016; 4 (64): 59–68. (In Russian)
24. Belyj G.I., Vedernikova A.A. Strength and stability of pipe-concrete structures using inverse numerical-analytical method. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. 2021; 2 (85): 26–35. DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-26-35. (In Russian)
25. Lapshin A.A., Khazov P.A., Kozhanov D.A., Lihacheva S.Yu. Strength and stability of composite steel-reinforced concrete elements. *Privolzhskij nauchnyj zhurnal*. 2021; (3): 9–16. (In Russian)
26. Nesvetaev G.V., Rezvan I.V. Strength of pipe-concrete structures. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2011; (12-3): 580–583. (In Russian)

Сведения об авторах

Ерофеев Владимир Иванович, докт. физ.-мат. наук, директор, Институт проблем машиностроения РАН – филиал Института прикладной физики РАН, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85, erof.vi@yandex.ru

Хазов Павел Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, khazov.nngasu@mail.ru

Ситникова Анна Константиновна, студентка, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, sitanngd@gmail.com

Authors Details

Vladimir I. Erofeev, DSc, Director, Mechanical Engineering Research Institute RAS, Branch of the Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia, 85, Belinsky Str., 603024, Nizhny Novgorod, Russia, erof.vi@yandex.ru

Pavel A. Khazov, PhD, A/Professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603950, Nizhny Novgorod, Russia, khazov.nngasu@mail.ru

Anna K. Sitnikova, Student, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603950, Nizhny Novgorod, Russia, sitanngd@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.01.2023
Одобрена после рецензирования 01.03.2023
Принята к публикации 20.03.2023

Submitted for publication 28.01.2023
Approved after review 01.03.2023
Accepted for publication 20.03.2023