



УДК 539.3:004.94

Е. А. ГУНАЕВ¹, аспирант кафедры теоретической, компьютерной и экспериментальной механики; **Д. А. КОЖАНОВ²**, декан общетехнического факультета, канд. физ.-мат. наук; **П. А. ХАЗОВ²**, д-р техн. наук, доц. кафедры теории конструкций и технической механики; **А. П. ПОМАЗОВ²**, ассистент кафедры железобетонных, каменных и деревянных конструкций

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ И ТРЕХТОЧЕЧНОГО ИЗГИБА ТРУБОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ

¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского».

Россия, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.

Тел.: (930) 706-30-23; эл. почта: egor.gunaev@gmail.com

²ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-96; эл. почта: kozhanov@nngasu.ru

Ключевые слова: трубобетон, компьютерное моделирование, осевое сжатие, трехточечный изгиб, численная модель.

В работе представлены результаты численного моделирования трубобетонных конструкций на сжатие и трехточечный изгиб с использованием ANSYS Mechanical APDL. Учтены контактные взаимодействия между материалами, что позволило исследовать поля деформаций и напряжений, а также явления расслоения и локального смятия. Полученные данные сопоставлены с экспериментальными, что способствует уточнению моделей и их приближению к реальным условиям эксплуатации.

Введение

История трубобетонных конструкций берет свое начало в первой половине XX века. В настоящее время трубобетоны применяются в строительстве автомобильных и железнодорожных мостов, эстакад, высотных зданий, а также различных комплексов (спортивных, развлекательных и др.). Численное, а также экспериментальное исследование работы трубобетонных образцов во многом отражено в работах отечественных [1–5] и зарубежных ученых [6–12]. Большим преимуществом сталежелезобетонов, в сравнении с железобетоном, является способность выдерживать большие нагрузки при меньшем поперечном сечении. В настоящее время сталежелезобетонные колонны находят широкое применение во многих зарубежных странах, немалое внимание уделяется рассмотрению колонн из трубобетона на осевое сжатие [9–11], а также сейсмостойкость [6, 12]. Работа трубобетонных конструкций, в отличие от обычных железобетонных, исследована в значительно меньшей степени. Перспективы развития, а также эффективность использования конструкций из трубобетона создают необходимость рассмотрения и возможности моделирования механического поведения образцов сталежелезобетонов. Помимо изучения деформации образцов в условиях осевого сжатия, которому уделяется особое внимание, не менее важным является рассмотрение работы трубобетонной балки на изгиб. В реальных условиях эксплуатации практически невозможно выделить только сжатый элемент [13], а для анализа элементов необходимо детальное изучение

работы при чистом и поперечном изгибе. Комплексное решение задач о работе сталежелезобетонных конструкций является важным при создании методик расчета, а также прогнозированию реальной работы конструкций из этого материала.

Постановка задачи об одноосном сжатии, компьютерное моделирование

Для моделирования колонн в системе *ANSYS Mechanical APDL* было использовано 2 типа конечных элементов: *solid65* и *solid186*. *Solid186* определяется двадцатью узлами, имеет 3 степени свободы и более высокий порядок точности. Этот тип конечного элемента был использован для моделирования трубы и арматуры. Для бетона подходящим типом конечного элемента является *solid65*, который позволит рассмотреть возникновение трещин в процессе разрушения заполнителя трубы.

В табл. 1 представлены механические характеристики составных элементов колонны:

Таблица 1				
Элемент	E , МПа	ν	σ_t , МПа	τ_t , МПа
Труба	$2,06 \times 10^5$	0,27	300	20×10^3
Бетон	$1,2 \times 10^4$	0,2	18	3
Арматура	2×10^5	0,3	300	20×10^3

Геометрические параметры моделируемых образцов представлены на рис. 1 и рис. 2. Размеры указаны в мм.

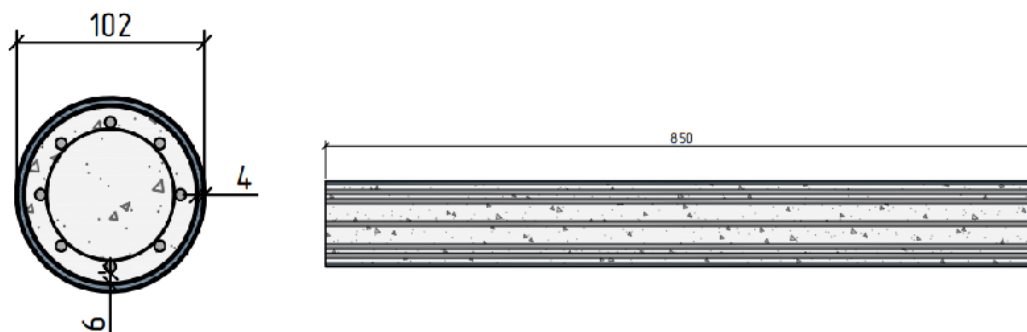


Рис. 1. Геометрические параметры образца армированной трубобетонной колонны



Рис. 2. Геометрические параметры образца неармированной трубобетонной колонны

Для решения задачи на одноосное сжатие на нижней поверхности цилиндрической модели исключаются линейные перемещения во всех направлениях. На верхней поверхности задается перемещение вдоль оси

направляющих образца в размере 10 % от длины образца. В данном случае оно будет равным 85 мм. Граничные условия для модели без армирования идентичны модели армированной колонны. После построения модели происходит наложение сетки на образцы трубобетонных. С помощью команды “*Mesh Attributes*” каждому объему ставится соответствующая модель материала. Разбиение происходит с помощью метода построения сетки “*Sweep*”.

Анализ результатов решения задачи об одноосном растяжении

После расчета задачи рассматривается распределение напряжений по Мизесу в исследуемых образцах. Максимальные значения деформаций и напряжений по Мизесу приведены в табл. 2.

Таблица 2

	Армированный образец	Неармированный образец
Напряжение по Мизесу, Па	235×10^7	241×10^7
Упругие деформации, д.ед.	0,008	0,0049
Пластические деформации, д.ед.	0,092	0,095

Таким образом, использование армирования в трубобетоне помогает уменьшить максимальное напряжение по Мизесу на 2,5 %, максимальные пластические деформации – на 3,2 %. Стоит упомянуть, что при задании в образце перемещения вдоль оси направляющих в нем может возникнуть расслоение в силу разницы в механическом поведении составных элементов конструкции.

На основании рассмотренных задач можно сделать вывод о влиянии армирования на механическое поведение образцов армированного и неармированного трубобетонных [14]. При сжатии армирование помогает уменьшить напряжение и деформации трубы, однако открытым остается вопрос детального рассмотрения трещинообразования, а также разрушения бетона.

Постановка задачи о трехточечном изгибе, компьютерное моделирование

Так как для рассмотрения ситуации реальной эксплуатации трубобетонных конструкций необходимо комплексное решение задач об их механическом поведении, рассматривается задача о трехточечном изгибе, в которой рассматривается неармированный образец трубобетона (рис. 3):

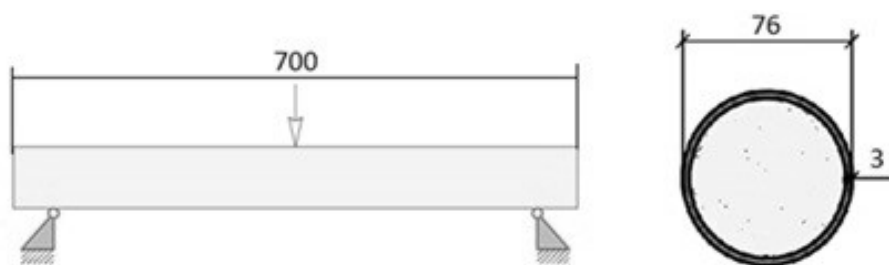


Рис. 3. Геометрические параметры трубобетонной колонны и расчетная схема при испытании на трехточечный изгиб

В табл. 3 представлены механические характеристики составных элементов колонны:

Таблица 3

Элемент	E , МПа	ν	σ_t , МПа	τ_t , МПа
Труба	$2,06 \times 10^5$	0,27	300	20×10^3
Бетон	$1,2 \times 10^4$	0,2	18	3

Для решения задачи на расстоянии 600 мм на модели строятся цилиндры, имитирующие опоры рассматриваемого образца (A и B), для них запрещаются перемещения в направлении оси Y . Для цилиндра, имитирующего ролик (C) задаем перемещение вдоль оси Y образца в размере 38 мм (радиус образца). Заданные граничные условия отображены на рис. 4.

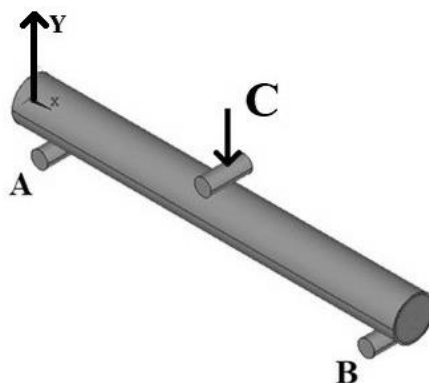


Рис. 4. Граничные условия в модели трубобетонной колонны

Результаты решения задачи о трехточечном изгибе и их анализ

Для решения задачи после построения модели происходит наложение сетки на образец трубобетона. Разбиение происходит с помощью метода построения сетки "Sweep". После расчета задачи рассмотрим распределение напряжений по Мизесу в каждом составном элементе конструкции (рис. 5):

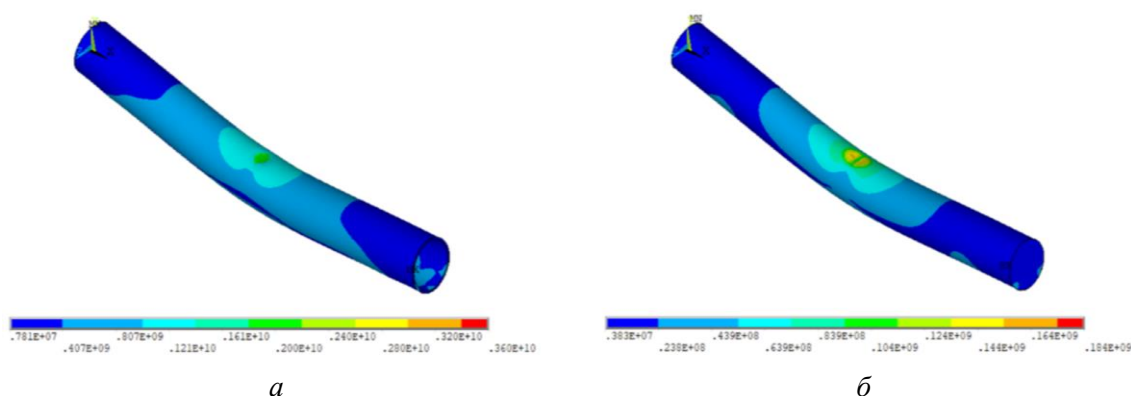


Рис. 5. Напряжения по Мизесу в составных элементах трубобетона (Па)
(a – стальная труба, b – бетонный сердечник)

В результате решения задачи в образце возникнет расслоение (рис. 6), которое можно связать с гораздо меньшей способностью бетонного заполнителя

работать на изгиб, в сравнении со стальной трубой, а также возникновению напряжений в силовых точках, а вследствие – искривлению (депланации) сечения. В точках закрепления, а также точке давления на цилиндр можно заметить значительное увеличения деформации, что может привести к возникновению трещин, а также разрушению бетонного заполнителя.

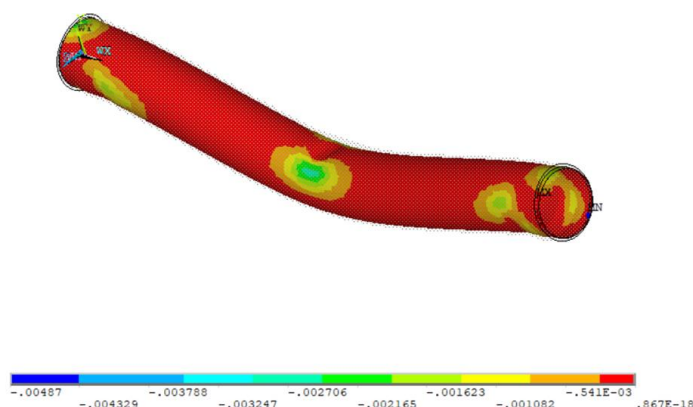


Рис. 6. Возникновение трещин и расслоения вследствие локальных деформаций в бетоне (мм)

В условиях трехточечного изгиба в трубобетоне возникают значительные местные напряжения, приводящие, помимо общего искривления, к локальному деформированию в локальных областях, что также может привести к возникновению трещин и расслоения в образце.

Согласно эксперименту [15], реальная работа трубобетонного образца при трехточечном изгибе заметно отличается от модели Бернулли, не учитывающей влияние наличия бетонного сердечника. Возникновение локальных деформаций, а также искривлений сечений делает применение данной модели нецелесообразным в силу того, что она будет являться грубым приближением реальной конструкции. При согласовании результатов решения в *ANSYS Mechanical APDL* с полученной экспериментальной диаграммой деформирования [15] (рис. 7), получаем несовпадения. Сравним полученные диаграммы:

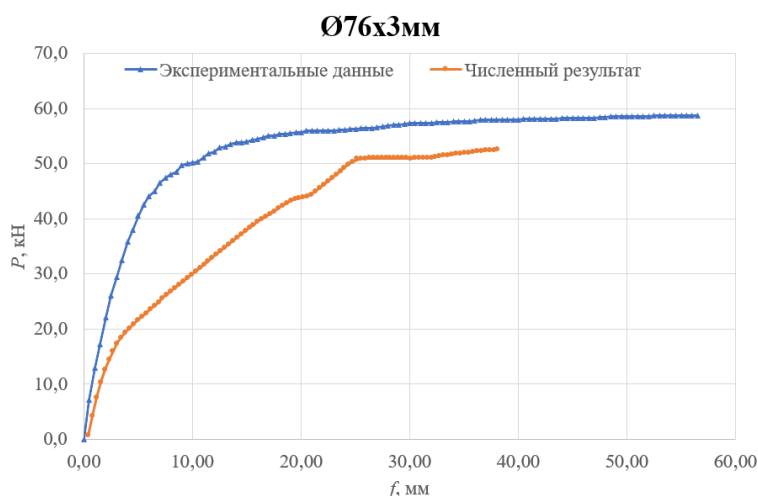


Рис. 7. Сравнение диаграмм деформирования образца трубобетона



Можем отметить близость к упругой работе на начальных участках диаграмм, а также качественное сходство. Несовпадения возникают вследствие использования билинейной модели упрочнения, а также сложности в уточнении механических характеристик бетона (в составном сталебетонном стержне характеристики бетона отличаются от традиционных, принимаемых по нормам). Численное исследование подтверждает необходимость оценки влияния бетонного сердечника и невозможности в данном случае использовать изгибную модель Бернулли в силу возникновения искривлений сечения и локальных деформаций.

Заключение

При сравнении решений задач на сжатие трубобетонных образцов заметно влияние наличия армирования на возникающие напряжения и деформации. Введение в сечение арматур также помогает увеличить несущую способность трубобетона. В частности, армирование помогает уменьшить максимальное напряжение по Мизесу на 2,5 %, максимальные пластические деформации – на 3,2 %.

На основании решенной модели трехточечного изгиба можно сделать вывод о влиянии местных деформаций на работу всей конструкции и необходимости учета этого влияния на несущую способность трубобетона в реальных условиях эксплуатации. Также заметно возникновение локальных смятий в местах закрепления и давления роликом в силу местного увеличения напряжения на этих участках в несколько порядков (360×107 – максимум в точках приложения силы при 781×104 – минимум).

Применение классических моделей изгиба балок в случае с тонкостенными трубными конструкциями нерационально и дает излишние запасы, поскольку не учитывает локальное смятие и деформирование сечений. Расчет массивных изгибаемых трубобетонов следует выполнять с учетом локальных деформаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаранжа, И. М. Численное моделирование трубобетонных элементов конструкций круглого сечения / И. М. Гаранжа // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 6 (71). – С. 14–18.
2. Долженко, А. А. К теории расчета трубобетона / А. А. Долженко // Теория сооружений и конструкций. Труды Воронежского инженерно-строительного института. – 1964. – Выпуск 1. – С. 24–33.
3. Крылов, С. Б., Арленинов, П. Д., Смирнов, П. П. Расчетно-экспериментальные исследования изгибаемых трубобетонных конструкций / С. Б. Крылов, П. Д. Арленинов, П. П. Смирнов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 4. – С. 34–38.
4. Оценка прочности и устойчивости композитных сталежелезобетонных элементов с совместным применением стержневых и твердотельных расчетных моделей / А. А. Лапшин, П. А. Хазов, Д. А. Кожанов, С. Ю. Лихачева // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 3. – С. 9–16.
5. Экспериментальное исследование прочности композитных трубобетонных образцов малогабаритных сечений / П. А. Хазов, В. И. Ерофеев, Д. М. Лобов, А. К. Ситникова, А. П. Помазов // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2022. – № 3. – С. 36–43.



6. Circular Concrete-Filled Tubes for Improved Sustainability and Seismic Resilience / D. E. Lehman, K. G. Kuder, A. K. Gunnarsson, C. W. Roeder, J. W. Berman // *Journal of Structural Engineering*. – 2015. – № 141.
7. Li, P. Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Columns Subjected to Axial Compression / P. Li, T. Zhang, C. Wang // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2018. – P. 1–15.
8. Ultimate resistance behavior of rectangular concrete-filled tubular beam-columns made of high-strength steel / Y. Du, Z. Chen, Y. Wang, R. Liew // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2017. – № 133. – P. 418–433.
9. Kedziora, S. Concrete-filled steel tubular (CFS) columns subjected to eccentric compressive load / S. Kedziora // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing LLC, 2019.
10. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression / Y. Lu, Li Na, S. Li, H. Liang // *Construction and Building Materials*. – 2015. – № 95. – P. 74–85.
11. Dai, X. H. Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression / X. H. Dai, D. Lam, N. Jamaluddin // *Thin-Walled Structures*. – 2014. – № 77. – P. 26–35.
12. Qian, J. Experimental study on seismic behavior of steel tube-reinforced concrete composite shear walls with high axial compressive load ratio. Jianzhu Jieyou Xuebao / J. Qian, Z. Jiang, X. Ji. // *Journal of Building Structures*. – 2010. – Vol. 31, Issue 7. – P. 40–48.
13. Кришан, А. Л. Трубобетонные колонны для многоэтажных зданий / А. Л. Кришан // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2009. – № 4. – С. 75–80.
14. Физическое и численное моделирование стальных и сталежелезобетонных конструкций из труб : монография / И. В. Шкода, П. А. Хазов, А. П. Помазов, А. К. Ситникова, Д. А. Кожанов // *Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет*. – Нижний Новгород, 2023. – 135 с.
15. Деформирование и разрушение трубобетонных образцов при поперечном изгибе / П. А. Хазов, О. И. Ведяйкина, И. С. Хохлова, Д. В. Артемьева // *Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет*. – Нижний Новгород, 2023. – № 2 (66). – С. 69–74.

GUNAEV Egor Andreevich¹, postgraduate student of the chair of theoretical, computer and experimental mechanics; **KOZHANOV Dmitriy Aleksandrovich²**, dean of the faculty of general engineering, candidate of physical and mathematical sciences; **KHAZOV Pavel Alekseevich²**, doctor of technical sciences, associate professor of the chair of theory of structures and technical mechanics; **POMAZOV Artem Pavlovich²**, assistant of the chair of reinforced concrete, stone and wooden structures

MODELING OF UNIAXIAL COMPRESSION AND THREE-POINT BENDING OF A CONCRETE-FILLED STEEL TUBE COLUMN

¹Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod.

23, Gagarina Prospekt, Nizhny Novgorod, 603950, Russia.

Tel.: (930) 706-30-23; e-mail: egor.gunaev@gmail.com

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950 Russia.

Tel.: (831) 430-54-96; e-mail: kozhanov@nngasu.ru

Key words: concrete-filled steel tube, computer modeling, axial compression, three-point bending, numerical model.



The paper presents the results of numerical modeling of concrete-filled steel tube structures subjected to axial compression and three-point bending using ANSYS Mechanical APDL. Contact interactions between materials are taken into account, which made it possible to study the fields of deformations and stresses, as well as the phenomena of delamination and local buckling. The data obtained are compared with experimental data, which helps to refine the models and bring them closer to real service conditions.

REFERENCES

1. Garanzha I. M. Chislennoe modelirovanie trubobetonnykh elementov konstruktсий kruglogo secheniya [Numerical modeling of concrete-filled steel tubular elements of circular cross-section]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2018, № 6 (71), P. 14–18.
2. Dolzhenko A. A. K teorii rascheta trubobetona [On the theory of calculation of concrete-filled steel tubes]. Teoriya sooruzheniy i konstruktсий. Trudy Voronezhskogo inzhenerno-stroitel'nogo instituta [Theory of Structures and Constructions. Proceedings of the Voronezh Civil Engineering Institute]. 1964, Vypusk 1, P. 24–33.
3. Krylov S. B., Arleninov P. D., Smirnov P. P. Raschetno-eksperimentalnye issledovaniya izgibaemykh trubobetonnykh konstruktсий [Calculation and experimental studies of flexural concrete-filled steel tubular structures]. Seysmostoykoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy [Earthquake Engineering. Safety of Structures]. 2017, № 4, P. 34–38.
4. Lapshin A. A., Khazov P. A., Kozhanov D. A., Likhacheva S. Yu. Otsenka prochnosti i ustoychivosti kompozitnykh stalezhelezobetonnnykh elementov s sovmestnym primeneniem sterzhnevyykh i tverdotelnykh raschetnykh modeley [Assessment of strength and stability of composite steel-reinforced concrete elements using combined bar and solid finite element models]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2021, № 3, P. 9–16.
5. Khazov P. A., Erofeev V. I., Lobov D. M., Sitnikova A. K., Pomazov A. P. Eksperimentalnoe issledovanie prochnosti kompozitnykh trubobetonnykh obraztsov malogabaritnykh secheniy [Experimental study of the strength of composite concrete-filled steel tubular specimens of small cross-sections]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2022, № 3, P. 36–43.
6. 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, P. 285–295.
7. 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.
8. Du Y., Chen Z., Wang Y., Liew R. Ultimate resistance behavior of rectangular concrete-filled tubular beam-columns made of high-strength steel. Journal of Constructional Steel Research. 2017, № 133, P. 418–433.
9. Kedziora S. Concrete-filled steel tubular (CFS) columns subjected to eccentric compressive load. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2019.
10. 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.
11. 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.
12. Qian J. Jiang Z., Ji. X. Experimental study on seismic behavior of steel tube-reinforced concrete composite shear walls with high axial compressive load ratio. Jianzhu Jieyou Xuebao. Journal of Building Structures. 2010, Vol. 31, Issue 7, P. 40–48.



13. Krishan A. L. Trubobetonnye kolonny dlya mnogoetazhnykh zdaniy [Concrete-filled steel tubular columns for multi-storey buildings]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktсий i sooruzheniy* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]. 2009, № 4, P. 75–80.

14. Shkoda I. V., Khazov P. A., Pomazov A. P., Sitnikova A. K., Kozhanov D. A. Fizicheskoe i chislennoe modelirovanie stalnykh i stalezhelezobetonnykh konstruktсий iz trub [Physical and numerical modeling of steel and steel-reinforced concrete structures made of tubes]: monografiya. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2023, 135 p.

15. Khazov P. A., Vedyaykina O. I., Khokhlova I. S., Artemeva D. V. Deformirovanie i razrushenie trubobetonnykh obraztsov pri poperechnom izgibe [Deformation and failure of concrete-filled steel tubular specimens under transverse bending]. *Privolzhskiy nauchny zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2023, № 2 (66), P. 69–74.

© Е. А. Гунаев, Д. А. Кожанов, П. А. Хазов, А. П. Помазов, 2025

Получено: 22.09.2025 г.