



Сравнение несущей способности и выгиба центрально сжатых стоек в пенобетонной обойме

А.И. Савенков¹, А.О. Бессонова^{2✉}, П.А. Шустов³

^{1,2}Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Россия

³Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. В работе исследованы конструкции, выполненные из стальных элементов, конструктивно совмещенных с монолитным неавтоклавным пенобетоном, используемым в качестве заполнения наружного ограждения зданий. Произведено сравнение несущей способности центрально сжатых стоек в свободном и стесненном нагружениях. Целью данной работы является выявление особенностей работы центрально нагруженных металлических стоек, находящихся в пенобетонном массиве. Нагружение стоек производилось на вертикальных испытательных стендах. При этом продольные деформации снимались с помощью тензомоста ТК-50М. Поперечные перемещения (выгиб) снимались при помощи индикатора часового типа. Сравнительные теоретические расчеты несущей способности сжатых стоек проводились согласно СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». В результате экспериментов по статическому центральному сжатию стоек открытого сечения определено повышение устойчивости стесненных стоек и показано соотношение продольных выгибов стоек в свободном и стесненном состоянии. При этом выявлено, что размеры обоймы влияют на величину и характер продольного изгиба. Таким образом, стало возможным обеспечить экономию металла за счет уменьшения сечения стоек при их несущей способности, аналогичной таковой у свободных стоек. Показано, что чем больше соотношение площади обхватывающей пенобетонной обоймы к площади сечения сжатой стойки, тем больше проявляется экономия металла.

Ключевые слова: пенобетон, центрально сжатые стойки, устойчивость, несущая способность, стальные элементы

Для цитирования: Савенков А.И., Бессонова А.О., Шустов П.А. Сравнение несущей способности и выгиба центрально сжатых стоек в пенобетонной обойме // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 4. С. 666–676. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-4-666-676>. EDN: QLRLCF.

Original article

Comparison of bearing capacity and hogging of axially loaded columns in a foam concrete casing

Andrey I. Savenkov¹, Alena O. Bessonova^{2✉}, Pavel A. Shustov³

^{1,2}Angarsk State Technical University, Angarsk, Russia

³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This work identifies the operation characteristics of axially loaded metal columns located within a foam concrete casing. The structures based on steel elements structurally combined with monolithic non-autoclaved foam concrete, used as filling for cladding, were investigated. The load-bearing capacity of axially loaded columns in free and constrained loads were compared. The columns were loaded using vertical test benches, and longitudinal deformations were recorded using a TK-50M strain gauge. Transverse movements (hogging) were measured using a dial gauge. Comparative theoretical calculations for the bearing capacity of loaded columns were carried out in accordance with the building rules and regulations SP 16.13330.2017 "Steel structures". In experiments involving static axial loading of open-section columns, an increase in the stability of constrained columns was determined, and the

© Савенков А.И., Бессонова А.О., Шустов П.А., 2023

ratio of longitudinal hogging of columns in a free and constrained state was shown. In addition, it was revealed that the size of the casing influences the magnitude and nature of the longitudinal bending. Therefore, it became possible to save metal by reducing the cross-section of the columns, while maintaining a bearing capacity similar to that of the free columns. The study demonstrated that as the ratio of the area of the surrounding foam concrete casing to the cross-sectional area of the loaded column increases, metal savings are correspondingly higher.

Keywords: foam concrete, centrally compressed struts, stability, load-bearing capacity, steel elements

For citation: Savenkov A.I., Bessonova A.O., Shustov P.A. Comparison of bearing capacity and hogging of axially loaded columns in a foam concrete casing. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(4): 666-676. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-4-666-676>. EDN: QLRLCF.

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве или реконструкции здания большое значение на выбор конструктивного решения имеют экологические, технические и экономические аспекты.

В сейсмических районах широкое применение находят здания, несущие конструкции которых выполнены из стальных элементов [1], конструктивно совмещенных с монолитным неавтоклавным пенобетоном, используемым в качестве заполнения наружного ограждения и междуэтажного утеплителя [2–4]. В этом случае стойки каркаса находятся внутри пенобетонного массива, и этим обеспечивается их повышенная огнестойкость и защита от коррозии [5–9]. Имеется предположение, что сжатые металлические элементы при этом приобретают повышенную устойчивость, в этом случае стальные колонны, размещенные в углах каркаса, в большей степени способствуют общей устойчивости конструкции [10–12].

В практике проектирования скрытых металлических каркасов сжатые металлические элементы, помещенные в пенобетонную среду, рассчитываются как свободные и их стесненность не учитывается. Причина заключается в том, что на данный момент недостаточно изучено влияние на величину несущей способности той пенобетонной среды, в которой ра-

ботают металлические стойки и балки перекрытий, и это не отражено в нормативных документах.

Целью данной работы является выявление особенностей работы центрально нагруженных металлических стоек, находящихся в пенобетонном массиве. В качестве материала обоймы использован пенобетон марки по плотности D600, который применяется для эффективных ограждающих конструкций. Это вносит значительный вклад в ресурсосбережение, энергосбережение, рациональность и безопасность строительства. Прочность этого материала является фактором, влияющим на несущую способность стоек [13–16].

Первоначально были проведены эксперименты, в которых была определена несущая способность стоек открытого профиля из сдвоенных уголков (рис. 1), находящихся в пенобетонной обойме, с поперечной площадью, многократно превосходящей сечение металлического элемента [17].

Показано, что при большом соотношении площадей обоймы и стойки влияние пенобетона, обхватывающего стойку, столь велико, что в данном случае можно сжатую стойку рассчитывать [18, 19] по условию прочности, без учета коэффициента продольного изгиба «φ», принимая его за единицу.

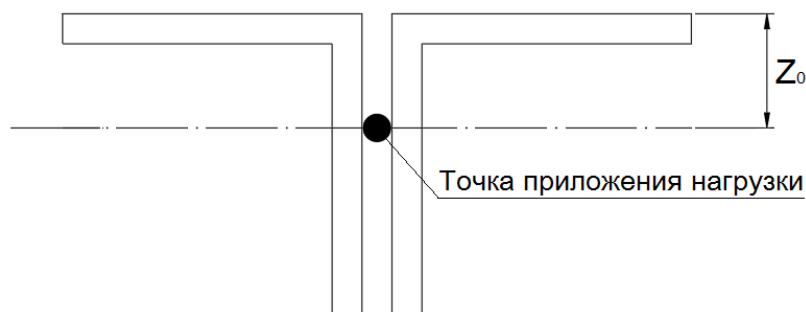


Рис. 1. Сечения испытываемых стоек
Fig. 1. Cross sections of the test racks

Такой эффект отчасти является аналогичным действию влияния заполнения бетоном металлического элемента замкнутого сечения [20, 21], только бетон в данном случае находится снаружи стойки открытого профиля. На следующем этапе была поставлена задача – уточнить степень влияния обоймы на несущую способность стесненной стойки при уменьшенной обойме (16х16 см) по сравнению с первоначальной (29х29 см). Сечение элементов стойки [22] тоже увеличено, оно составлено из уголков 50х5 (рис. 1). В этом случае отношение площадей стойки и обоймы составит

$$\frac{A_{c1}}{A_{об}} = \frac{3,72}{841} = 0,0044,$$

где A_{c1} – сечение стойки С1; A_{c2} – сечение стойки С2; $A_{об}$ – сечение обоймы стоек С1 и С2.

В этом случае соотношение площадей сечений составит

$$\frac{A_{c2}}{A_{об}} = \frac{9,6}{256} = 0,0375,$$

что значительно больше первоначального.

МЕТОДЫ

В обоих экспериментах нагружение стоек производилось на вертикальных испытательных стендах (рис. 2).

При этом продольные деформации снимались с помощью тензометрического моста ТК-50М. Поперечные перемещения (выгиб) снимались при помощи установленного на штативе индикатора часового типа с ножкой-удлинителем.

Теоретические расчеты несущей способности сжатой стойки проводились согласно СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции»¹ (таблица).

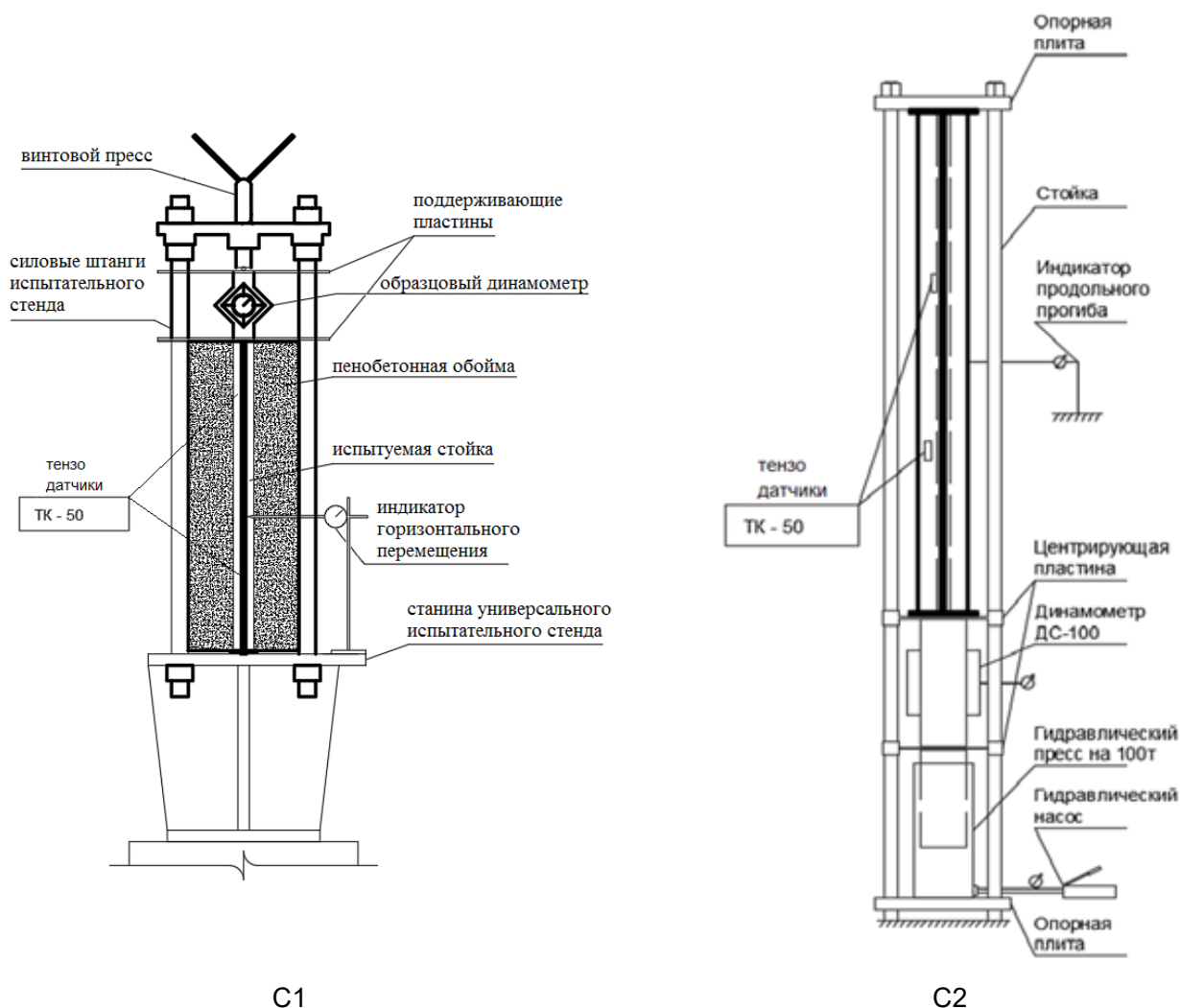


Рис. 2. Схемы стендов для испытания стоек
Fig. 2. Schemes of stands for testing racks

¹СП 16.13330.2017 Стальные конструкции // Кодекс. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456069588> (дата обращения: 20.09.2023).

Теоретические расчеты несущей способности сжатой стойки
Theoretical calculations of the bearing capacity of a compressed rack

Параметр	Центрально сжатая стойка С1	Центрально сжатая стойка С2
Площадь сечения	$A = 1,86 * 2 = 3,72 \text{ см}^2$	$A = 4,8 * 2 = 9,6 \text{ см}^2$
Радиус инерции	$i_x = 0,74 \text{ см}$	$i_x = 1,53 \text{ см}$
Расчетное сопротивление	$R_y = 24,5 \text{ кН/см}^2$	$R_y = 25,5 \text{ кН/см}^2$
Условная гибкость $\bar{\lambda} = \frac{\mu l}{i} \sqrt{R_y/E}$	$\bar{\lambda} = \frac{81}{0,74} \sqrt{24,5/20600} = 3,77$	$\bar{\lambda} = \frac{120}{1,53} \sqrt{25,5/20600} = 2,8$
Коэффициент устойчивости	$\varphi = 0,43$	$\varphi = 0,598$
Несущая способность по условию устойчивости $N = R_y A \varphi$	$N = 3,72 * 24,5 * 0,43 = 39,19 \text{ кН}$	$N = 9,6 * 25,5 * 0,598 = 146,4 \text{ кН}$
Несущая способность по условию прочности $N = R_y A$	$N = 3,72 * 24,5 = 91,14 \text{ кН}$	$N = 9,6 * 25,5 = 245 \text{ кН}$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Стойка С1 L – 81 см, обойма – 29 см.

Признаком потери устойчивости стоек является резкое увеличение величины продольного выгиба. На рис. 3 видно, что выгиб стойки С1 стал проявляться при 20 кН нагрузки, а при 40 кН поперечные деформации перешли в упруго-пластическую стадию. В пенобетонной обойме та же стойка показала значительно меньшие прогибы (рис. 5), отношение прогибов в точке теоретической потери устойчивости для стойки С1 составило

$$\frac{f_{св}}{f_{об}} = 46,$$

где $f_{св}$ – выгиб свободной стойки С1; $f_{об}$ – выгиб стойки С1 в обойме. При этом выгиб $f_{об}$

остался минимальным и при увеличении нагрузки проявлялся линейно.

При ступенчатом нагружении прямолинейного стержня, с ростом нагрузки прямолинейная форма и минимум продольного прогиба наблюдался до усилия, соответствующего несущей способности стойки [23]. При достижении этой нагрузки первоначально прямолинейный стержень нелинейно искривляется. Происходит бифуркация форм равновесия, причем прямолинейная форма равновесия будет неустойчивой, а искривленная – устойчивой. Резкое нелинейное нарастание искривления сжатого стержня при достижении нагрузки определенного значения соответствует потере устойчивости [24–29].

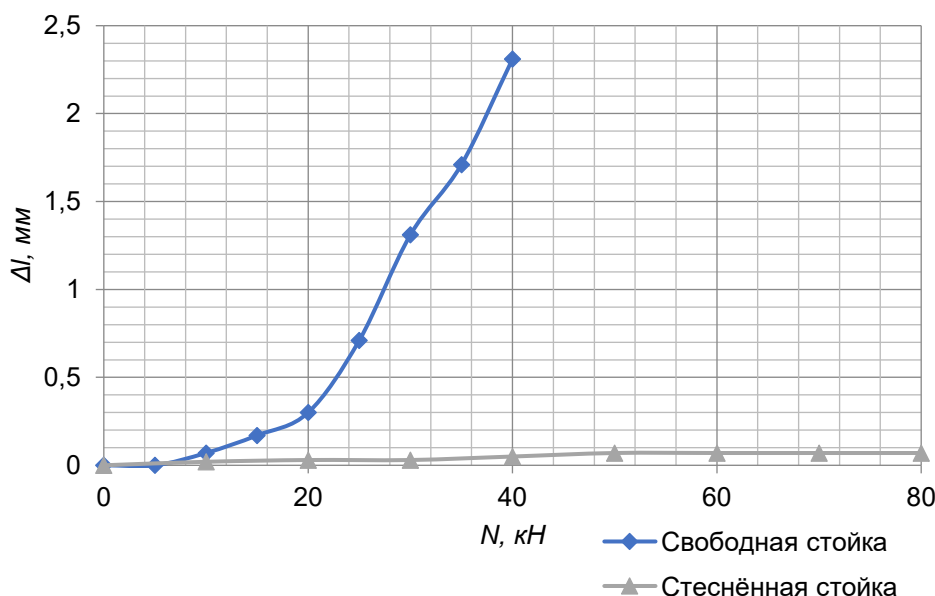


Рис. 3. Выгибы стойки С1 от продольной силы, снятые в центральной точке ее длины, в свободном и стесненном состоянии

Fig. 3. The bends of the rack C1 from the longitudinal force, removed at the central point of its length, in a free and constrained state

Стойка C2L = 1200 мм, обойма = 16 см.

Свободная стойка C2 при нагружении продольной силой потеряла устойчивость при продольной нагрузке 150 кН, что соответствует расчетному значению.

Продольный изгиб стойки в обойме на 28% меньше, в точке потери устойчивости свободной стойки (рис. 4). Стойка в обойме проявила признаки потери устойчивости при 250 кН, это значит, что стойка C2 показала несущую способность такой величины, которая соответствует граничному условию прочности,

но ее выгиб больше, чем у стойки C1.

На рис. 5 показано, что при отношении выгибов стоек в диапазоне теоретической их несущей способности для стойки C1, имеющей малые соотношения $\frac{A_{c1}}{A_{об}}$, влияние величины размеров обоймы очень велико. Для стойки C2 с меньшим соотношением $\frac{A_{c2}}{A_{об}}$ площадей стойки и обоймы, соотношение выгибов свободной и стесненной стоек гораздо меньше, чем у C1.

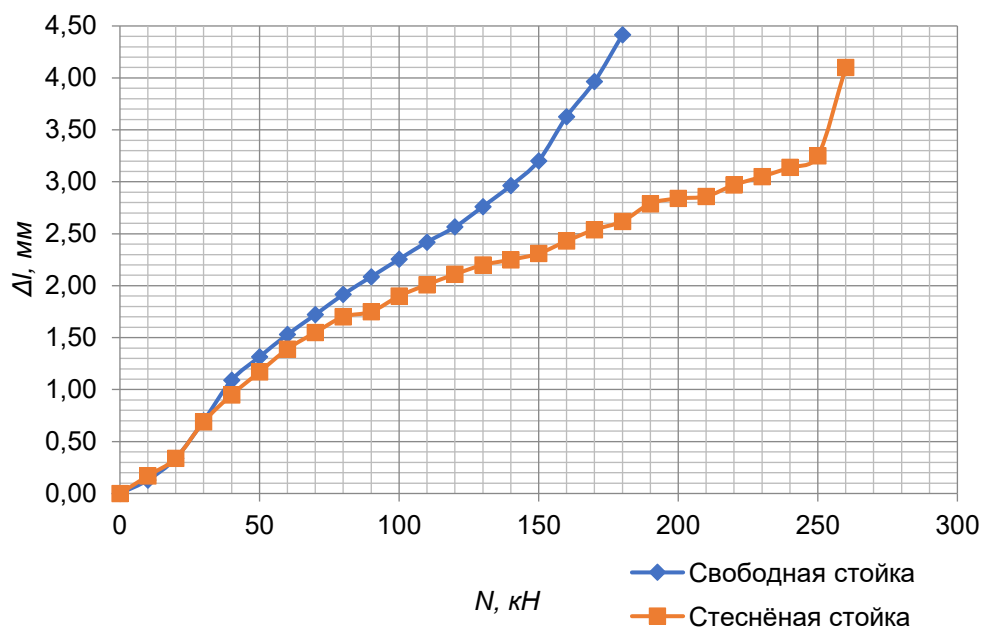


Рис. 4. Выгибы стойки C2 от продольной силы
Fig. 4. Bends of the rack C2 from the longitudinal force

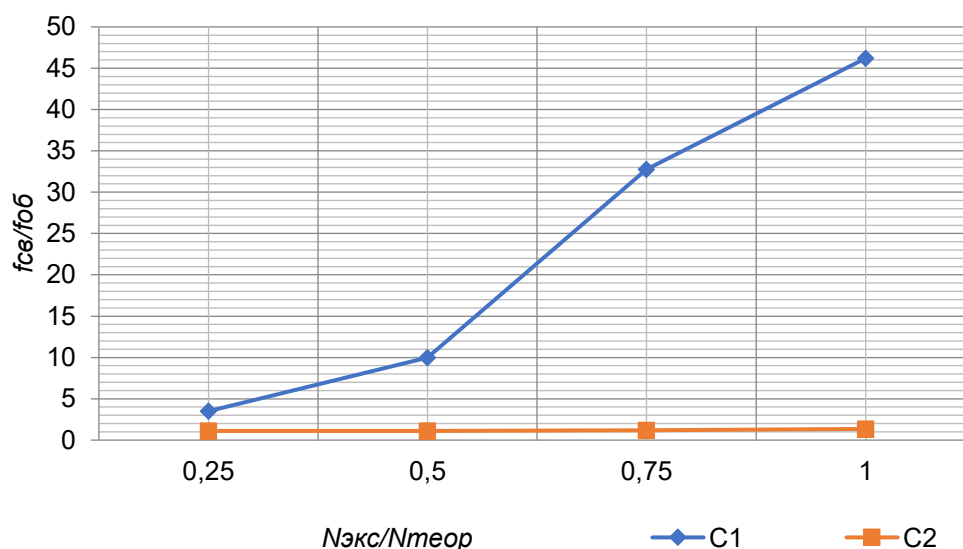


Рис. 5. Соотношение продольных выгибов (поперечных перемещений точек в центральной части) свободных стоек к выгибам стоек в обойме
Fig. 5. The ratio of longitudinal bends (transverse movements of points in the central part) of free racks to the bends of the racks in the cage

Несущая способность стоек зависит от величины размеров охватывающей обоймы (рис. 6).

Для стойки С1 прирост несущей способности в обойме составил 132% от свободной. Для стойки С2 прирост несущей способности

составил 67%.

При уменьшении размеров пенобетонной обоймы снижается ее влияние на величину продольного изгиба и несущей способности. Отсюда можно вычислить минимальные ее размеры.

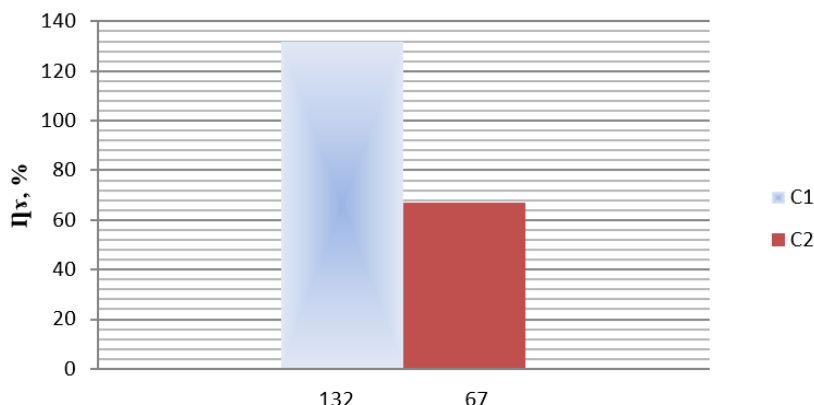


Рис. 6. Прирост несущей способности стоек в пенобетонных обоймах по отношению к несущей способности свободных стоек

Fig. 6. The increase in the load-bearing capacity of racks in foam concrete clips in relation to the load-bearing capacity of free racks

Расчет минимального значения размеров обоймы для стойки С2 открытого сечения.

$$A_{c1} = 9,6 \text{ см}^2;$$

$$\text{площадь обоймы: } A_{об} = \frac{9,6}{0,112} = 85,73 \text{ см}^2;$$

$$\text{размеры стороны: } a = \sqrt{85,73} = 9,3 \text{ см.}$$

Минимальное значение размеров обоймы для стойки открытого сечения С2 = 9,3 см. Это означает, что при ее стороне менее 9 см, влияние на выгиб и устойчивость становятся незначительны. Экономия металла можно вывести из равенства несущих способностей стесненной стойки, имеющей некоторый резерв по нагрузке благодаря обойме, и свободной стойки большего сечения, имеющей аналогичную величину несущей способности.

Уравнение равенства несущих способностей:

$$N = A_1 R_y = A_2 R_y \varphi,$$

где A_1 – сечение стойки в обойме, A_2 – сечение свободной стойки большей площади равно устойчивой данной.

Отсюда соотношение площадей сечения:

$$A_1 = A_2 \varphi, A_2 = \frac{A_1}{\varphi}.$$

$$\text{Для С1 } \varphi = 0,43, A = 3,72 \text{ см}^2,$$

$$A_{эк} = A \varphi = 3,72 \cdot 0,43 = 1,6 \text{ см}^2.$$

Экономия металла для С1 составила

$$\frac{3,72 - 1,6}{3,72} \cdot 100\% = 57\%.$$

$$\text{Для С2 } \varphi = 0,598, A = 9,6 \text{ см}^2;$$

$$A_{эк} = A \varphi = 9,6 \cdot 0,598 = 5,74 \text{ см}^2.$$

Экономия металла для С2 составила:

$$\frac{9,6 - 5,74}{9,6} \cdot 100\% = 40,2\%.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментов по статическому центральному сжатию стоек открытого сечения определено, что стойки в обоймах показали повышение несущей способности. При этом выявлено, что размеры обоймы влияют на величину и характер продольного изгиба. Тем самым стало возможным обеспечить экономию металла за счет уменьшения сечения стоек при их несущей способности, аналогичной таковой у свободных стоек. Показано, что чем больше соотношение площади обхватывающей пенобетонной обоймы к площади сечения сжатой стойки, тем больше экономия металла.

Предложены пути совершенствования расчетов центрально сжатых стержней на основании анализа испытаний в соответствии с исследованием [30]. Можно утверждать, что повышенная устойчивость элементов каркаса, обеспеченная наличием пенобетонного обхвата, служит основанием проектировать здания с таким техническим решением. Данная строительная система с совмещением преимуществ несущих и ограждающих конструкций может получить широкое распространение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Suzuki Yu., Lignos Dimitrios G. Development of collapse-consistent loading protocols for experimental testing of steel columns // *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2019. Vol. 49. Iss. 2. P. 114–131. <https://doi.org/10.1002/eqe.3225>.
2. Yogesh Tambe, Pravin Nemade. Physical and mechanical properties of foamed concrete, a literature review // *Songklanakarin journal of science and technology*. 2022. Vol. 44. Iss. 4. P. 936–944. <https://doi.org/10.14456/sjst-psu.2022.125>.
3. Yonggui Chen, Leilei Guan, Shen-Yi Zhu, Wei-Jia Chen. Foamed concrete containing fly ash: Properties and application to backfilling // *Construction and building materials*. 2020. Vol. 273. P. 121685. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121685>.
4. Kozłowski M., Kadela M. Mechanical characterization of lightweight foamed concrete // *Advances in materials science and engineering*. 2018. Vol. 2018. P. 6801258. <https://doi.org/10.1155/2018/6801258>.
5. Hui Jin, Qing Chun. Research on fire-resistance capacities of steel columns with partial-damaged fire protection coating // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2020. Vol. 24. P. 1893–1902. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-1795-2>.
6. Савенков А.И., Заенец Е.О., Кетнер А.В. Устойчивость элементов металлического каркаса при работе в стесненных условиях // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. 2021. № 8. С. 199–200. EDN: KNRTFY.
7. Савенков А.И., Заенец Е.О., Кетнер А.В. Деформации внецентренно-сжатой стойки в пенобетонной обойме // *Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета*. 2021. Т. 1. № 18. С. 130–133. EDN: FZWWHA.
8. Артемьев Е.А. Несущая способность центрально сжатых коррозионно-поврежденных в результате огневого воздействия железобетонных элементов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 6. С. 35–39. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.06.35-39>. EDN: ZZJHBJ.
9. Бузало Н.А., Гонтаренко И.В., Черныховский Б.А. Снижение силового сопротивления стальных колонн производственных зданий, получивших коррозионные повреждения при эксплуатации // *Строительство и архитектура*. 2020. Т. 8. № 4. С. 9–13. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2020-8-4-9-13>. EDN: YACKOL.
10. Li J., Wang X., Li Ch., Lu W. Bearing Capacity of Light-Steel Compound Section and Steel Columns under Axial Compression // *Advances in Civil Engineering*. 2022. Vol. 2022. P. 8061015. <https://doi.org/10.1155/2022/8061015>.
11. Sonnenschein R., Gajdosova K., Gramblička Š. Comparison of composite, steel and reinforced concrete columns // *5th World multidisciplinary civil engineering-architecture-urban planning symposium – WMCAUS IOP Conference series materials science and engineering (Prague, 15–19 June 2020)*. 2020. Vol. 960. P. 032093. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/960/3/032093>.
12. Sourabh Dhiman, Nirbhay Thakur, Nitish Kumar Sharma. A Review on behaviour of columns of steel framed structure with various steel sections // *International journal of engineering and technology*. 2019. Vol. 06. Iss. 03. P. 587–590.
13. Савенков А.И., Шустов П.А., Горбач П.С., Плосконосова А.О. Оценка прочности пенобетона при осевом одноосном сжатии // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2020. Т. 10. № 1 (32). С. 100–107. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-1-100-107>. EDN: KYMNTY.
14. Савенков А.И., Плосконосова А.О. Расчет выгиба и несущей способности внецентренно сжатых стоек замкнутого сечения // *Вестник Ангарского государственного технического университета*. 2022. № 16. С. 150–153. EDN: PYODFV.
15. Умнова О.В., Туев Д.С. Метод прямого определения несущей способности стальных тонкостенных холодногнутых профилей на примере расчета центрально сжатой стойки // *Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: материалы 6-ой Междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 40-летию юбилею Института архитектуры, строительства и транспорта Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, 22–25 мая 2019 г.)*. Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2019. С. 389–395. EDN: YHGDQZ.
16. Бузало Н.А., Гонтаренко И.В., Черныховский Б.А., Чепизубов И.Г. Влияние механических повреждений на несущую способность стальных колонн производственных зданий // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2020. № 6 (1030). С. 46–50. EDN: VOTIDQ.
17. Савенков А.И., Заенец Е.О., Кетнер А.В. Скрытый каркас из легких стальных тонкостенных конструкций в монолитном пенобетоне // *Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета*. 2022. Т. 1. № 18. С. 134–137. EDN: UZHRXT.
18. Кертбиев А.А., Шугушев М.М. Расчёт рационального сечения сжатой стойки при продольном изгибе // *Перспектива–2022: материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и*

- молодых ученых (г. Нальчик, 22–30 апреля 2022 г.). Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2022. Т. 4. С. 174–177. EDN: CHEWUD.
19. Бакушев С.В., Лощинин Н.А. Расчёт внецентренно сжатой стойки на поперечную нагрузку // Моделирование и механика конструкций. 2023. № 17. С. 53–61. EDN: IKCIEK.
20. Sangeetha P., Ashwin Muthuraman R.M., Dachina G., Dhivya M., Janani S., Sai Madumathi. Behaviour of concrete filled steel tubes // Journal of Informatics and Mathematical Sciences. 2018. Vol. 10. No. 1-2. P. 297–304. <https://doi.org/10.26713/jims.v10i1-2.1056>.
21. Li P., Zhang T., Wang Ch. Behavior of concrete-filled steel tube columns subjected to axial compression // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 2018. P. 4059675. <https://doi.org/10.1155/2018/4059675>.
22. Барагунова Л.А., Лафишева М.М., Хажироков И.Х. Об оптимальном сечении сжатой стойки // Перспективные научные исследования: опыт, проблемы и перспективы развития: сборник научных статей по материалам IX Международной научно-практической конференции (г. Уфа, 09 декабря 2022 г.). Уфа: Общество с ограниченной ответственностью Научно-издательский центр «Вестник науки», 2022. Т. 2. С. 212–219. EDN: YNNYIM.
23. Krishan A. Bearing Capacity of Concrete Filled Steel Tube Columns. In: Sustainability of Concrete With Synthetic and Recycled Aggregates. Eds. Hosam M. Saleh. 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99650>.
24. Жолдошов Б.М., Шералиева С.Т. Исследования прочности и устойчивости металлических колонн // Известия Ошского технологического университета. 2019. № 2. С. 185–189. EDN: TKAGHQ.
25. Никитина А.Э., Михайлов Б.В. Углы поворота узлов критических точек мониторинга металлической стойки при потере устойчивости // Вестник науки. 2021. Т. 5. № 5-1 (38). С. 120–125. EDN: BAPPKB.
26. Муцанов А.В., Цепляев М.Н. Новые подходы к оценке устойчивости элементов пространственных металлических конструкций // Наука и творчество вклад молодежи: сборник материалов Всероссийской молодежной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Махачкала, 10–11 ноября 2022 г.). Махачкала: Типография «Формат», 2022. С. 196–200. EDN: NEWMKM.
27. Фисенко Е.Н., Сабиров Р.А. Анализ устойчивости центрально сжатых тонкостенных стержней // Механика: исследования и инновации. 2022. № 15. С. 283–285.
28. Вяткин Ю.А., Каныгин Р.И., Каныгин И.И., Пухов М.А. Определение фактического напряжения в сжатой стойке // Математика и математическое моделирование: сборник материалов XV Всероссийской молодежной научно-инновационной школы (г. Саров 07–09 апреля 2021 г.). М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2020. С. 91. EDN: DIUBTH.
29. Арушонюк Ю.Ю. Об ошибках проектирования строительных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2021. № 11 (83). С. 488–498. EDN: IAKKDK.
30. Конин Д.В. Экспериментальные исследования стальных стержней на центральное и внецентренное сжатие // Вестник НИЦ. Строительство. 2021. № 1. С. 16–37. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\(28\)-16-37](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1(28)-16-37). EDN: JSWWYL.

REFERENCES

1. Suzuki Yu., Lignos Dimitrios G. Development of collapse-consistent loading protocols for experimental testing of steel columns. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2019;49(2):114-131. <https://doi.org/10.1002/eqe.3225>.
2. Yogesh Tambe, Pravin Nemade. Physical and mechanical properties of foamed concrete, a literature review. *Songklanakarin journal of science and technology*. 2022;44(4):936-944. <https://doi.org/10.14456/sjst-psu.2022.125>.
3. Yonggui Chen, Leilei Guan, Shen-Yi Zhu, Wei-Jia Chen. Foamed concrete containing fly ash: Properties and application to backfilling. *Construction and building materials*. 2020;273:121685. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121685>.
4. Kozłowski M., Kadela M. Mechanical characterization of lightweight foamed concrete. *Advances in materials science and engineering*. 2018;2018:6801258. <https://doi.org/10.1155/2018/6801258>.
5. Hui Jin, Qing Chun. Research on fire-resistance capacities of steel columns with partial-damaged fire protection coating. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2020;24:1893-1902. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-1795-2>.
6. Savenkov A.I., Zaenets E.O., Ketner A.V. Stability of metal frame elements when working in cramped conditions. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress*. 2021;8:199-200. (In Russ.). EDN: KNRTFY.
7. Savenkov A.I., Zaenets E.O., Ketner A.V. Deformations of an off-center compressed rack in a foam concrete cage. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021;1(18):130-133. (In Russ.). EDN: FZWWHA.

8. Artemyev E.A. Bearing capacity of centrally compressed reinforced concrete elements corrosion-damaged as a result of fire exposure. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and civil engineering*. 2019;6:35-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.06.35-39>. EDN: ZZJHBJ.
9. Buzalo N.A., Gontarenko I.V., Chernykhovsky B.A. Reducing the force resistance of steel columns in industrial buildings with corrosion damage during operation. *Stroitel'stvo i arkhitektura = Construction and Architecture*. 2020. T. 8. № 4. S. 9–13. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2020-8-4-9-13>. EDN: YACKOL.
10. Li J., Wang X., Li Ch., Lu W. Bearing Capacity of Light-Steel Compound Section and Steel Columns under Axial Compression. *Advances in civil engineering*. 2022;2022:8061015. <https://doi.org/10.1155/2022/8061015>.
11. Sonnenschein R., Gajdosova K., Gramblička Š. Comparison of composite, steel and reinforced concrete columns. In: *5th World multidisciplinary civil engineering-architecture-urban planning symposium – WMCAUS IOP Conference series materials science and engineering*. 15-19 June 2020, Prague. 2020. Vol. 960. p. 032093. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/960/3/032093>.
12. Sourabh Dhiman, Nirbhay Thakur, Nitish Kumar Sharma. A Review on behaviour of columns of steel framed structure with various steel sections. *International journal of engineering and technology*. 2019;06(03):587-590.
13. Savenkov A.I., Shustov P.A., Gorbach P.S., Ploskonosova A.O. Evaluation of the strength of foam concrete under axial uniaxial compression. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2020;10(1):100-107. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-1-100-107>. EDN: KYMNTY.
14. Savenkov A.I., Ploskonosova A.O. Calculation of bending and bearing capacity of non-centrally compressed closed-section racks. *Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2022;16:150-153. (In Russ.). EDN: PYODFV.
15. Umnova O.V., Tuev D.S. Method of direct determination of the bearing capacity of thin-walled cold-bent steel profiles on the example of calculating a centrally compressed rack. In: *Ustoichivoe razvitie regiona: arkhitektura, stroitel'stvo, transport: materialy 6-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 40-letnemu yubileyu Instituta arkhitektury, stroitel'stva i transporta TGTU = Sustainable development of the region: architecture, construction, transport. Materials of the 6th International Scientific and Practical Conference dedicated to the 40th anniversary of the Institute of Architecture, Construction and Transport of Tambov State Technical University*. 22-25 May 2019, Tambov. Tambov: Pershina R.V. Publ.; 2019. p. 389–395. (In Russ.). EDN: YHGDQZ.
16. Buzalo N.A., Gontarenko I.V., Chernykhovskiy B.A., Chepizubov I.G. Influence of mechanical damages on the load-bearing capacity of steel columns in industrial buildings. *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki*. 2020;6:46-50. (In Russ.). EDN: VOTIDQ.
17. Savenkov A.I., Zayenets E.O., Ketner A.V. Concealed frame made of light steel thin-walled structures in monolithic foam concrete. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2022;1(18):134-137. (In Russ.). EDN: UZHRXT.
18. Kertbiev A.A., Shugushev M.M. Calculation of the rational section of a compressed rack with longitudinal bending. In: *Perspektiva–2022: materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Perspective–2022: materials of the International scientific conference of students, post-graduates and young scientists*. 22-30 April 2022, Nal'chik. Nal'chik: Kabardino-Balkarian state university named after H.M. Berbekov; 2022. Vol. 4. p. 174-177. (In Russ.). EDN: CHEWUD.
19. Bakushev S.V., Loshchinin N.A. Calculation of an off-center compressed rack for a transverse load. *Modelirovanie i mekhanika konstruktiv*. 2023;17:53-61. (In Russ.). EDN: IKCIEK.
20. Sangeetha P., Ashwin Muthuraman R.M., Dachina G., Dhivya M., Janani S., Sai Madumathi. Behaviour of Concrete Filled Steel Tubes. *Journal of informatics and mathematical sciences*. 2018;10(1-2):297-304. <https://doi.org/10.26713/jims.v10i1-2.1056>.
21. Li P., Zhang T., Wang Ch. Behavior of concrete-filled steel tube columns subjected to axial compression. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018;2018:4059675. <https://doi.org/10.1155/2018/4059675>.
22. Baragunova L.A., Lafisheva M.M., Khazhirokov I.H. On the optimal section of a compressed rack. In: *Perspektivnye nauchnye issledovaniya: opyt, problemy i perspektivy razvitiya: sbornik nauchnykh statei po materialam IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Promising scientific research: experience, problems and prospects of development: collection of scientific articles based on the materials of the IX International scientific and practical conference*. 09 December 2022, Ufa. Ufa: Limited Liability Company Scientific Publishing Center "Bulletin of Science"; 2022. Vol. 2. p. 212-219. EDN: YNNYIM.
23. Krishan A. Bearing Capacity of Concrete Filled Steel Tube Columns. In: *Sustainability of Concrete With Synthetic and Recycled Aggregates*. Eds. Hosam M. Saleh. 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99650>.
24. Zholdoshev B.M., Seralieva S.T. Esearching the strength and stability of metal columns. *Izvestiya Oshskogo tekhnologicheskogo universiteta = Izvestiy Oshskogo tekhnologicheskogo university*. 2019;2:185-189. EDN: TKAGHQ.

25. Nikitina A.E., Mikhailov B.V. Angles of rotation of nodes of critical points of monitoring of a metal rack at loss of stability. *Vestnik nauki*. 2021;5(5-1):120-125. EDN: BAPPKB.
26. Muschanov A.V., Tseplyaev M.N. New approaches to assessing the stability of elements of spatial metal structures. In: *Nauka i tvorchestvo vklad molodezhi: sbornik materialov Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Science and creativity contribution of youth: a collection of materials of the All-Russian Youth Scientific and practical Conference of students, postgraduates and young scientists*. 10-11 November 2022, Makhachkala. Makhachkala: Format PH; 2022. p. 196-200. (In Russ.). EDN: NEWMKM.
27. Fisenko E.N., Sabirov R.A. Stability analysis of centrally compressed thin-walled rods. *Mechanics: Researchs and innovations*. 2022;15:283-285. (In Russ.).
28. Vyatkin Yu.A., Kanygin R.I., Kanygin I.I., Pukhov M.A. Determination of the actual voltage in a compressed rack. In: *Matematika i matematicheskoe modelirovanie: sbornik materialov XV Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-innovatsionnoi shkoly = Mathematics and mathematical modeling: collection of materials of the XV All-Russian youth scientific and innovative school*. 07-09 April 2021, Sarov. Moscow: National research nuclear university "MEPHI"; 2020. p. 91. (In Russ.). EDN: DIUBTH.
29. Arushonok Yu.Yu. About errors of design of building constructions. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2021;11:488-498. (In Russ.). EDN: IAKKDK.
30. Konin D.V. Experimental studies of steel rods for central and off-center compression. *Vestnik NITS «Stroitel'stvo» = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021;1:16-37. (In Russ.). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\(28\)-16-37](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1(28)-16-37). EDN: JSWWYL.

Информация об авторах

Савенков Андрей Иванович,

к.т.н., доцент, доцент кафедры
промышленного и гражданского строительства,
Ангарский государственный технический
университет,
665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60, Россия,
e-mail: savenkov_andrey@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-6711-1119>
Author ID: 426253

Бессонова Алена Олеговна,

учебный мастер кафедры
промышленного и гражданского строительства,
ассистент,
Ангарский государственный технический
университет,
665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60, Россия,
e-mail: ploskonosova96@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-3465-9099>
Author ID: 1163989

Шустов Павел Александрович,

к.т.н., доцент, доцент
кафедры строительного производства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: shustovpa@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2547-3579>
Author ID: 683279

Information about the authors

Andrey I. Savenkov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Industrial
and Civil Engineering,
Angarsk State Technical University,
60 Tchaikovsky St., Angarsk 665835, Russia,
e-mail: savenkov_andrey@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-6711-1119>
Author ID: 426253

Alena O. Bessonova,

Educational Master of the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Assistant,
Angarsk State Technical
University,
60 Tchaikovsky St., Angarsk 665835, Russia,
e-mail: ploskonosova96@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-3465-9099>
Author ID: 1163989

Pavel A. Shustov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Construction Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontova St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: shustovpa@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2547-3579>
Author ID: 683279

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в
подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 09.08.2023.
Одобрена после рецензирования 31.08.2023.
Принята к публикации 01.09.2023.

Information about the article

The article was submitted 09.08.2023.
Approved after reviewing 31.08.2023.
Accepted for publication 01.09.2023.