

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ CONSTRUCTION MATERIALS AND CONSTRUCTION ENGINEERING IN METALLURGY

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 624.075.23
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-168-175



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ КОЛОНН

Кришан А.Л.¹, Астафьева М.А.¹, Парфенов В.В.², Вавилин Н.В.²

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

²ООО «Структура Эксперт», Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Увеличивающиеся объемы применения трубобетонных колонн в нашей стране делают все более актуальными для них поиски наиболее эффективных конструктивных решений. **Цель работы.** В качестве вертикальных сильно нагруженных конструкций предлагается использовать трубобетонные колонны круглого сечения, изготовленные с применением трубы из высокопрочной стали класса не менее С440, высокопрочного бетона класса В60 и выше, высокопрочной арматуры класса А600С и выше. Заметно повысить прочность бетонного ядра, а следовательно, и в целом колонн позволяет и дополнительное косвенное армирование. Для этих целей целесообразно использовать спирали из арматуры класса А500С или А600С. **Результат.** Приведены данные расчетов, свидетельствующие о существенном снижении материалоемкости колонны из высокопрочных материалов по сравнению с железобетонной и трубобетонной, не имеющей армирование бетонного ядра. **Практическая значимость.** Предложена упрощенная методика расчета усовершенствованной конструкции трубобетонной колонны, которая может применяться в проектной практике. Данная методика разработана на основе феноменологического подхода и учитывает основные особенности силового сопротивления трубобетонных колонн. В отличие от известных методик, предлагаемых нормативными документами различных стран, она применима для всех классов бетона и арматуры. Кроме того, она позволяет рассчитывать прочность конструкций со спиральным армированием. Методика уже нашла практическое использование при проектировании высотного здания многофункционального комплекса «Деловой центр УГМК», который начали возводить летом 2024 года в центре делового квартала «Екатеринбург-Сити». Техничко-экономические показатели проекта свидетельствуют о высокой эффективности применения трубобетона из высокопрочных материалов в качестве сильно нагруженных колонн. Получено заметное снижение размеров поперечного сечения и расхода основных материалов в случае применения трубобетонных колонн взамен железобетонных. Положительный опыт практического использования трубобетона в высотном строительстве рекомендуется к широкому распространению.

Ключевые слова: трубобетонная колонна, центральное сжатие, прочность, деформативность, высокопрочный бетон, высокопрочная арматура, спиральное армирование

© Кришан А.Л., Астафьева М.А., Парфенов В.В., Вавилин Н.В., 2026

Для цитирования

Эффективность применения сильно нагруженных трубобетонных колонн / Кришан А.Л., Астафьева М.А., Парфенов В.В., Вавилин Н.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 168-175. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-168-175>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

EFFICIENCY OF USING HEAVY LOADED CONCRETE FILLED STEEL TUBE COLUMNS

Krishan A.L.¹, Astafieva M.A.¹, Parfenov V.V.², Vavilin N.V.²

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² LLC Structura Expert, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The increasing use of concrete filled steel tube columns in our country makes it increasingly important to find the most effective structural solutions. **Objectives.** It is proposed to use round-section concrete filled steel tube columns made using pipes made of high-strength steel of at least C440 grade, high-strength concrete of B60 grade and higher, and high-strength reinforcing bars of A600C grade and higher as vertical heavily loaded structures. Additional indirect reinforcement also allows for a noticeable increase in the strength of the concrete core and, consequently, of the columns as a whole. For these purposes, it is advisable to use coils made of A500C or A600C grade reinforcement. **Result.** The calculation data are presented, indicating a significant reduction in the material content of a column made of high-strength materials compared with reinforced concrete and tube-reinforced concrete, which does not have reinforcement of the concrete core. **Practical Relevance.** A simplified calculation method for the improved design of a concrete filled steel tube column is proposed, which can be used in project practice. This method has been developed on the basis of a phenomenological approach and takes into account the main features of the force resistance of the columns. Unlike the well-known methods proposed by regulatory documents of various countries, it is applicable to all grades of concrete and reinforcement. In addition, it allows to calculate the strength of structures with spiral reinforcement. The method has already found practical use in the design of a high-rise building of the multifunctional complex “UMMC Business Center”, which began construction in the summer of 2024 in the center of the Yekaterinburg City business district. The technical and economic indicators of the project show the high efficiency of using tube-reinforced concrete made of high-strength materials as heavily loaded columns. A noticeable reduction in cross-sectional dimensions and content of basic materials has been obtained in the case of using concrete filled steel tube columns instead of reinforced concrete ones. The positive experience has demonstrated that the use of tube-reinforced concrete in high-rise construction is recommended for wide distribution.

Keywords: concrete filled steel tube column, axial compression, strength, deformability, high-strength concrete, high-strength reinforcing bar, spiral reinforcement

For citation

Krishan A.L., Astafieva M.A., Parfenov V.V., Vavilin N.V. Efficiency of Using Heavy Loaded Concrete Filled Steel Tube Columns. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 168-175. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-168-175>

Введение

В мировой практике трубобетонные колонны (ТБК) все чаще применяются при строительстве высотных зданий [1-3]. Широкому использованию ТБК способствуют их многочисленные преимущества [4-10]. Однако в России эти колонны только начинают применять в практике гражданского строительства. Поэтому цель данной публикации – показать эффективность применения трубобетона в качестве сильно нагруженных колонн.

Конструкция ТБК представляет из себя стальную трубу, заполненную бетоном. Для повышения прочности и огнестойкости в бетоне, как правило, размещается продольная арматура (рис. 1).

Узлы сопряжения с перекрытиями могут иметь различную конструкцию. При этом наиболее рациональные варианты предполагают передачу усилий от перекрытия одновременно на стальную трубу и железобетонное ядро, например в случае опирания моно-

литного железобетонного перекрытия с помощью опорного столика, как показано на рис. 2.

За счет повышенной прочности и жесткости ТБК имеют значительно меньшие размеры поперечного сечения по сравнению с железобетонными колоннами. Расчеты показывают, что на нижних этажах здания высотой 300 м железобетонную колонну сечения 2×2 м можно заменить на трубобетонную круглого сечения диаметром 1,32 м. Причем расход металла в колоннах обоих типов примерно одинаков. Такая замена приводит к заметному улучшению планировки помещений. Кроме того, высвобождаются дополнительные полезные площади. Стоимость сдаваемых в аренду помещений в высотных зданиях достаточно высока. Согласно предварительным расчетам, только за счет дополнительных площадей от замены колонн на трубобетонные в проектируемом в Москве здании высотой 300 м годовая прибыль составит порядка 318,6 млн руб.

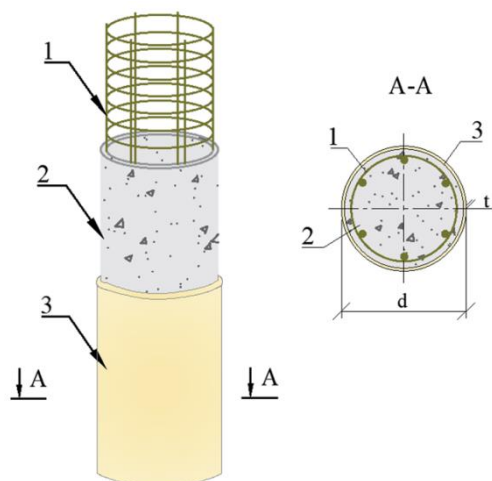


Рис. 1. Ствол трубобетонной колонны:
1 – спиральное армирование; 2 – бетонное ядро; 3 – стальная труба
Fig. 1. Shaft of the concrete filled steel tube column:
1 is spiral reinforcement; 2 is concrete core;
3 is steel tube

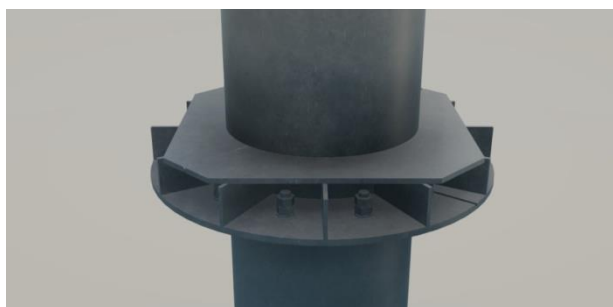


Рис. 2. Опорный столик трубобетонной колонны
Fig. 2. Support table of the concrete filled steel tube column

Существенную прибыль можно получить и за счет сокращения сроков возведения несущих каркасов зданий. В Екатеринбурге сейчас возводится высотный multifunctional комплекс, непосредственное участие в проектировании которого приняли авторы данной статьи. Вертикальными элементами несущего каркаса здания служат трубобетонные колонны высокой заводской готовности. Стальные оболочки колонн поставляются с завода на строительную площадку готовыми к монтажу (рис. 3).

Выполненный хронометраж времени монтажа ТБК высотой на три этажа показал, что крепление на болтах стальной трубы к фундаменту занимает 8 мин. Заполнение трубы бетонной смесью производится на строительной площадке. Самоуплотняющаяся смесь подается под давлением бетононасосом через отверстие в нижней части трубы методом восходящего раствора. В результате процесс заполнения трубы бетоном длится всего 12 мин. При этом не требуется опалубка и гарантируется необходимое качество бетонирования.



Рис. 3. Поставка готовых к монтажу стальных труб-оболочек
Fig. 3. Delivery of ready-to-install steel casing tubes

Учитывая тот факт, что труба может воспринимать нагрузку от нескольких вышележащих перекрытий, время набора бетоном колонны проектной прочности не влияет на скорость возведения каркаса. Перечисленные обстоятельства позволяют обеспечивать высокую скорость при требуемом качестве монтажа ТБК, что безусловно влияет на снижение приведенных затрат на строительство.

Материалы и методы исследования

Определяя рациональную область применения ТБК с учетом отмеченных достоинств, важно понимать, что в зависимости от используемых материалов и конструктивного решения их прочность может меняться в довольно широких пределах. Покажем, насколько можно повысить прочность (или снизить размеры поперечного сечения) колонн при грамотном их конструировании.

Для наглядности остановимся на простом примере. Рассмотрим железобетонную колонну и два варианта короткой трубобетонной колонны круглого сечения. Прочность бетона принята одинаковой. Бетон тяжелый класса В70 на базальтовом щебне. Железобетонная колонна изготавливается по традиционной технологии при вертикальном бетонировании сверху. Трубобетонные колонны бетонируются методом восходящего раствора. Для железобетонной колонны принята продольная арматура Ø40 А500С. Поперечная арматура Ø10 А240. Сталежелезобетонная колонна в первом варианте изготавливается из трубы с классом стали С345. Бетон не армируется. Во втором используется труба из стали С590. Для повышения прочности ядра в бетоне размещается продольная арматура 10Ø40 А600С. Вокруг продольной арматуры с шагом 75 мм навита спираль из арматуры Ø10 А500С.

Осевая сжимающая нагрузка на все колонны одинакова – $N = 7500$ т. С целью упрощения расчеты выполняются для коротких центрально сжатых элементов.

Прочность железобетонной колонны определяется по формуле

$$N_u = \gamma_{b3} R_b A + R_{sc} A_{s, tot}, \quad (1)$$

где R_b и R_{sc} – расчетное сопротивление бетона и продольной арматуры сжатию; A и A_p – площади поперечных сечений бетона и арматуры; $\gamma_{b3} = 0,85$ – коэффициент условий работы при высоте слоя бетонирования более 1,5 м.

Прочность центрально сжатой ТБК определяется по формуле

$$N = R_{b3} A + \sigma_{pz} A_p + \sigma_{sz} A_s, \quad (2)$$

где R_{b3} – расчетное сопротивление бетонного ядра объемному сжатию; σ_{pz} – сжимающее напряжение осевого направления в стальной трубе; σ_{sz} – сжимающее напряжение в продольной арматуре; A , A_p и A_s – площади поперечных сечений бетонного ядра, стальной трубы и продольной арматуры.

Методика определения прочности ТБК по фактическим прочностным характеристикам бетона и стали дана в [11]. Ниже приведены формулы для расчетов по первой группе предельных состояний. Для ТБК без армирования бетонного ядра используются формулы (3)-(6).

Конструктивный коэффициент трубобетона

$$\rho = 0,85 \frac{R_{pn} A_p}{R_{bn} A}, \quad (3)$$

где R_{pn} – нормативное сопротивление растяжению стальной трубы; R_{bn} – нормативное сопротивление бетона сжатию.

Относительная величина бокового давления со стороны стальной оболочки на бетонное ядро в предельном состоянии ($\bar{\sigma} = \sigma_{br} / R_b$)

$$\bar{\sigma} = 0,36e^{-(a+b)} \rho^{0,8}, \quad (4)$$

где a и b – коэффициенты материала (для ТБК из тяжелого бетона $a = 0,125$ и $b = 0,25$).

Нормативное сопротивление бетона объемному сжатию от реактивного давления трубы вычисляется по формуле

$$R_{bno} = R_{bn} \left[1 + 0,8 \cdot \left(0,5\bar{\sigma} + \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma} - 2}{4} \right)^2 + \frac{\bar{\sigma}}{b}} \right) \right]. \quad (5)$$

Сжимающее напряжение в трубе

$$\sigma_{pz} = R_b \left(\sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2} - \bar{\sigma} \right) \frac{A}{A_p}, \quad (6)$$

где R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию.

Наличие продольной и спиральной арматуры учитывается с использованием формул, приведенных в [12]. Влияние дополнительной косвенной арматуры во многом зависит от коэффициента спирального армирования

$$\mu_{s,c} = \frac{2A_{s,c}}{d_c s}, \quad (7)$$

в которой $A_{s,c}$ – площадь сечения арматуры спирали, $d_{s,c}$ и s – диаметр и шаг спирали.

Боковое давление со стороны спиральной арматуры на бетонное ядро

$$\sigma_{bc} = 0,95 \cdot \mu_{s,c} R_{s,c}, \quad (8)$$

где $R_{s,c}$ – расчетное сопротивление растяжению арматуры спирали.

Относительная величина бокового давления на бетон в пределах спирали

$$\bar{\sigma}_\Sigma = \bar{\sigma} + \sigma_{bc} / R_{bn}. \quad (9)$$

Нормативное сопротивление бетона объемному сжатию в пределах спирального армирования R_{bnc} вычисляется по формуле (5) с заменой $\bar{\sigma}$ на $\bar{\sigma}_\Sigma$. Осредненное нормативное сопротивление сжатию бетонного ядра

$$R_{bn3} = \frac{R_{bn0} (A - A_c) + R_{bnc} A_c}{A}, \quad (10)$$

где A_c – площадь поперечного сечения бетона внутри спирали.

Переход к расчетному сопротивлению осуществляется согласно требованиям СП 63.13330.2018.

В соответствии с указаниями действующих норм проектирования железобетонных конструкций расчетное сопротивление арматуры сжатию должно приниматься не более 400 МПа независимо от ее класса. Это ограничение вытекает из условия совместной работы арматуры с бетоном. Однако предельные осевые деформации ТБК значительно превышают деформации одноосно сжатого бетона. Данный факт позволяет эффективно использовать в ядре высокопрочную арматуру при ее работе на сжатие. Максимальное напряжение в этой арматуре σ_{sz} рассчитывается по формуле

$$\sigma_{sz} = \left(0,1 \frac{\varepsilon_{sz} - \varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{so} - \varepsilon_{s1}} + 0,9 \right) R_s \leq R_s, \quad (11)$$

в которой ε_{sz} – осевая деформация трубы в предельном состоянии по прочности, а деформации ε_{s0} и ε_{s1} определяются по следующим формулам:

$$\varepsilon_{s0} = \frac{R_s}{E_s} + 0,002; \quad (12)$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{0,9R_s}{E_s}, \quad (13)$$

где E_s – модуль упругости арматуры.

Из условия совместной работы трубы и бетонно-го ядра, в основном обеспечиваемой значительными силами трения между ними, деформация ε_{sz} принимается равной деформации объемно-сжатого бетона при максимальном напряжении, то есть $\varepsilon_{sz} = \varepsilon_{b00}$. Эта деформация определяется по формуле

$$\varepsilon_{b00} = \varepsilon_{b0} \alpha_b^{3,2} - \frac{R_b}{E_b} (\alpha_b^{3,2} - \alpha_b), \quad (14)$$

в которой ε_{b0} – деформация в вершине диаграммы состояния одноосно-сжатого бетона; E_b – начальный модуль упругости бетона; $\alpha_b = R_{b3}/R_b$.

Деформацию ε_{b0} и модуль упругости бетона E_b (в МПа) для тяжелого бетона рекомендуется определять в зависимости от его класса по прочности на сжатие B ($15 \leq B \leq 100$) по следующим формулам:

$$\varepsilon_{b0} = \frac{1,2 + 0,16\sqrt{B}}{1000}; \quad (21)$$

$$E_b = (55250 - \frac{122000}{\sqrt{B}}) \cdot \beta, \quad (22)$$

где β – коэффициент, учитывающий вид крупного заполнителя бетона (для гранита $\beta = 1$; для базальта $\beta = 1,2$; для известняка $\beta = 0,9$).

Основные результаты расчета для всех трех колонн представлены в табл. 1.

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что трубобетонные колонны при примерно одинаковой прочности имеют заметно меньшие размеры поперечного сечения. Немного больший расход стали в трубобетонной колонне I обусловлен двумя факторами. Во-первых, в таблице не учтен расход поперечной арматуры. Во-вторых, для арматуры железобетонной колонны принята более прочная сталь. Например, если использовать трубы 1320×12 из стали С440, то расход металла можно сократить на 16% при прочности колонны 7770 т.

Таблица 1. Результаты расчета железобетонной и трубобетонной колонн
Table 1. Results of calculation of reinforced concrete and concrete filled steel tube columns

Вид колонны	Диаметр поперечного сечения / сечение трубы, мм	Площадь сечения арматуры, см ²	Площадь сечения трубы, см ²	Расход бетона на 1 п.м длины, м ³	Расчетная прочность, т
Железобетонная	1500	528	–	1,72	7507
Трубобетонная I	1320×14	–	574	1,31	7566
Трубобетонная II	1120×12	126	418	0,93	7527

Примечание. Расход поперечной и спиральной арматуры в таблице не учтен.

Применение трубы из стали класса С590 и высокопрочной продольной арматуры в ядре привело к существенному увеличению прочности колонны. При заданной нагрузке это позволило в 1,34 раза сократить размеры поперечного сечения. Следует также заметить, что армирование бетонного ядра приводит к повышению огнестойкости ТБК. Как показывают наши расчеты, за счет рационально назначенного расстояния от внутренней поверхности трубы до продольной арматуры и количества этой арматуры можно обеспечивать огнестойкость R150 без какой-либо внешней защиты трубы. Для обеспечения огнестойкости R240 дополнительно следует оштукатурить трубу цементно-песчаным раствором с толщиной слоя 30–35 мм. Запланирована серия огневых испытаний ТБК для подтверждения фактической огнестойкости R240 без использования огнезащитных составов и конструктивной огнезащиты колонны.

Приведенные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения высокопрочных труб и арматуры в ТБК. Расчеты показывают, что в этих конструкциях можно было полностью использовать прочностные свойства сжатой арматуры класса А800, получив заметное снижение расхода стали. Но, к сожалению, в настоящее время наши металлургические заводы выпускают такую арматуру только небольших диаметров.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты выполненного анализа различных вариантов конструкции колонн несущих каркасов высотных зданий использованы при проектировании многофункционального комплекса «Деловой центр УГМК», который начали возводить летом 2024 года в центре делового квартала «Екатеринбург-Сити». На рис. 4 приведена фотография строительной площадки этого здания по состоянию на август 2024 года. Основные размеры проектируемого здания в осях составляет 81,0×74,0 м. Высота здания – 99,9 м. Коли-

чество этажей – 26. Общая площадь здания составляет 72282,7 м², строительный объем – 313109 м³.

Конструктивная система здания каркасно-стволовая. ТБК располагались вокруг ядра жесткости с шагом 9×9 и 9×10 м. Их объединяли между собой монолитные безбалочные перекрытия. В связи с большими пролетами перекрытия выполнялись многопустотными, толщиной 300 мм.



Рис. 4. Возведение 20-го этажа высотного здания

Fig. 4. Construction of the 20th floor of a high-rise building

Колонны проектировались с применением высокопрочного бетона, из труб с классом стали С440 и высокопрочной продольной арматуры класса А600С. Арматурный каркас имел и косвенную арматуру в виде спирали Ø8 А500С. Принятое конструктивное решение ТБК сделало невозможным осуществление расчета их несущей способности по методикам, приведенным в действующем нормативном документе СП 266.1325800.2016. В этой связи на основании методики [11] был разработан и реализован в компьютерной программе алгоритм деформационного расчета, учитывающий наличие в колоннах спиральной арматуры.

Первоначально принимаемые проектные размеры сечения железобетонных колонн нижнего яруса составляли 1400×1400 мм. В окончательном варианте диаметр наиболее нагруженной ТБК составил 720 мм.

Следует отметить, что это первый опыт применения ТБК в высотном здании в России. Основные данные по расходу материалов в трубобетонных колоннах несущего каркаса представлены в табл. 2. В табл. 3 приведены основные параметры материалоемкости проекта с двумя вариантами исполнения каркаса – железобетонном и сталежелезобетонном.

Исключение из себестоимости конструкций колонн стоимости вытесненных материалов, их доставки, укладки, исключения опалубочных работ, армирования, прогрева бетона при отрицательных температурах, количества рабочей силы и т.д. дают существенное сокращение себестоимости строительства в целом, а также повышают эффективность ключевых процессов строительства в совокупности с переходом на индустриальное строительство за счет использования передовых изделий заводской готовности.

Таблица 2. Результаты расчета трубобетонных колонн

Table 2. Results of calculation of concrete filled steel tube columns

Расположение ТБК	Арматура, кг	Бетон, м ³	Расход арматуры, кг/м ³	Труба, кг
ТБК ниже отм. 0,000	182 200	289,92	628	224 700
ТБК выше отм. 0,000	148 700	304,11	489	230 600
ТБК выше отм. 35.400	126 600	376,15	337	309 500

Таблица 3. Сравнение основных показателей материалоемкости колонн здания для отметки выше 0.000

Table 3. Comparison of the key indicators of the material content of building columns for the mark above 0.000

Наименование показателя	Железобетонные колонны	ТБК
Объем бетона колонн на 1 м ² площади помещений	0,089	0,014
Масса арматуры колонн на 1 м ² площади помещений, кг	13,33	10
Масса стальной трубы на 1 м ² площади помещений, кг	–	11,27
Количество сборных изделий и монтажных элементов на объекте шт./м ²	–	0,010

Анализ сталежелезобетонного конструктивного решения Делового центра «УГМК» с применением трубобетонных колонн и многопустотных монолитных перекрытий в сравнении с традиционным монолитным каркасом здания показал следующее:

– Расход конструкционной стали на 1 м² на площади помещений здания составил 5 кг.

– Расход конструкционной стали на 1 м³ на строительный объем здания составил 2,44 кг.

– Расход всего металла в ТБК (труба и арматура) на 1 м² на площади помещений здания составил 18 кг.

– Расход арматуры на 1 м³ строительного объема здания в железобетонном варианте составляет 12 кг, а в сталежелезобетонном в 3 раза меньше.

Таким образом, применение в каркасе высотного здания ТБК в сочетании с многопустотным монолитным перекрытием привело к существенному улучшению основных технико-экономических показателей проекта. Полученный опыт анализируется и обобщается. Планируется использовать его при проектировании других подобных объектов.

Заключение

Приведенные материалы наглядно демонстрируют высокую эффективность применения трубобетона из высокопрочных материалов в качестве сильно нагруженных колонн. Полученные в процессе проектирования высотного здания параметры материалоемкости несущего каркаса свидетельствуют о заметном снижении расхода основных материалов в случае применения ТБК взамен железобетонных. Положительный опыт практического использования ТБК в высотном строительстве рекомендуется к широкому распространению.

Список источников

1. Bhure N., Tiwari N. Steel Concrete Composite Construction - A Review // IJRASET. 2018, no. 6, pp. 564–566.
2. Han L.H., Li W., Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete filled steel tubular (CFST) structures // Journal of Constructional Steel Research. 2014, no. 100, pp. 211–228.
3. Axial compressive performance of UHPC filled steel tube stub columns containing steel-polypropylene hybrid fiber / Xu L. H., Lu Q. R., Chi Y., et al. // Construction and Building Materials. 2019, no. 204, pp. 754–767.
4. 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.
5. Хазов П.А., Помазов А.П. Экспериментальное исследование продольного и поперечного изгиба трубобетонных стержней // Жилищное строительство. 2023. № 12. С. 66–71.
6. Hossain K.M.A., Chu K. and Anwar M.S. Axial load behavior of ultrahigh strength concrete-filled steel tube columns of various geometric and reinforcement configurations // Infrastructures. 2021, no. 6, 6050066.
7. Behaviour and design of ultra- high- strength CFST members subjected to compression and bending / Huang Z., Li D., Uy B., Wang J. // Journal of Constructional Steel Research. 2020, 106351.
8. Le TT, Asteris P.G and Lemonis M.E. Prediction of axial load capacity of rectangular concrete-filled steel tube columns using machine learning techniques // Engineering with Computers. 2021, pp.1-34.
9. Influence of loading method and stiffening on the behavior of short and long CFST columns / Shaker F.M.F., Ghanem G.M., Deifalla A.F., Hussein I.S. and Fawzy M.M. // Steel Compos. Struct. 2022, no. 44, pp. 281–293.
10. Compressive Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Employing Supervised Machine Learning Techniques / Zhang Q., Kamiński P., Deifalla A.F., et al. // Materials. 2022, no.15, 4209.
11. Кришан А. Л., Римшин В. И., Астафьева М.А. Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика. М.: АСВ, 2020. 375 с.
12. Krishan A.L., Astafeva M.A., Chernyshova E.P. Numerical and Experimental Investigation of Axially Loaded Columns with Spiral Reinforcement // Materials Science Forum. 2023, no.1087, pp. 163–168.

References

1. Bhure N., Tiwari N. Steel Concrete Composite Construction - A Review. IJRASET. 2018;(6): 564-566.
2. Han L.H., Li W., Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete filled steel tubular (CFST) structures. Journal of Constructional Steel Research. 2014;(100):211-228.
3. Xu L.H., Lu Q.R., Chi Y., et al. Axial compressive performance of UHPC filled steel tube stub columns containing steel-polypropylene hybrid fiber. Construction and Building Materials. 2019;(204):754-767.
4. Belyy G.I., Vedemikova A.A. The inverse numerical-analytical method for studying the strength and stability of concrete-filled steel tube structural members. *Vestnik grazhdanskix inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2021; (2(85)):26-35. (In Russ.)
5. Khazov P.A., Pomazov A.P. Experimental study of longitudinal and transverse bending of pipe concrete rods. *Zhilishchnoe Stroitelstvo* [Housing Construction]. 2023;(12):66-71. (In Russ.)
6. Hossain K.M.A., Chu K. and Anwar M.S. Axial load behavior of ultrahigh strength concrete-filled steel tube columns of various geometric and reinforcement configurations. *Infrastructures*. 2021;(6): 6050066.
7. Huang Z., Li D., Uy B., Wang J. Behaviour and design of ultra- high- strength CFST members subjected to compression and bending. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;106351.
8. Le TT, Asteris P.G and Lemonis M.E. Prediction of axial load capacity of rectangular concrete-filled steel tube columns using machine learning techniques. *Engineering with Computers*. 2021;1-34.
9. Shaker F.M.F., Ghanem G.M., Deifalla A.F., Hussein I.S. and Fawzy, M.M. Influence of loading method and stiffening on the behavior of short and long CFST columns. *Steel Compos. Struct*. 2022;(44):281-293.
10. Zhang Q., Kamiński P., Deifalla A.F., et al. Compressive Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Employing Supervised Machine Learning Techniques. *Materials*. 2022;(15):4209.
11. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafieva M.A. *Szhatye trubobetonnnye elementy. Teoriya i praktika* [Compressed concrete filled steel elements. Theory and practice]. Moscow: ASV. 2020. 375 p. (In Russ.)
12. Krishan A.L., Astafeva M.A., Chernyshova E.P. Numerical and Experimental Investigation of Axially Loaded Columns with Spiral Reinforcement. *Materials Science Forum*. 2023;(1087):163-168.

Поступила 19.06.2025; принята к публикации 05.12.2025; опубликована 31.03.2026
Submitted 19/06/2025; revised 05/12/2025; published 31/03/2026

Кришан Анатолий Леонидович – доктор технических наук, профессор, советник РААСН,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: kris_al@mail.ru. ORCID 0000-0002-5851-152X

Астафьева Мария Анатольевна – кандидат технических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: skymanika@mail.ru. ORCID 0000-0003-1354-0324

Парфенов Вячеслав Викторович – директор,
ООО «Структура Эксперт», Екатеринбург, Россия.
Email: vvp@structura-expert.com.

Вавилин Никита Вячеславович – главный конструктор,
ООО «Структура Эксперт», Екатеринбург, Россия.
Email: vavilin@structura-expert.com.

Anatoly L. Krishan – DrSc (Eng.), Professor, Counsellor of the RAACS,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: kris_al@mail.ru. ORCID 0000-0002-5851-152X

Mariia A. Astafieva – PhD (Eng.),
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: skymanika@mail.ru. ORCID 0000-0003-1354-0324

Viacheslav V. Parfenov – Director,
LLC Structura Expert, Yekaterinburg, Russia.
Email: vvp@structura-expert.com.

Nikita V. Vavilin – Chief Designer,
LLC Structura Expert, Yekaterinburg, Russia.
Email: vavilin@structura-expert.com.