

## Прочность центрально сжатых трубобетонных элементов

Анатолий Леонидович Кришан<sup>1,3</sup>, Владимир Иванович Римшин<sup>2,3</sup>,  
Мария Анатольевна Астафьева<sup>1,3</sup>, Михаил Алексеевич Лихидько<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова);  
г. Магнитогорск, Россия;

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный  
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры  
и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Все более масштабное применение сжатых трубобетонных элементов (ТБЭ) в практике строительства требует развития методик расчета их прочности, учитывающих основные особенности их силового сопротивления. В действующих нормах проектирования ряда стран предлагаются эмпирические формулы, обеспечивающие хорошую точность расчета центрально сжатых трубобетонных конструкций, но неверно учитывающие распределение усилий между бетонным ядром и стальной трубой. Предложена методика, позволяющая достоверно оценивать напряженное состояние бетона и трубы.

**Материалы и методы.** Прочность коротких центрально сжатых ТБЭ можно определить с помощью метода предельных усилий. Точность расчетов по предложенной методике зависит от правильного установления коэффициентов материала. В настоящее время для трубобетонных колонн, как правило, применяют тяжелый бетон, который имеет плотную структуру. Для таких бетонов предлагается принимать значения, которые получены после обработки результатов опытов, проводившихся при объемном сжатии с постоянным по величине боковым давлением. С целью установления этих значений выполнен статистический анализ результатов 232 опытов с короткими центрально сжатыми ТБЭ из тяжелых бетонов средней и высокой прочности. Для каждого опыта подбирались значения коэффициентов, соответствующие наилучшему совпадению теоретических и экспериментальных разрушающих нагрузок.

**Результаты.** Методики действующих норм не позволяют учесть особенности бетонного ядра в сжатых ТБЭ бетонов различных видов. В предлагаемой методике данный вопрос решается за счет соответствующего подбора коэффициентов материала. При наличии достаточного объема экспериментов с ТБЭ из бетона конкретного вида найти значения соответствующих коэффициентов несложно.

**Выводы.** Разработанная методика расчета прочности коротких центрально сжатых ТБЭ учитывает основные особенности силового сопротивления трубобетонной конструкции и дает возможность определить распределение усилий между бетонным ядром и стальной трубой.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** центрально сжатый трубобетонный элемент, прочность, напряженное состояние, трехосное сжатие, боковое давление, силовое сопротивление, бетонное ядро

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А., Лихидько М.А. Прочность центрально сжатых трубобетонных элементов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1154–1164. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1154-1164

Автор, ответственный за переписку: Владимир Иванович Римшин, v.rimshin@niisf.ru.

## Strength of centrally compressed concrete tube elements

Anatoly L. Krishan<sup>1,3</sup>, Vladimir I. Rimshin<sup>2,3</sup>, Maria A. Astafieva<sup>1,3</sup>, Mikhail A. Likhidko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University; Magnitogorsk, Russian Federation;

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation;

<sup>3</sup> Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture  
and Building Sciences (NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The increasingly large-scale use of compressed concrete tube elements in construction practice requires the development of methods for calculating their strength, taking into account the main features of their force resistance. The current design standards of a number of countries offer empirical formulas that ensure good accuracy in calculating axially compressed concrete pipe structures, but incorrectly take into account the distribution of forces between the concrete core and the steel pipe. This paper proposes a method that allows for a reliable assessment of the stress state of concrete and pipe.

**Materials and methods.** The strength of short centrally compressed CTE can be determined using the method of limiting forces. The accuracy of calculations according to the proposed method depends on the correct determination of the coef-

ficients of the material. Currently, heavy concrete, which has a dense structure, is usually used for pipe-concrete columns. For such concretes, it is proposed to take the values that are obtained after processing the results of experiments conducted under volumetric compression with a constant lateral pressure. To establish these values, a statistical analysis of the results of 232 experiments with short centrally compressed CTE made of heavy concretes of medium and high strength was performed. For each experiment, coefficient values were selected corresponding to the best match between theoretical and experimental destructive loads.

**Results.** The methodology of the current standards does not allow to take into account the features of the concrete core in compressed CTE concretes of various types. In the proposed methodology, this issue is solved by appropriate selection of material coefficients. If there is a sufficient amount of experimentation with concrete CTE of a specific type, it is not difficult to find the values of the corresponding coefficients.

**Conclusions.** The developed method for calculating the strength of short centrally compressed solid waste takes into account the main features of the force resistance of a tube-concrete structure and allows us to determine the distribution of forces between the concrete core and the steel pipe.

**KEYWORDS:** axially compressed concrete tube element, compressive strength, stress state, volumetric compression, lateral pressure, force resistance, concrete core

**FOR CITATION:** Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafieva M.A., Likhidko M.A. Strength of centrally compressed concrete tube elements. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1154-1164. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1154-1164 (rus.).

Corresponding author: Vladimir I. Rimshin, v.rimshin@niisf.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в мировой практике строительства высотных зданий и большепролетных арочных мостов трубобетонные элементы (ТБЭ) занимают достойное место. Этому способствует ряд положительных качеств таких конструкций [1].

Расчет прочности даже коротких центрально сжатых ТБЭ является непростой задачей, так как он предполагает необходимость учета объемного напряженного состояния бетонного ядра и стальной трубы. По этой причине в действующих нормативных документах различных стран для определения прочности центрально сжатых ТБЭ предложены эмпирические

формулы, полученные на основании анализа опытных данных. В табл. 1 приведены такие формулы, предлагаемые нормами РФ и наиболее часто используемые на практике нормами других стран.

Эти формулы имеют ограниченное применение, поскольку получены применительно к тяжелому бетону. Они непригодны для других видов бетона и не могут учитывать возможные усовершенствования конструкции, например дополнительное косвенное армирование бетона [2]. При этом механические характеристики объемно сжатого бетона и осевые напряжения в стальной трубе рассчитываются вне прямой зависимости от величины боко-

Табл. 1. Формулы норм для расчета прочности центрально сжатых ТБЭ

Table 1. Formulas of norms for calculating the strength of centrally compressed CTE

| Номер нормативного документа<br>Number of the regulatory document | Основные формулы<br>Basic formulas   |
|---|--|
| СП 266.1325800.2016 (Россия)<br>CP 266.1325800.2016 (Russia)      | $N_u = R_{bp} A_b + R_{pc} A_p;$ $R_{bp} = R_b + \Delta R_b \left( 1 - \frac{7,5e}{d-2t} \right);$ $\Delta R_b = R_b \left( 2 + 2,52 \cdot e^{-\frac{1}{c}(R_s A_p + R_b A_b)} \right) \times$ $\times \frac{t}{d-2t} \cdot \frac{R_p}{R_b};$ $R_{pc} = R_p - \frac{1}{4} R_p \left( 1 - \frac{7,5e_o}{d-2t} \right),$ <p>где <math>c = 25</math> МН при измерении величин в МПа и м<br/>where <math>s = 25</math> MN when measuring values in MPa and m</p> |
| EN 1994-1-1 (евронормы)<br>(Euronorm)                             | $N_u = A_b R_b \left( 1 + \frac{\eta_b t R_p}{d R_b} \right) +$ $+ \eta_p A_p R_p;$ $\eta_b = \eta_{bo} = 4,9 - 16,5\lambda + 17\lambda^2 \geq 0;$ $\eta_p = \eta_{po} = 0,25(3 + 2\lambda) \leq 1;$ $\lambda = \sqrt{\frac{N_u}{N_{cr}}}; N_{cr} = \frac{\pi^2}{l^2} (E_s I_s + 0,6 E_b I_b)$   |

| Номер нормативного документа<br>Number of the regulatory document | Основные формулы<br>Basic formulas  |
|---|---|
| GB 50936–2014<br>(КНР) / (China)                                  | $N_u = (1,212 + B\rho + C\rho^2)R_b A;$ $\rho = \frac{R_p A_p}{R_b A_b};$ $B = \frac{0,1759R_p}{235} + 0,794;$ $C = -\frac{0,1038R_b}{20} + 0,0309$ |
| AISC 360–16<br>(США) / (USA)                                      | $N_u = 0,95R_b A_b + R_p A_p$   |
| АИ-1997<br>(Япония) / (Japan)                                     | $N_u = N_b + (1 + 0,27)N_p;$ $N_b = R_b A_b;$ $N_p = R_p A_p$   |

вого давления, что не соответствует фактическому характеру силового сопротивления конструкции.

В настоящей работе рассмотрена методика расчета, основанная на современных знаниях механики твердого тела и учитывающая ключевые особенности напряженного состояния бетонного ядра и стальной трубы в предельном состоянии коротко-центрально сжатого ТБЭ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Прочность коротких центрально сжатых ТБЭ можно определить с помощью метода предельных усилий. Предельную величину продольного усилия рассчитывают по формуле:

$$N = R_{b3} A + \sigma_{pz} A_p, \quad (1)$$

где  $R_{b3}$  — прочность бетонного ядра при объемном сжатии;  $A$  и  $A_p$  — площади поперечных сечений бетонного ядра и стальной трубы;  $\sigma_{pz}$  — сжимающее напряжение осевого направления в стальной трубе.

Для нахождения  $R_{b3}$  при равномерном боковом обжатии давлением  $\sigma_{br}$  в предельном состоянии ТБЭ обычно используется условие прочности, имеющее вид:

$$R_{b3} = R_b + k\sigma_{br}, \quad (2)$$

где  $R_b$  — прочность бетона при одноосном сжатии;  $k$  — коэффициент бокового давления.

Величину коэффициента бокового давления долго принимали постоянной и равной 4,1. Зависимость (2) положена в основу ряда и ныне действующих норм, например EN 1994-1-1.

В работе [3] отмечается, что значение коэффициента бокового давления не должно быть постоянным. По результатам статистической обработки опытных данных была предложена следующая формула:

$$R_{b3} = R_b \left( -1,254 + 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94\sigma_{br}}{R_b}} - 2 \frac{\sigma_{br}}{R_b} \right). \quad (3)$$

Однако практическое применение формулы (3) нередко приводило к большим погрешностям в расчетах, что, например, показано в исследовании [4].

Важно отметить, что по формулам (2) и (3) невозможно напрямую вычислять прочность бетонного ядра ТБЭ, поскольку достоверная величина бокового давления  $\sigma_{br}$  неизвестна. Результаты опытов со сжатыми ТБЭ [5] показывают, что перед разрушением бетонного ядра обычной прочности боковое давление  $\sigma_{br}$  может находиться в достаточно широком интервале и нередко достигает 10–15 МПа и выше. Коэффициент бокового давления при этом в интервале  $k = 2,5–7$ . Следовательно, даже незначительные неточности в определении  $k$  и  $\sigma_{br}$  могут привести к существенным ошибкам в расчетах.

В публикациях имеются предложения по учету бокового давления. Например, в труде [3] для расчета трубобетонных колонн предложено упрощенно принимать  $\sigma_{br} = 0,1 \cdot \sigma_{yp}$ , где  $\sigma_{yp}$  — предел текучести стали трубы. Однако это предложение неверно, так как на боковое давление оказывают значительное влияние не только  $\sigma_{yp}$ , но также диаметр и толщина трубы, вид и прочность используемого бетона. Боковое давление рассчитывается в зависимости от отношения  $d/t$  и  $\sigma_{yp}$  по эмпирическим формулам [6]. Но при этом не учитывается прочность исходного бетона. Проведенный авторами настоящего исследования анализ показал, что по рекомендациям [3]  $\sigma_{br}$  получается заметно завышенным, а по формулам [6] — заниженным.

В работах [7, 8] теоретически показано, что фиксированное значение  $k$  является ошибочным. Это значение должно зависеть от уровня бокового обжатия  $m = \sigma_{br}/R_{b3}$  и вида бетона. Для условий трехосного равномерного бокового обжатия можно использовать следующую формулу:

$$k = \frac{1 - a - am}{b + (f - b)m}, \quad (4)$$

где  $a, b$  — коэффициенты материала, устанавливаемые на основании опытов;  $f$  — параметр, который для плотных бетонов равен 1.

Значение коэффициента бокового давления, по-видимому, отражает различные механизмы разрушения объемно сжатого бетона. Анализ [9] показывает, что при  $m \rightarrow 1$  коэффициент  $k \rightarrow 1$ . Тогда, в соответствии с законом Кулона, при высоких уровнях бокового обжатия разрушение бетона будет иметь сдвиговой характер. Согласно опытам, разрушение от сдвига наблюдается при  $k < 3$ . При более высоких  $k$  следует ожидать комбинации отрыва и сдвига бетона, что чаще всего и наблюдается при разрушении центрально сжатых ТБЭ. Таким образом, более теоретически обоснованное определение  $k$  и  $\sigma_{br}$  способствует не только повышению точности расчета прочности, но и правильной оценке характера силового сопротивления и разрушения конструкции. Это подтверждает необходимость принятия адекватных теоретических подходов к расчету прочности объемно сжатого бетона.

Таким образом, именно боковое давление определяет прирост прочности бетона за счет создания для него условий объемного сжатия. Поэтому первоочередной является задача нахождения бокового давления  $\sigma_{br}$  в предельном состоянии ТБЭ. При увеличении бокового давления прочность бетонного ядра возрастает, но сжимающее напряжение осевого направления в стальной трубе снижается. Искомое значение  $\sigma_{br}$  может быть найдено из решения задачи установления максимального сжимающего усилия, вычисляемого по формуле (1). Для этого выразим через боковое давление  $R_{b3}$  и  $\sigma_{pz}$ .

Зависимость  $R_{b3} = f(\sigma_{br})$  можно получить из совместного решения уравнений (2) и (4) при условии  $a = 0,5b$ . Соответствующая формула записывается в следующем виде:

$$R_{b3} = R_b \left[ 1 + \left( 0,25\bar{\sigma} + \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} + \sqrt{\left( \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} \right)^2 + \frac{\bar{\sigma}}{b}} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\bar{\sigma}$  — относительная величина бокового давления со стороны стальной оболочки на бетонное ядро в предельном состоянии  $\bar{\sigma} = \sigma_{br}/R_b$ .

Стальная труба уже при относительно небольших осевых деформациях, как правило, в пределах  $\varepsilon_{pz} = (0,85 \div 0,95) \cdot \sigma_{yp}/E_p$  ( $E_p$  — модуль упругости стали) находится в состоянии текучести. Напряженное состояние трубы к моменту разрушения ТБЭ можно определять из условия текучести Генки – Мизеса, из которого напряжение осевого направления в трубе  $\sigma_{pz}$  вычисляется по формуле:

$$\sigma_{pz} = \sqrt{\sigma_{y,p}^2 - 0,75\sigma_{pt}^2} - 0,5\sigma_{pt}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{pt}$  — напряжение окружного направления в стальной трубе в предельном состоянии.

Заметим, что формула (6) справедлива для тонкостенных труб (при  $d/\delta \geq 40$ , где  $d$  и  $\delta$  — диаметр и толщина стенки трубы). Именно такие трубы в основном

применяются в качестве стальных оболочек для сжатых ТБЭ. Поэтому в данной работе ограничимся этим решением. Для толстостенных труб вывод аналогичной формулы приведен в исследовании [5].

Осредненные по толщине окружные напряжения в стенке трубы можно с достаточной для практических расчетов точностью выразить через боковое давление с помощью зависимости:

$$\sigma_{pt} = -2\sigma_{br} \frac{A}{A_p}. \quad (7)$$

Формулу (6) с учетом зависимости (7) можно представить в следующем виде:

$$\sigma_{pz} = R_b \left( \sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2} - \bar{\sigma} \right) \frac{A}{A_p}, \quad (8)$$

где  $\rho$  — конструктивный коэффициент трубобетона, вычисляемый по формуле:

$$\rho = \frac{\sigma_{y,p} A_p}{R_b A}. \quad (9)$$

С учетом полученных формул (5) и (8) уравнение для определения прочности короткого центрально сжатого ТБЭ можно записать в следующем виде:

$$N = R_b A \left[ 1 + \left( \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} + \sqrt{\left( \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} \right)^2 + \frac{\bar{\sigma}}{b}} - \frac{3\bar{\sigma}}{4} + \sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2} \right) \right]. \quad (10)$$

Очевидно, что при фиксированных значениях геометрических и конструктивных параметров ТБЭ ( $R_b, \sigma_y, A, A_p, b$ ) продольная сила, воспринимаемая бетонным ядром и стальной трубой, зависит только от относительного бокового давления  $\bar{\sigma}$ . Максимальному значению продольной силы соответствует условие:

$$\frac{dN}{d\bar{\sigma}} = 0. \quad (11)$$

После определения производной выражения (10) приходим к следующему уравнению:

$$\left( \frac{b(\bar{\sigma} - 2) + 8}{\sqrt{b} \sqrt{b(\bar{\sigma} - 2)^2 + 16\bar{\sigma}}} - \frac{12\bar{\sigma}}{\sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2}} - 1 \right) = 0. \quad (12)$$

Решение уравнения (12) приводит к формуле для нахождения бокового давления стальной оболочки на бетонное ядро в предельном состоянии:

$$\sigma_{br} \cong 0,49 e^{-(a+b)} \rho^{0,8} R_b. \quad (13)$$

При известном боковом давлении можно вычислить  $R_{b3}$ ,  $\sigma_{pz}$  и прочность ТБЭ.

Точность расчетов по предложенной методике зависит от правильного установления коэффициен-

тов материала  $a$  и  $b$ . В настоящее время для трубобетонных колонн, как правило, применяют тяжелый бетон, который имеет плотную структуру. Для таких бетонов в работе [9] предлагается принимать значения  $b = 0,096$  и  $a = 0,5b$ . Эти значения получены после обработки результатов опытов, проводившихся при объемном сжатии с постоянным по величине боковым давлением  $\sigma_{br}$ . Однако в центрально сжатых ТБЭ боковое давление зависит от уровня загрузки. При небольших нагрузках оно близко к нулю и достигает максимума только ближе к моменту потери прочности конструкцией. Такой характер загрузки приводит к меньшему росту прочности исходного бетона. Следовательно, значения коэффициентов  $a$  и  $b$  для тяжелого бетона в ТБЭ будут другими.

Для установления этих значений выполнен статистический анализ результатов 232 опытов с короткими центрально сжатыми ТБЭ из тяжелых бетонов средней и высокой прочности [5].

Учитывались только те опыты, в которых за прочность образцов принималась максимальная нагрузка, которую они выдерживали. Для каждого опыта подбирались значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , соответствующие наилучшему совпадению теоретических и экспериментальных разрушающих нагрузок. В результате установлены их медианные значения, которые составили  $b = 0,25$  и  $a = 0,125$ .

### Проверка точности предложенной методики расчета

Полученные значения коэффициентов материала первоначально были использованы для определения теоретических разрушающих нагрузок для всех 232 испытанных образцов. Результаты оценки соответствия теоретической прочности  $N_i^{th}$  экспериментальным данным  $N_u^{exp}$  приведены в табл. 2.

Нижний индекс теоретической прочности соответствует порядковому номеру методики в табл. 1. Результат расчета по предлагаемой методике обозначен.

Данные табл. 2 показывают, что из анализируемых нормативных документов наиболее близкие к опытам значения прочности позволяет получить методика евроном. Расчеты по методикам РФ и Япо-

нии в среднем приводят к запасам 5 %, что тоже неплохо. Однако результаты расчетов по предлагаемой методике свидетельствуют о более высокой ее точности, особенно по показателю среднего значения. Стандартное отклонение величиной 10 % следует считать вполне удовлетворительным. В проведенном анализе использованы результаты опытов не менее 39 исследователей. Разная квалификация исследователей, стабильность свойств применяемых материалов, качество изготовления и подготовки образцов, точность соблюдения методики испытаний не могли не сказаться на разбросе.

Дополнительную проверку расчетные методики прошли по результатам сопоставления теоретических значений с опытными разрушающими нагрузками, полученными в диссертационных работах А.П. Нестеровича, С.В. Коврыги и В.Л. Шаброва, которые были выполнены под руководством И.Г. Людковского [10]. Все эксперименты тщательно готовились и осуществлялись в Научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом институте бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева, который в конце прошлого века являлся одним из всемирно признанных исследовательских центров бетонных и железобетонных конструкций. Особая ценность этих опытных данных состоит в том, что они получены для образцов ТБЭ с диаметрами поперечного сечения от 530 до 1020 мм. Именно такие сечения часто имеют трубобетонные колонны многоэтажных и высотных зданий.

Выполненная проверка показала, что первоначально полученные значения коэффициентов  $b = 0,25$  и  $a = 0,125$  при обработке 23 результатов опытов привели к среднему значению 0,97 при стандартном отклонении 0,029. Так как эти эксперименты приняты за эталонные, по результатам сопоставления с ними были получены уточненные значения коэффициентов материала для тяжелого бетона  $b = 0,288$  и  $a = 0,144$ . Проверка применимости уточненных значений  $b$  и  $a$  для расчета прочности приведена в табл. 3.

Для сравнения здесь же приведены результаты оценки соответствия опытных разрушающих нагрузок теоретическим значениям, рассчитанным по методикам указанных в табл. 1 норм.

Табл. 2. Сопоставление опытной и теоретической прочностей ТБЭ

Table 2. Comparison of experimental and theoretical CTE strengths

| Итоговый статистический показатель<br>The final statistical indicator | $\frac{N_u^{exp}}{N_1^{th}}$ | $\frac{N_u^{exp}}{N_2^{th}}$ | $\frac{N_u^{exp}}{N_3^{th}}$ | $\frac{N_u^{exp}}{N_4^{th}}$ | $\frac{N_u^{exp}}{N_5^{th}}$ | $\frac{N_u^{exp}}{N_6^{th}}$ |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Среднее значение<br>Average value                                     | 1,05                         | 0,99                         | 1,05                         | 1,21                         | 1,05                         | 1,00                         |
| Стандартное отклонение<br>Standard deviation                          | 0,12                         | 0,09                         | 0,18                         | 0,12                         | 0,09                         | 0,10                         |

Табл. 3. Сопоставление опытной и теоретической прочностей ТБЭ больших диаметров

Table 3. Comparison of experimental and theoretical strengths of large diameter TBE

| $d$ ,<br>мм<br>mm                           | $\delta$ ,<br>мм<br>mm | $\sigma_{y,p}$ ,<br>МПа<br>MPa | $R_b$ ,<br>МПа<br>MPa | $N_u^{exp}$ ,<br>кН<br>kN | $\frac{N_u^{exp}}{N_1^{th}}$ | $\frac{N_u^{exp}}{N_2^{th}}$ | $\frac{N_u^{exp}}{N_3^{th}}$ | $\frac{N_u^{exp}}{N_4^{th}}$ | $\frac{N_u^{exp}}{N_5^{th}}$ | $\frac{N_u^{exp}}{N_6^{th}}$ |
|---|------------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 530,0                                       | 7,80                   | 349,2                          | 34,5                  | 14 000                    | 1,00                         | 0,97                         | 1,02                         | 1,12                         | 1,03                         | 1,02                         |
| 530,0                                       | 11,85                  | 322,6                          | 34,5                  | 16 000                    | 0,98                         | 0,95                         | 1,04                         | 1,18                         | 1,03                         | 1,02                         |
| 630,0                                       | 6,60                   | 303,0                          | 28,4                  | 13 700                    | 1,00                         | 0,97                         | 1,01                         | 1,10                         | 1,02                         | 1,00                         |
| 630,0                                       | 7,00                   | 225,0                          | 40,0                  | 16 200                    | 1,05                         | 0,98                         | 0,98                         | 1,08                         | 1,02                         | 1,03                         |
| 630,0                                       | 7,00                   | 291,4                          | 40,0                  | 16 690                    | 0,99                         | 0,94                         | 0,95                         | 1,05                         | 0,98                         | 0,98                         |
| 630,0                                       | 7,61                   | 349,5                          | 35,0                  | 18 000                    | 0,99                         | 0,94                         | 0,97                         | 1,11                         | 0,99                         | 0,98                         |
| 630,0                                       | 7,61                   | 349,5                          | 41,5                  | 21 000                    | 1,05                         | 0,94                         | 1,00                         | 1,15                         | 1,04                         | 1,03                         |
| 630,0                                       | 7,90                   | 300,0                          | 36,0                  | 17 200                    | 0,97                         | 0,92                         | 0,94                         | 1,08                         | 0,97                         | 0,96                         |
| 630,0                                       | 7,90                   | 300,0                          | 72,0                  | 28 700                    | 1,03                         | 0,98                         | 0,90                         | 1,08                         | 0,99                         | 0,99                         |
| 630,0                                       | 8,44                   | 350,0                          | 34,5                  | 18 600                    | 0,99                         | 0,94                         | 0,98                         | 1,13                         | 1,00                         | 0,99                         |
| 630,0                                       | 8,44                   | 515,0                          | 34,5                  | 21 000                    | 0,93                         | 0,90                         | 0,93                         | 1,09                         | 0,95                         | 0,94                         |
| 630,0                                       | 9,8                    | 311,0                          | 34,9                  | 19 000                    | 0,99                         | 0,95                         | 0,99                         | 1,14                         | 1,01                         | 1,00                         |
| 630,0                                       | 10,2                   | 308,0                          | 39,4                  | 21 090                    | 1,03                         | 0,97                         | 1,01                         | 1,16                         | 1,03                         | 1,02                         |
| 630,0                                       | 10,21                  | 323,3                          | 39,4                  | 20 500                    | 1,00                         | 0,95                         | 0,98                         | 1,12                         | 1,00                         | 0,99                         |
| 630,0                                       | 11,60                  | 347,2                          | 46,0                  | 24 400                    | 0,99                         | 0,94                         | 0,97                         | 1,12                         | 0,99                         | 0,98                         |
| 720,0                                       | 7,70                   | 395,4                          | 28,3                  | 21 000                    | 0,99                         | 0,94                         | 0,99                         | 1,14                         | 1,00                         | 1,00                         |
| 720,0                                       | 7,93                   | 388,4                          | 34,0                  | 25 500                    | 1,09                         | 1,03                         | 1,06                         | 1,22                         | 1,09                         | 1,08                         |
| 720,0                                       | 8,30                   | 312,0                          | 15,9                  | 15 000                    | 0,98                         | 0,96                         | 1,09                         | 1,22                         | 1,05                         | 1,05                         |
| 720,0                                       | 9,55                   | 315,6                          | 28,3                  | 20 600                    | 0,98                         | 0,93                         | 0,99                         | 1,13                         | 1,00                         | 0,99                         |
| 720,0                                       | 11,7                   | 274,0                          | 28,3                  | 21 000                    | 0,98                         | 0,93                         | 0,99                         | 1,14                         | 1,00                         | 0,99                         |
| 820,0                                       | 8,93                   | 331,0                          | 45,0                  | 33 600                    | 1,01                         | 0,93                         | 0,92                         | 1,07                         | 0,97                         | 0,97                         |
| 1020,0                                      | 9,64                   | 366,0                          | 16,9                  | 30 000                    | 1,02                         | 0,95                         | 1,05                         | 1,19                         | 1,04                         | 1,03                         |
| 1020,0                                      | 13,25                  | 368,7                          | 28,9                  | 44 000                    | 1,02                         | 0,92                         | 0,98                         | 1,12                         | 0,99                         | 0,98                         |
| Максимум / Maximum                          |                        |                                |                       |                           | 1,09                         | 1,03                         | 1,09                         | 1,22                         | 1,09                         | 1,08                         |
| Минимум / Minimum                           |                        |                                |                       |                           | 0,93                         | 0,89                         | 0,92                         | 1,05                         | 0,96                         | 0,94                         |
| Среднее значение / Average value            |                        |                                |                       |                           | 1,002                        | 0,950                        | 0,989                        | 1,130                        | 1,012                        | 1,000                        |
| Стандартное отклонение / Standard deviation |                        |                                |                       |                           | 0,033                        | 0,030                        | 0,044                        | 0,045                        | 0,031                        | 0,030                        |

Примечание: в расчетах по нормам Европы, США и Японии вместо призменной прочности бетона  $R_b$  использовалась цилиндрическая прочность.

Note: in calculations according to European, US and Japanese standards, cylindrical strength was used instead of prismatic strength of concrete.

Анализ полученных в табл. 3 данных свидетельствует о том, что проверенные методики действующих норм (за исключением норм США) позволяют с достаточной для практики точностью рассчитывать прочность центрально сжатых ТБЭ. По показателям среднего значения и стандартного отклонения наиболее точными оказались формулы EN 1994-1-1. При этом предлагаемая авторами методика показала наилучшие результаты выполненного сопоставления.

Использование коэффициентов  $b = 0,288$  и  $a = 0,144$  для расчетов по предлагаемой методике ранее упомянутых 232 испытанных образцов привело к следующим статистическим результатам:

- среднее значение — 1,04;
- стандартное отклонение — 0,10.

Полученные результаты говорят о небольшом запасе фактической прочности при применении среднего значения. Стандартное отклонение оста-

лось неизменным. Таким образом, уточненные значения коэффициентов материала можно рекомендовать для использования в практических расчетах сжатых ТБЭ.

В табл. 4 приведены результаты аналогичного сопоставления теории с экспериментальной прочностью ТБЭ, изготовленных из ультравысококачественных бетонов (УНРС), имеющих гарантированное сопротивление осевому сжатию более 100 МПа. Данные для этого сопоставления взяты из работ [4, 6, 11].

Анализ табл. 4 показывает, что точность вычисления прочности ТБЭ, изготовленных из УНРС, по всем нормативным документам оказалась хуже. При этом методика АИЖ-1997 все равно показала удовлетворительное совпадение с экспериментами. Предлагаемая методика (причем при тех же значениях коэффициентов материала) и для такого бетона обеспечила очень хорошую точность расчетов.

Табл. 4. Сопоставление опытной и теоретической прочностей ТБЭ из УНРС

Table 4. Comparison of experimental and theoretical strengths of TBE made of UHPC

| $d$ ,<br>мм<br>mm                           | $\delta$ ,<br>мм<br>mm | $\sigma_{\text{ср}}$ ,<br>МПа<br>MPa | $f_c$ ,<br>МПа<br>MPa | $N_u^{\text{exp}}$ ,<br>кН<br>kN | $\frac{N_u^{\text{exp}}}{N_1^{\text{th}}}$ | $\frac{N_u^{\text{exp}}}{N_2^{\text{th}}}$ | $\frac{N_u^{\text{exp}}}{N_3^{\text{th}}}$ | $\frac{N_u^{\text{exp}}}{N_4^{\text{th}}}$ | $\frac{N_u^{\text{exp}}}{N_5^{\text{th}}}$ | $\frac{N_u^{\text{exp}}}{N_6^{\text{th}}}$ |
|---|------------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| 114,3                                       | 3,6                    | 403                                  | 173,5                 | 2422                             | 1,15                                       | 1,06                                       | 0,96                                       | 1,22                                       | 1,10                                       | 1,08                                       |
| 114,3                                       | 3,6                    | 403                                  | 173,5                 | 2430                             | 1,11                                       | 1,02                                       | 0,93                                       | 1,18                                       | 1,06                                       | 1,04                                       |
| 114,3                                       | 3,6                    | 403                                  | 184,2                 | 2497                             | 1,13                                       | 1,05                                       | 0,94                                       | 1,20                                       | 1,09                                       | 1,06                                       |
| 114,3                                       | 3,6                    | 403                                  | 184,2                 | 2314                             | 1,05                                       | 0,97                                       | 0,88                                       | 1,11                                       | 1,01                                       | 0,99                                       |
| 114,3                                       | 6,3                    | 428                                  | 173,5                 | 2610                             | 1,07                                       | 0,96                                       | 0,97                                       | 1,16                                       | 1,02                                       | 1,00                                       |
| 114,3                                       | 6,3                    | 428                                  | 173,5                 | 2633                             | 1,08                                       | 0,97                                       | 0,98                                       | 1,17                                       | 1,02                                       | 1,02                                       |
| 219,1                                       | 5,0                    | 380                                  | 185,1                 | 7837                             | 0,99                                       | 0,96                                       | 0,84                                       | 1,07                                       | 0,98                                       | 0,96                                       |
| 219,1                                       | 5,0                    | 380                                  | 193,3                 | 8664                             | 1,06                                       | 1,03                                       | 0,90                                       | 1,14                                       | 1,05                                       | 1,03                                       |
| 219,1                                       | 10,0                   | 381                                  | 185,1                 | 9085                             | 1,01                                       | 0,97                                       | 0,90                                       | 1,14                                       | 1,02                                       | 1,00                                       |
| 219,1                                       | 10,0                   | 381                                  | 193,3                 | 9187                             | 0,99                                       | 0,96                                       | 0,88                                       | 1,12                                       | 1,00                                       | 0,98                                       |
| 219,1                                       | 6,3                    | 300                                  | 163,0                 | 6915                             | 0,99                                       | 0,95                                       | 0,84                                       | 1,07                                       | 0,98                                       | 0,96                                       |
| 219,1                                       | 6,3                    | 300                                  | 175,4                 | 7407                             | 1,00                                       | 0,96                                       | 0,84                                       | 1,08                                       | 0,99                                       | 0,97                                       |
| 219,1                                       | 6,3                    | 300                                  | 148,8                 | 6838                             | 1,04                                       | 1,00                                       | 0,90                                       | 1,14                                       | 1,04                                       | 1,02                                       |
| 219,1                                       | 6,3                    | 300                                  | 174,5                 | 7569                             | 1,03                                       | 0,99                                       | 0,86                                       | 1,11                                       | 1,02                                       | 0,99                                       |
| 114,3                                       | 4,8                    | 333                                  | 127,0                 | 1681                             | 1,01                                       | 1,54                                       | 1,18                                       | 1,06                                       | 0,94                                       | 1,02                                       |
| 114,3                                       | 4,8                    | 333                                  | 127,0                 | 1573                             | 0,95                                       | 1,44                                       | 1,11                                       | 0,99                                       | 0,88                                       | 1,00                                       |
| Максимум / Maximum                          |                        |                                      |                       |                                  | 1,15                                       | 1,54                                       | 1,18                                       | 1,22                                       | 1,10                                       | 1,08                                       |
| Минимум / Minimum                           |                        |                                      |                       |                                  | 0,99                                       | 0,95                                       | 0,84                                       | 0,99                                       | 0,88                                       | 0,96                                       |
| Среднее значение / Average value            |                        |                                      |                       |                                  | 1,08                                       | 1,08                                       | 0,97                                       | 1,14                                       | 1,01                                       | 1,004                                      |
| Стандартное отклонение / Standard deviation |                        |                                      |                       |                                  | 0,065                                      | 0,165                                      | 0,084                                      | 0,045                                      | 0,054                                      | 0,032                                      |

Примечание: в расчетах по нормам РФ, КНР и предложенной методике вместо цилиндрической прочности бетона использовалась призмная прочность.

Note: in the calculations according to the norms of the Russian Federation, PRC and the proposed methodology, the prism strength was used instead of the cylindrical strength of concrete.

Здесь следует заметить, что количество проведенных экспериментов для ТБЭ с УНРС пока недостаточно, чтобы на основании полученных результатов давать окончательные предложения для практических расчетов. Но хорошее соответствие теоретических значений прочности опытным данным практически по всем исследованным образцам позволяет сделать заключение о возможности успешного использования предложенной методики и в этом случае.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первый взгляд представленные в табл. 2, 3 результаты сопоставления свидетельствуют о применимости для практических расчетов методик всех анализируемых нормативных документов, кроме норм AISC 360-16. Но более глубокий анализ приводит к другому выводу.

В методиках действующих норм при расчете прочности ТБЭ непосредственно не учитывается боковое давление бетона в предельном состоянии. Выше показано, что боковое давление бетона оказывает существенное влияние на прочность бетона в условиях его объемного сжатия и напряжения осевого направления в стальной трубе. С использованием статистической обработки формулы для расчета прочности в анализируемых методиках подобраны

таким образом, что усилия в бетоне и трубе дают сумму, которая хорошо соответствует фактической прочности ТБЭ. Однако особенность ТБЭ заключается в том, что если в расчетах снизить одно из усилий (в бетоне или стальной трубе), то автоматически будет завышено другое усилие (в трубе или бетоне). В результате сумма усилий меняется незначительно.

Для подтверждения этого предположения для данных табл. 3 были отдельно определены предельные усилия в бетоне и стальной трубе по предлагаемой авторами методике, а также методикам EN 1994-1-1 и СП 266.1325800. Сопоставление полученных результатов показало, что методика EN 1994-1-1 завышает усилие в стальной трубе в среднем в 1,9 раза, а методика СП 266.1325800 — в 1,8 раза.

Указанное обстоятельство свидетельствует о неправильном распределении сжимающего усилия между бетоном и трубой. Это приводит как минимум к двум негативным последствиям:

- невозможности использовать данные расчетов центрально сжатых элементов для разработки достоверной методики оценки напряженно-деформированного состояния и несущей способности вневцентренно сжатых ТБЭ;
- неправильной оценке напряженного состояния стали и бетона трубобетонных колонн в зоне

их стыков с междуэтажными перекрытиями или покрытиями.

Вопросы расчета внецентренно сжатых элементов требуют отдельного подробного анализа, который планируется к рассмотрению в будущих исследованиях [12–20].

Второе негативное последствие непосредственно касается центрально сжатых колонн. Усилия на такие колонны от перекрытий могут передаваться по трем вариантам: через стальную трубу, бетонное ядро, с частичным вовлечением в работу и трубы, и бетона. Во всех случаях адекватная оценка напряженного состояния колонны в зоне стыка возможна при достоверном знании усилий в трубе и бетоне.

Также следует отметить, что в последние годы проявляется интерес к исследованиям эффективности применения в сжатых ТБЭ бетонов различных видов. Например, в работе [4] изучается поведение таких конструкций с шестью различными видами бетона. Количество исследуемых образцов пока мало, чтобы делать какие-либо обоснованные выводы. Но неприемлемость нормативных методик для всех шести видов

бетонов очевидна. При этом известно [9], что по сравнению с тяжелыми бетонами легкие и мелкозернистые бетоны хуже сопротивляются объемному сжатию. Методики действующих норм не позволяют учесть такие особенности бетонного ядра. В предлагаемой методике данный вопрос решается за счет соответствующего подбора коэффициентов материала. При наличии достаточного объема экспериментов с ТБЭ из бетона конкретного вида найти значения соответствующих коэффициентов несложно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика расчета прочности коротких центрально сжатых ТБЭ, основанная на известных зависимостях механики твердого тела. Методика учитывает ключевые особенности силового сопротивления трубобетонной конструкции и позволяет определить распределение усилий между бетонным ядром и стальной трубой. Подобраны коэффициенты материала для тяжелого бетона различной прочности, обеспечивающие хорошее совпадение теоретических и экспериментальных разрушающих нагрузок.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ahmed M., Liang Q.Q., Patel V.I., Hadi M.N.S.* Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns // *Thin-Walled Structures*. 2019. Vol. 138. Pp. 105–116. DOI: 10.1016/j.tws.2019.02.001
2. *Krishan A.L., Astafeva M.A., Chernyshova E.P.* Numerical and Experimental Investigation of Axially Loaded Columns with Spiral Reinforcement // *Materials Science Forum*. 2023. Vol. 1087. Pp. 163–168. DOI: 10.4028/p-7841oa
3. *Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R.* Theoretical stress-strain model for confined concrete // *Journal of Structural Engineering*. 1988. Vol. 114. Issue 8. Pp. 1804–1826. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1988)-114:8(1804)
4. *Hossain K.M.A., Chu K.* Confinement of six different concretes in CFST columns having different shapes and slenderness // *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2019. Vol. 11. Issue 2. Pp. 255–270. DOI: 10.1007/s40091-019-0228-2
5. *Кришан А.Л., Румшин В.И., Астафьева М.А.* Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика. М. : Издательство АСВ, 2020. 322 с. EDN ROLLKN.
6. *Patel V.I., Hassanein M.F., Thai H.T., Al Abadi H., Elchalakani M., Bai Y.* Ultra-high strength circular short CFST columns: Axisymmetric analysis, behaviour and design // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 179. Pp. 268–283. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.081
7. *Карпенко Н.И.* Об одной характерной функции прочности бетонов при трехосном сжатии // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1982. № 2. С. 33–36.
8. *Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Моисеенко Г.А.* Критерий прочности бетона при объемном напряженном состоянии и действии повышенных температур // *Academia. Архитектура и строительство*. 2024. № 4. С. 117–123. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-4-117-123. EDN WGFKEZ.
9. *Карпенко Н.И.* Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 416 с.
10. *Людковский И.Г., Фонов В.М., Макаричева Н.В.* Исследование сжатых трубобетонных элементов, армированных высокопрочной продольной арматурой // *Бетон и железобетон*. 1980. № 5. С. 17–19.
11. *Xu L., Lu Q., Chi Y., Yang Y., Yu M., Yan Y.* Axial compressive performance of UHPC filled steel tube stub columns containing steel-polypropylene hybrid fiber // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 204. Pp. 754–767. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.202
12. *Rimshin V., Ketsko E.* Justification of Strengthening of Reinforced Concrete Structures of an Industrial Building with Composite Materials // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Pp. 129–138. DOI: 10.1007/978-3-031-36723-6\_14
13. *Zhu J.Y., Chan T.M.* Experimental investigation on steel-tube-confined-concrete stub column with different cross-section shapes under uniaxial-compression // *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 162. P. 105729. DOI: 10.1016/J.JCSR.2019.105729

14. Venkateshwaran A., Lai B., Liew J.Y.R. Design of steel fiber-reinforced high-strength concrete encased steel short columns and beams // *ACI Structural Journal*. 2021. Vol. 118. Issue 1. Pp. 45–59. DOI: 10.14359/51728077

15. Lai B., Liew J.Y.R. Investigation on axial load-shortening behaviour of high strength concrete encased steel composite section // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 227. P. 111401. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.111401

16. Гвоздев А.А. Задачи и перспективы развития теории железобетона // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1981. № 6. С. 14–17.

17. Стороженко Л.И., Ермоленко Д.А., Лапенко О.И. Трубобетон : монография. Полтава : АСМІ, 2010. 305 с.

18. Варламов А.А., Гаврилов В.Б., Сагадатов А.И. Комплексный метод оценки напряженно-деформированного состояния и долговечности железобетонных конструкций // *БСТ: бюллетень строительной техники*. 2017. № 11 (999). С. 29–31. EDN ZRVWRR.

19. Васильев А.И., Подвальный А.М. Комплексное влияние агрессивных факторов среды на коррозию арматуры в защитном слое // *Бетон и железобетон*. 2010. № 2. С. 26–29.

20. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 1. С. 93–102. EDN TLLYWH.

Поступила в редакцию 8 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 14 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 7 июня 2025 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Анатолий Леонидович Кришан — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования и строительства зданий, советник РААСН; **Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова)**; 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, д. 38; главный научный сотрудник лаборатории мониторинга жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; РИНЦ ID: 535561, Scopus: 56200412900, ORCID: 0000-0002-5851-152X; kris\_al@mail.ru;

Владимир Иванович Римшин — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального хозяйства, советник РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; заведующий лабораторией мониторинга жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; SPIN-код: 9629-5322, РИНЦ ID: 420903, Scopus: 56258934600, ResearcherID: P-4928-2015, ORCID: 0000-0002-9084-4105; v.rimshin@niisf.ru;

Мария Александровна Астафьева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования и строительства зданий; **Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова)**; 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, д. 38; старший научный сотрудник лаборатории мониторинга жилищно-коммунального хозяйства и радиационной безопасности в строительстве; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; РИНЦ ID: 880101, Scopus: 57204739579, ResearcherID: ABA-4430-2021; skymanika@mail.ru;

Михаил Александрович Лихидько — аспирант кафедры проектирования и строительства зданий; **Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова)**; 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, д. 38; РИНЦ ID: 1038214; likhidkom@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Ahmed M., Liang Q.Q., Patel V.I., Hadi M.N.S. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns. *Thin-Walled Structures*. 2019; 138:105-116. DOI: 10.1016/j.tws.2019.02.001

2. 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. DOI: 10.4028/p-7841oa

3. Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*. 1988; 114(8):1804-1826. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1988)114:8(1804)

4. Hossain K.M.A., Chu K. Confinement of six different concretes in CFST columns having different shapes and slenderness. *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2019; 11(2):255-270. DOI: 10.1007/s40091-019-0228-2

5. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astaf'eva M.A. Compressed concrete filled steel elements. *Theory and practice*. Moscow, ASV, 2020; 322. EDN ROLLKN. (rus.).
6. Patel V.I., Hassanein M.F., Thai H.T., Al Abadi H., Elchalakani M., Bai Y. Ultra-high strength circular short CFST columns: Axisymmetric analysis, behaviour and design. *Engineering Structures*. 2019; 179:268-283. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.081
7. Karpenko N.I. On one characteristic function of concrete strength under triaxial compression. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 1982; 2:33-36. (rus.).
8. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Moiseenko G.A. Criterion of concrete strength under volumetric stress state and elevated temperatures. *Academia. Architecture and Construction*. 2024; 4:117-123. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-4-117-123. EDN WGFKEZ. (rus.).
9. Karpenko N.I. *General models of reinforced concrete mechanics*. Moscow, 1996; 416. (rus.).
10. Lyudkovskiy I.G., Fonov V.M., Makaricheva N.V. Study of compressed concrete filled steel elements reinforced with high-strength longitudinal reinforcement. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1980; 5:17-19. (rus.).
11. Xu L., Lu Q., Chi Y., Yang Y., Yu M., Yan Y. Axial compressive performance of UHPC filled steel tube stub columns containing steel-polypropylene hybrid fiber. *Construction and Building Materials*. 2019; 204:754-767. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.202
12. Rimshin V., Ketsko E. Justification of Strengthening of Reinforced Concrete Structures of an Industrial Building with Composite Materials. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023; 129-138. DOI: 10.1007/978-3-031-36723-6\_14
13. Zhu J.Y., Chan T.M. Experimental investigation on steel-tube-confined-concrete stub column with different cross-section shapes under uniaxial-compression. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 162:105729. DOI: 10.1016/J. JCSR.2019.105729
14. Venkateshwaran A., Lai B., Liew J.Y.R. Design of steel fiber-reinforced high-strength concrete encased steel short columns and beams. *ACI Structural Journal*. 2021; 118(1):45-59. DOI: 10.14359/51728077
15. Lai B., Liew J.Y.R. Investigation on axial load-shortening behaviour of high strength concrete encased steel composite section. *Engineering Structures*. 2021; 227:111401. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT. 2020.111401
16. Gvozdev A.A. Tasks and prospects for the development of the theory of reinforced concrete. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 1981; 6:14-17. (rus.).
17. Storozhenko L.I., Ermolenko D.A., Lapenko O.I. *Pipe concrete : monograph*. Poltava, ACMI, 2010; 305. (rus.).
18. Varlamov A.A., Gavrilov V.B., Sagadatov A.I. Comprehensive evaluation method of stress-strain state and durability of reinforced concrete structures. *BST: Bulletin of Construction Equipment*. 2017; 11(999):29-31. EDN ZRVWRR. (rus.).
19. Vasiliev A.I., Podvalny A.M. The complex influence of aggressive environmental factors on the corrosion of reinforcement in the protective layer. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2010; 2:26-29. (rus.).
20. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Yerofeev V.T. The modern methods for ensuring of the reinforced concrete structures durability. *Academia. Architecture and Construction*. 2015; 1:93-102. EDN TLLYWH. (rus.).

Received April 8, 2025.

Adopted in revised form on April 14, 2025.

Approved for publication on June 7, 2025.

**B I O N O T E S :** **Anatoly L. Krishan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Design and Construction of Buildings, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Nosov Magnitogorsk State Technical University**; 38 Lenin st., 455000, Magnitogorsk, Russian Federation; chief researcher of the Laboratory for Monitoring Housing and Public Utilities and Radiation Safety in Construction; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RSCI: 535561, Scopus: 56200412900, ORCID: 0000-0002-5851-152X; kris\_al@mail.ru;

**Vladimir I. Rimshin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Housing and Public Utilities, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of the Laboratory for Monitoring Housing and Public Utilities and Radiation Safety in Construction; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; SPIN-code: 9629-5322, ID RSCI: 420903, Scopus: 56258934600, ResearcherID: P-4928-2015, ORCID: 0000-0002-9084-4105; v.rimshin@niisf.ru;

**Maria A. Astafieva** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design and Construction of Buildings; **Nosov Magnitogorsk State Technical University**; 38 Lenin st.,

455000, Magnitogorsk, Russian Federation; Senior Researcher, Laboratory for Monitoring Housing and Public Utilities and Radiation Safety in Construction; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RSCI: 880101, Scopus: 57204739579, ResearcherID: ABA-4430-2021; skymanika@mail.ru;

**Mikhail A. Likhidko** — postgraduate student of the Department of Design and Construction of Buildings; **Nosov Magnitogorsk State Technical University**; 38 Lenin st., 455000, Magnitogorsk, Russian Federation; ID RSCI: 1038214; likhidkom@yandex.ru.

*Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.  
The authors declare that there is no conflict of interest.*