

Academia. Архитектура и строительство, № 1, стр. 143–151.

Academia. Architecture and Construction, no. 1, pp. 143–151.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 624.075.23

DOI: 10.22337/2077-9038-2026-1-143-151

Напряженно-деформированное состояние центрально сжатых трубобетонных элементов. Теоретические и численные исследования

Астафьева Мария Анатольевна (Магнитогорск). Кандидат технических наук. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Россия, 455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38. МГТУ им. Г.И. Носова). Эл. почта: skymanika@mail.ru

Кришан Анатолий Леонидович (Магнитогорск). Доктор технических наук, профессор, советник РААСН. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Россия, 455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38. МГТУ им. Г.И. Носова). Эл. почта: kris_al@mail.ru

Римшин Владимир Иванович (Москва). Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН. Кафедра жилищно-коммунального комплекса Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл. почта: RimshinVI@mgsu.ru

Аннотация. Сжатые трубобетонные элементы имеют сложный характер силового сопротивления, в основном, обусловленный наличием радиального напряжения на поверхности соприкосновения трубы с бетоном. По этой причине, согласно действующим нормативным документам, даже прочность коротких центрально сжатых элементов рассчитывается по методикам, опирающимся на эмпирических формулах. В работе предложена методика, основанная на известных зависимостях механики твёрдого тела и учитывающая основные особенности силового сопротивления элементов. Оценка достоверности данной методики, а также методик EN 1994-1-1 и СП 266.1325800.2018 выполнена с учётом сопоставления результатов расчётов с данными опытов образцов, имеющих большие диаметры поперечного сечения – от 530 до 720 мм. Дополнительно проведены численные эксперименты по оценке напряжённо-деформированного состояния аналогичных трубобетонных образцов с помощью компьютерного моделирования в ПК ANSYS. Сопоставлялись прочность объёмно сжатого бетона, радиальное напряжение в бетоне, осевое и окружное напряжения в стальной трубе, прочность и осевая деформация образцов. Результаты предложенной методики и численного моделирования практически совпали с данными физических экспериментов. Нормативные методики достаточно точно оценивают прочность образцов, при этом примерно на 15% занижая величину предельного усилия в бетоне и значительно завышая сжимающее усилие в трубе. Полученные данные следует учесть при подготовке новой редакции свода правил.

Ключевые слова: центрально сжатый трубобетонный элемент, объёмное сжатие, радиальное напряжение, прочность, напряжённое состояние, осевая деформация

Для цитирования. Астафьева М.А., Кришан А.Л., Римшин В.И. Напряженно-деформированное состояние центрально сжатых трубобетонных элементов. Теоретические и численные исследования // Academia. Архитектура и строительство. 2026. № 1. С. 143–151. DOI: 10.22337/2077-9038-2026-1-143-151.

Stress-Strain State of Centrally Compressed Concrete Filled Steel Tube Elements. Theoretical and Numerical Studies

Astafeva Mariia A. (Magnitogorsk). Candidate of Sciences in Technology, Docent. Nosov Magnitogorsk State Technical University (Lenin Street, 38, Magnitogorsk city, Chelyabinsk Region, 455000, Russia. NMSTU). E-mail: skymanika@mail.ru

© Астафьева М.А., Кришан А.Л., Римшин В.И., 2026.

Krishan Anatoly L. (Magnitogorsk). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Adviser of RAACS. Nosov Magnitogorsk State Technical University (Lenin Street, 38, Magnitogorsk city, Chelyabinsk Region, 455000, Russia. NMSTU). E-mail: kris_al@mail.ru

Rimshin Vladimir I. (Moscow). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Corresponding Member of RAACS. National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia. NRU MGSU).

Abstract. Compressed concrete filled steel tube elements exhibit a complex force resistance, primarily due to the presence of radial stress at the interface between the pipe and the concrete. For this reason, according to current regulations, even the strength of short, centrally compressed elements is calculated using methods based on empirical formulas. This paper proposes a methodology based on well-known relationships in solid mechanics and taking into account the key features of the force resistance of elements. The validity of this methodology, as well as the methods of EN 1994-1-1 and SP 266.1325800.2018, is assessed by comparing the calculation results with experimental data on specimens with large cross-sectional diameter from 530 to 720 mm. Additionally, numerical experiments were conducted to evaluate the stress-strain state of similar concrete filled steel tube specimens using computer modeling in ANSYS. The strength of volumetrically compressed concrete, radial stress in concrete, axial and circumferential stresses in a steel pipe, and the strength and axial strain of the specimens were compared. The results of the proposed methodology and numerical modeling virtually coincided with the data of physical experiments. Regulatory methods quite accurately estimate the strength of specimens, but they underestimate the ultimate stress in concrete by approximately 15% and significantly overestimate the compressive stress in tube. The data obtained should be taken into account when preparing a new version of the set of rules.

Keywords: centrally compressed concrete filled steel tube element, triaxial compression, radial stress, strength, stress-strain state, axial deformation

For citation. Astafeva M.A., Krishan A.L., Rimshin V.I. Stress-Strain State of Centrally Compressed Concrete Filled Steel Tube Elements. Theoretical and Numerical Studies. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2026, no. 1, pp. 143–151, doi: 10.22337/2077-9038-2026-1-143-151.

Многочисленные положительные качества сжатых трубо-бетонных элементов (ТБЭ) способствуют росту их практического применения в разных странах мира, в основном, в качестве сильно нагруженных колонн или верхних поясов арок большепролётных мостов [1–4]. По сравнению с традиционными металлическими или железобетонными конструкциями ТБЭ имеют более сложный характер силового сопротивления, в основном, обусловленный наличием радиального напряжения на поверхности соприкосновения трубы с бетоном [5–10]. Данный факт делает непростой задачу теоретического определения их несущей способности. По этой причине даже прочность коротких центрально сжатых элементов до настоящего времени рассчитывается по эмпирическим или полуэмпирическим формулам. Основанные на таких формулах методики предложены в нормах Европы (EN 1994-1-1), Китая (GB 50936-2014), России (СП 266.1325800.2016), США (AISC 360-16), Японии (AIJ-1997) и других стран. Однако все эмпирические формулы не лишены недостатков и имеют ограниченное применение. Во-первых, они приемлемы только для тяжёлого бетона обычной прочности. Исследования ТБЭ с другими видами бетона (высокопрочным, мелкозернистым, напрягающим, лёгким и др.) свидетельствуют, что предлагаемые в нормах формулы для них неприемлемы. Это

наглядно показано в публикациях [11–14]. Во-вторых, они не применимы для трубобетонных конструкций со спиральным армированием бетонного ядра [15; 16], что ограничивает варианты их конструктивного исполнения.

Кроме того, в [17] показано, что методики EN 1994-1-1¹ (далее EN) и СП 266.1325800.2016² (далее СП), обеспечивая неплохое соответствие расчётной прочности центрально сжатых ТБЭ экспериментальным данным, значительно завышают продольное усилие в стальной трубе, одновременно занижая аналогичное усилие в бетоне. Данный недостаток нормативных методик является существенным. Очевидно, что он отрицательно сказывается на точности расчётов при определении прочности внецентренно сжатых элементов, в том числе с использованием нелинейной деформационной модели. Также велика вероятность неверных проектных решений узлов сопряжения трубобетонных колонн с конструкциями междуэтажных перекрытий, при разработке которых необходимо более корректно определять усилия в трубе и бетоне ТБЭ.

В этой связи является актуальной задача разработки более универсальной методики расчёта прочности сжатых трубобетонных конструкций, учитывающей вид бетона и характер армирования бетонного ядра, адекватно оценивающей основные

¹ EN 1994-1-1 – Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (<https://clck.ru/3Rk8Xt>).

² СП 266.1325800.2016. Свод правил «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» (<https://docs.cntd.ru/document/456044285>).

особенности их силового сопротивления и позволяющей корректно определять напряжённое состояние материалов. Основы методики изложены в монографии [18]. Методика основана на теоретических положениях механики твёрдого тела. Напряжённо-деформированное состояние в бетоне и стали рассчитывается в зависимости от величины радиального напряжения на поверхности соприкосновения трубы с бетоном σ_r , возникающего из-за ограничения поперечных деформаций бетона стальной трубой. При этом в формулах для определения прочности и предельной осевой деформации объёмно-сжатого бетона имеются коэффициенты материала, учитывающие его вид.

Целью исследования являлась сопоставление основных положений предложенной методики и уточнение вышеуказанных коэффициентов для тяжёлого бетона за счёт сопоставления определённых расчётами компонентов напряжённо-деформированного состояния с опубликованными экспериментальными данными. Дополнительно осуществлялась верификация теоретически полученных параметров силового сопротивления ТБЭ, используя результаты численного эксперимента, выполненного с помощью конечно-элементной модели.

Суть предложенной методики расчёта прочности центрально сжатых ТБЭ по методу предельных усилий, а также принятые в ней допущения изложены в [18]. Ниже приведены полученные формулы для определения необходимых компонентов напряжённо-деформированного состояния бетонного ядра и стальной трубы.

Радиальное напряжение в предельном состоянии вычисляется по формуле:

$$\sigma_r = 0,49e^{-(a+b)} \rho^{0,8} R_b, \quad (1)$$

где R_b – прочность бетона при одноосном сжатии; a и b – коэффициенты материала; ρ – конструктивный коэффициент трубобетона, вычисляемый по формуле:

$$\rho = \frac{\sigma_{y,p} A_p}{R_b A}, \quad (2)$$

в которой $\sigma_{y,p}$ – предел текучести стали трубы; A и A_p – площади поперечных сечений бетонного ядра и стальной трубы.

Формула для определения прочности объёмно-сжатого бетона имеет следующий вид:

$$R_{bp} = R_b \left[1 + \left(0,25 \bar{\sigma} + \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma} - 2}{4} \right)^2 + \frac{\bar{\sigma}}{b}} \right) \right], \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}$ – относительная величина радиального напряжения в предельном состоянии ($\bar{\sigma} = \sigma_r / R_b$).

Осевое напряжение в трубе можно рассчитать по формуле:

$$\sigma_{pz} = R_b \left(\sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2} - \bar{\sigma} \right) \frac{A}{A_p}. \quad (4)$$

Осреднённое по толщине стенки окружное напряжение рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{pz} = -2\sigma_r \frac{A}{A_p}. \quad (5)$$

Осевая деформация элемента ε_z принимается равной деформации бетонного ядра (так как труба при таких деформациях находится в состоянии текучести и следует за бетоном) и вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_z = \frac{R_{bp}}{E_b} + \left(\varepsilon_{b0} - \frac{R_b}{E_b} \right) \cdot \left(\frac{R_{bp}}{R_b} \right)^n, \quad (6)$$

где ε_{b0} – деформации бетона в вершине диаграммы состояния при одноосном сжатии; E_b – начальный модуль упругости бетона; n – показатель степени, зависящий от вида бетона.

Прочность коротких центрально сжатых ТБЭ определяется по формуле:

$$N_u = R_{bp} A + \sigma_{pz} A_p. \quad (7)$$

Следует заметить, что достоверное определение R_{bp} , ε_z , σ_r и σ_{pz} позволяет не только точно рассчитать прочность центрально сжатого ТБЭ, но и построить корректные диаграммы деформирования бетонного ядра и стальной трубы, что важно для построения деформационной расчётной модели внецентренно сжатых элементов. Как видно из приведённых выше формул, точность расчётов предельных напряжений в бетоне и трубе во многом определяется правильным назначением эмпирических коэффициентов a и b , а расчётов осевых деформаций – правильным назначением показателя степени коэффициента n .

На сегодняшний день имеется большое число публикаций со значениями экспериментально полученной прочности коротких центрально сжатых ТБЭ. Однако более полная информация, включающая значения таких важных характеристик, как радиальное напряжение σ_r в предельном состоянии, прочность бетонного ядра R_{bp} осевое σ_{pz} и окружное σ_{pr} напряжения в трубе σ_{pz} осевая деформация элемента ε_z , приведена в очень ограниченном объёме. В данной работе использованы результаты, полученные в диссертации В.Л. Шаброва «Прочность трубобетонных элементов диаметром 500 мм и более при внецентренном сжатии»³ [номер в списке литературы или в сноске дать]. Анализ методики проведённых экспериментов, используемого испытательного оборудования и измерительных приборов, методов обработки полученных данных свидетельствует о высокой достоверности этих результатов. Опытные образцы ТБЭ имели достаточно большие диаметры поперечного сечения – от 530 до 720 мм, что соответствовало размерам применяемых на практике колонн и полностью исключало возможное влияние на результаты масштабного фактора, на что ссылаются некоторые исследователи [19].

³ Шабров, В.Л. Прочность трубобетонных элементов диаметром 500 мм и выше при внецентренном сжатии : дис. ... кандидата технических наук : 05.23.01 / НИИЖБ. – Москва, 1989.

Геометрические и конструктивные параметры семи опытных образцов ТБЭ приведены в таблице 1, а полученные данные по их напряжённно-деформированному состоянию при центральном сжатии и прочности – в таблице 2.

Методика численных экспериментов

Численные эксперименты выполнялись на 3D-моделях методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS⁴

Таблица 2. Параметры напряжённно-деформированного состояния и прочность образцов

Образец	Стальная труба			Призмная прочность бетона, МПа	Высота образца, мм
	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Предел текучести, МПа		
ТБ-1	530	7,8	349,2	34,5	2120
ТБ-2	530	11,85	322,6	34,5	2120
ТБ-3	630	6,6	303,0	25,6	2520
ТБ-4	630	9,8	311,0	34,9	2520
ТБ-5	720	7,7	395,4	28,3	2880
ТБ-6	720	9,55	315,6	28,3	2880
ТБ-7	720	11,7	274,0	28,3	2880

Workbench 2022 R1. Для более корректного моделирования контакта между стальной трубой и бетонным ядром создавались элементы одинакового размера на их контактирующих поверхностях. Стороны разбивочной сетки имели размеры порядка 30 мм. Труба разбивалась с протяжкой (sweep-метод) элементами призматической формы, а бетон – методом Multizone гексаэдрической сеткой. Благодаря равномерному распределению элементов обеспечивалась высокая точность вычислений. Контактные взаимодействия между трубой и бетоном задавались кулоновским трением с коэффициентом 0,6. Для стальной трубы назначалось контактное взаимодействие TARGE170, для бетонного ядра – CONTA174.

Граничные условия на торцах задавались через перемещения Displacements вида Partial Restraint. Внешняя нагрузка задавалась путём осевого смещения верхней торцевой пластины. Учитывался и собственный вес конструкции. Торец нижней пластины закреплялся от смещения по оси Z.

Для учёта физической нелинейности материалов применялись модели пластического поведения материалов. Для учёта геометрической нелинейности ТБЭ в дополнительных настройках решателя Ansys Workbench были включены настройки метода Ньютона-Рафсона и анализ больших деформаций. Многоосное поведение стальной трубы определялось с использованием поверхности текучести Генки-Мизеса с

⁴ ANSYS – универсальная программная система анализа методом конечных элементов.

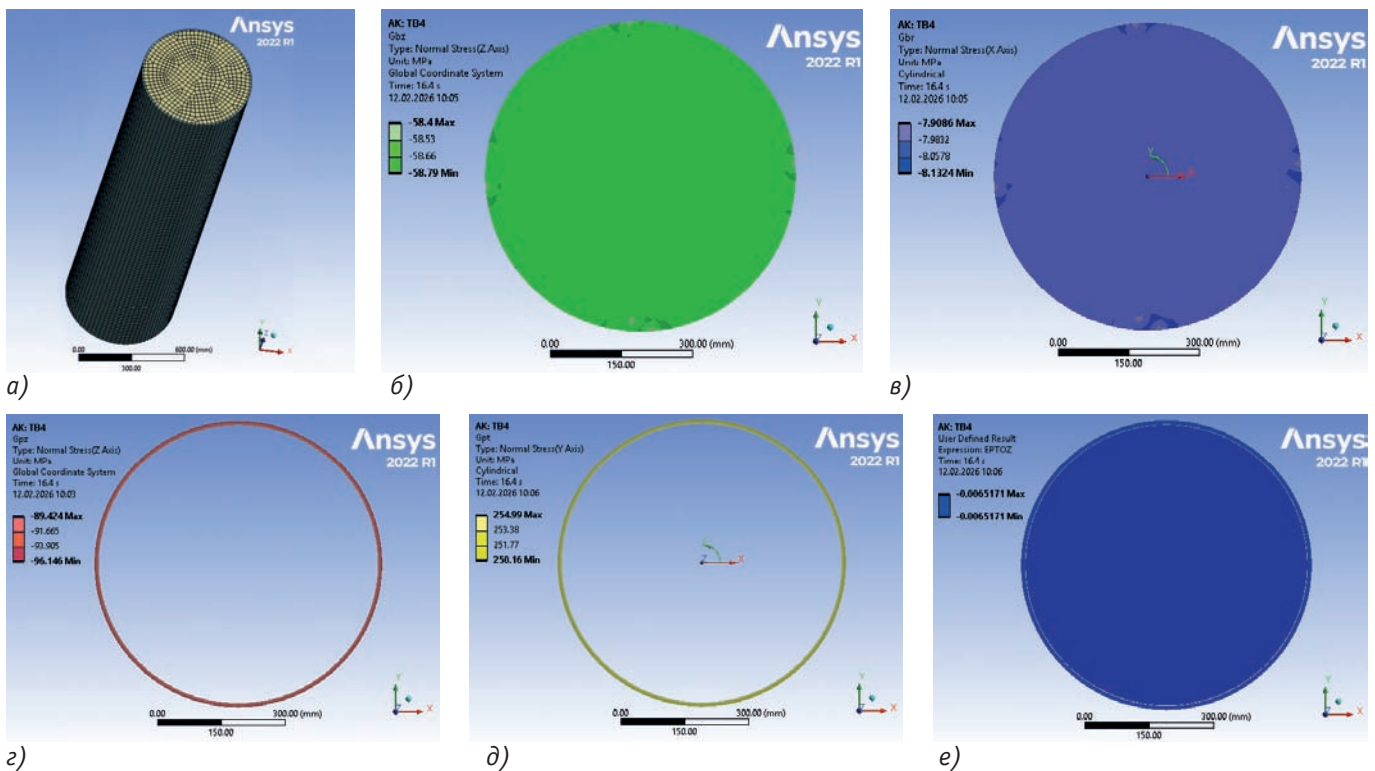


Рис. 1. Результаты конечно-элементного моделирования образца ТБ-1: а) конечно-элементная модель; б) осевые напряжения в бетонном ядре; в) радиальные напряжения в ядре; г) осевые напряжения в трубе; д) окружные напряжения в трубе; е) осевые деформации бетонного ядра

мультилинейным изотропным упрочнением. Модуль упругости стали задавался равным 206 ГПа.

Пластическое поведение бетона описывалось с помощью модели Друкера-Прагера с линейным упрочнением. Для задания ортотропного бетона, работающего при объёмном напряжённом состоянии, учитывались различные модули деформаций и коэффициенты поперечных

деформаций в трёх главных направлениях, модули сдвига между главными осями ортотропии и модуль объёмной упругости.

Объёмное расширение бетонного ядра учитывалось различными коэффициентами дилатансии для растяжения–сжатия и чистого сжатия. Коэффициент дилатансии растяжения–сжатия принималось равным 0,25: для чистого сжатия

Таблица 2. Параметры напряжённо-деформированного состояния и прочность образцов

Образец	Способ определения параметра	σ_r , МПа	R_{bp} , МПа	σ_{pz} , МПа	σ_{pt} , МПа	ε , ‰	N_u , кН
ТБ-1	СП 266.1325800.2016	–	53,5	261,9	–	–	14463
	EN 1994-1-1, EN 1992-1-1	–	52,2	284,8	–	4,90	14489
	Предлагаемая методика	8,00	59,8	136,8	260,0	7,43	14184
	ANSYS	8,56	59,8	104,8	283,0	6,80	13979
	Эксперимент	9,40	62,8	75,3	305,4	–	14000
ТБ-2	СП 266.1325800.2016	–	60,8	242,0	–	–	16915
	EN 1994-1-1, EN 1992-1-1	–	58,6	262,1	–	6,17	16844
	Предлагаемая методика	10,7	66,4	146,3	223,4	7,59	16189
	ANSYS	12,19	70,3	98,3	259,9	8,30	16283
	Эксперимент	12,97	71,2	86,4	270,6	–	16000
ТБ-3	СП 266.1325800.2016	–	37,2	227,2	–	–	14061
	EN 1994-1-1, EN 1992-1-1	–	37,4	245,7	–	4,29	14339
	Предлагаемая методика	5,08	42,2	107,3	234,7	5,07	13984
	ANSYS	5,61	43,7	65,7	263,4	5,72	14108
	Эксперимент	5,77	43,1	62,9	266,6	–	13700
ТБ-4	СП 266.1325800.2016	–	51,5	233,2	–	–	19519
	EN 1994-1-1, EN 1992-1-1	–	52,0	253,1	–	4,76	20052
	Предлагаемая методика	7,66	59,4	117,8	234,8	7,11	19634
	ANSYS	8,06	58,7	93,9	251,8	6,52	19231
	Эксперимент	8,64	59,9	77,8	264,7	–	19000
ТБ-5	СП 266.1325800.2016	–	42,3	296,6	–	–	21594
	EN 1994-1-1, EN 1992-1-1	–	42,8	322,4	–	4,69	22263
	Предлагаемая методика	6,52	49,0	154,2	295,0	6,87	21744
	ANSYS	7,31	51,4	96,3	336,5	6,54	22019
	Эксперимент	7,36	49,3	104,0	333,2	–	21000
ТБ-6	СП 266.1325800.2016	–	42,2	236,7	–	–	21347
	EN 1994-1-1, EN 1992-1-1	–	43,2	256,2	–	4,78	22112
	Предлагаемая методика	6,51	48,9	123,0	235,6	5,76	21497
	ANSYS	7,31	51,4	74,8	269,9	6,53	21735
	Эксперимент	7,24	48,5	88,1	232,2	–	20600
ТБ-7	СП 266.1325800.2016	–	43,2	205,5	–	–	21802
	EN 1994-1-1, EN 1992-1-1	–	44,3	221,7	–	5,03	22641
	Предлагаемая методика	6,89	49,9	110,3	201,6	7,19	21882
	ANSYS	7,84	53,0	63,7	234,9	7,22	22237
	Эксперимент	7,74	49,8	78,1	226,5	–	21000

– 1. Такое разделение обусловлено различным поведением бетона при разных видах нагружения.

Расчётная модель элемента ТБ-1 представлена на рисунке 1 а, результаты расчёта со значениями радиального напряжения в предельном состоянии, прочности бетонного ядра, осевого напряжения в трубе, осевой деформации элемента и прочности конструкции – на рисунке 1 б–е. Полученные данные для всех семи образцов сведены в таблицу 2.

Анализ полученных данных

В таблице 2 представлены результаты расчёта прочности и оценки напряжённо-деформированного состояния по предлагаемой методике, методикам действующих российских и европейских норм, а также данные физических и численных экспериментов. Выполненное сопоставление приведённых здесь значений свидетельствует о следующем. Расчётная прочность семи центрально сжатых образцов по всем трём методикам оказалась близка к опытным значениям и результатам численного моделирования в ПК ANSYS. Немного большие расхождения в сторону запаса прочности (от 3 до 8%) показала методика EN, но такая точность расчётов обычно оценивается как хорошая. Расчётная прочность образцов по предлагаемой методике оказалась только в 1,01÷1,04 раза больше экспериментальных значений. Здесь стоит отметить, что эта прочность рассчитана при коэффициентах тяжёлого бетона $a=0,125$ и $b=0,25$. В [17] показано, что для испытанных в НИИЖБ 23-х образцах с большими диаметрами поперечного сечения (от 530 до 1020 мм) минимальные расхождения с опытной прочностью получаются при коэффициентах $a=0,144$ и $b=0,288$. Однако выполненный анализ для образцов ТБ-1÷ТБ-7 свидетельствует, что параметры напряжённого состояния при таких коэффициентах больше отличаются от данных и физического и численного эксперимента. А полученное при $a=0,125$ и $b=0,25$ очень небольшое, но стабильное превышение расчётной прочности образцов по сравнению с данными экспериментами объясняется их несовершенствами, которые всегда имеют место в процессе испытаний и не позволяют обеспечивать идеальное осевое сжатие. Дополнительно отмечаем, что среднее значение отношения теоретической прочности ТБЭ к опытной, полученной по результатам испытаний различными учёными 232 образцов, составило 1,0 при стандартном отклонении 10%.

Прочность бетонного ядра, рассчитанная по предлагаемой методике, оказалась ближе всего к экспериментальным значениям. Отношение опытной прочности к расчётной находится в интервале от 0,99 до 1,07 при среднем значении 1,02. Такой результат близок к идеальному. Для сталежелезобетонных конструкций полученная точность не характерна.

Отношение экспериментальной прочности бетона к прочности, полученной в численных экспериментах, находится в интервале от 0,94 до 1,06 при среднем значении 0,99. Это тоже является хорошим результатом и говорит об адекватности принятой конечно-элементной модели. Методики

российского и европейского нормативного документа дают заметно бóльшие расхождения показателей прочности бетона с данными опытов. Обе они занижают прочность – на 15÷17% по СП и на 12÷21% по EN.

Значение радиального напряжения в этих методиках не определяется. А вот полученные величины в предлагаемой методике вполне сопоставимы с данными физического и численного экспериментов.

Расхождения между расчётными и опытными величинами напряжений в стальной трубе по всем методикам заметно больше. Это объясняется особенностями напряжённого состояния трубы. Во-первых, к моменту разрушения образцов она находится в состоянии текучести. Во-вторых, напряжённое состояние по толщине стенки трубы неодинаково. Кроме того, в стенках трубы имеются остаточные напряжения. Учесть все нюансы реального сопротивления трубы в расчётах, а также получить в экспериментах точные значения напряжений даже с использованием современных испытательных приборов практически невозможно. Вместе с тем предлагаемая методика показывает заметно меньшие расхождения с опытными данными по сравнению с нормативными методиками. Отношение экспериментальных напряжений σ_{pc} к расчётным получилось здесь в интервале 0,55÷0,71 при среднем значении 0,64. Наряду с уже отмеченными причинами расхождений, вероятно, сказались игнорирование в расчётах касательных напряжений в трубе вследствие принятых допущений при разработке расчётной модели ТБЭ. При этом, как отмечено выше, на прочности образцов такие расхождения сказались незначительно, поскольку доля трубы в восприятии осевого сжимающего усилия намного меньше доли бетонного ядра.

Расчётные значения σ_{pc} по методике СП в 2,6÷3,5 раза (при среднем значении 3,0), а по методике EN в 2,8÷3,8 раза (при среднем значении 3,2) больше экспериментальных. Такое расхождение очень значительно и требует соответствующего внимания специалистов.

Важным результатом являются относительно небольшие расхождения в напряжениях в трубе, полученные в ходе численных и физических экспериментов. В данном случае разница в величинах σ_{pc} составляет от 4% до 25%, что значительно лучше по сравнению с тестируемыми расчётными методиками.

В целом принятая конечно-элементная модель весьма корректно описывает напряжённое состояние центрально сжатых ТБЭ. Поэтому полученные в ходе численного эксперимента данные по осевым деформациям образцов могут быть приняты за основу для оценки точности известных методик по их расчёту. Тем более что при проведении физических экспериментов замерялись деформации только до уровней нагружения образцов порядка 80% от прочности.

В СП есть указания по определению деформаций объёмно-сжатого бетона только для конструкций с косвенным армированием сетками. Применить эти указания к рассматриваемым образцам невозможно. В EN приведена простая

зависимость, полученная эмпирическим путём и имеющая следующий вид:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{b0} \cdot \left(\frac{R_{bp}}{R_b} \right)^2. \quad (8)$$

В соответствии с рекомендациями [20], деформации одноосно сжатого бетона в формулах (6) и (8) принимались в зависимости от его прочности. Для расчёта использовалась формула, полученная в [18] и имеющая следующий вид:

$$\varepsilon_{b0} = 1,2 + 0,16\sqrt{B} \text{ [‰]}. \quad (9)$$

Значения деформаций, получаемой по этой формуле, соответствуют данным EN.

Показатель степени n в формуле (6) был принят равным 2,75. Для его определения применялась статистическая обработка результатов сопоставления расчётной деформации с экспериментальными данными, полученными для ТБЭ из тяжёлого бетона [14; 16; 19; 21].

Данные таблицы 2 показывают, что осевые деформации, вычисленные по формуле европейских норм, на 33÷43% меньше деформаций, полученных в ходе численного эксперимента. Формула (8) даже не учитывает начальный модуль упругости бетона и даёт очень приблизительные величины деформаций.

Формула (6) позволяет получить более точные значения деформаций. Они оказались значительно ближе к результатам расчёта в ANSYS. Отношение этих деформаций находится в интервале 0,88÷1,14 при среднем значении 0,99. Для деформаций такой разброс очень мал.

В целом, выполненное сопоставление по всем анализируемым параметрам напряжённо-деформированного состояния и прочности ТБЭ наглядно свидетельствует о том, что из трёх расчётных методик предлагаемая методика даёт более достоверные и вполне приемлемые для практики проектирования результаты.

Выводы

1. Полученные материалы наглядно демонстрируют, что созданная конечно-элементная модель адекватно оценивает напряжённо-деформированное состояние центрально сжатых ТБЭ. Значения всех оцениваемых параметров – радиального напряжения в бетонном ядре, прочности бетона, осевого и окружного напряжения в трубе, осевой деформации элемента и прочности образцов – по результатам численных и физических экспериментов оказались близкими.

2. Современные методики российских и европейских норм не позволяют корректно определять напряжённо-деформированное состояние даже коротких центрально сжатых ТБЭ. Значения рассчитанных по ним осевых напряжений в стальной трубе в среднем в 3÷3,2 раза больше по сравнению с данными физических экспериментов и примерно в 2,8 раза больше по сравнению с результатами численных экспериментов в ПК ANSYS.

3. Предложенная методика расчёта учитывает основные особенности силового сопротивления трубобетонной конструкции и позволяет достаточно точно рассчитать её прочность при вполне корректном распределении усилий между бетонным ядром и стальной трубой. Отношение экспериментальной прочности бетона к расчётной находится в интервале от 0,99 до 1,07 и в среднем составляет 1,02. Расхождения в значениях теоретических и экспериментальных осевых напряжений в трубе значительно больше и в среднем равны 56%. Но из-за относительно небольшого вклада сжимающих усилий трубы такие расхождения слабо сказались на точности определения теоретической прочности образцов.

4. Осевые деформации, вычисленные по предложенной формуле, отличаются от данных численных экспериментов не более, чем на 14%. Для деформаций такой разброс является очень малым. Практическое использование этой формулы открывает хорошие возможности для выполнения достоверных расчётов прочности и оценки напряжённо-деформированного состояния внецентренно сжатых ТБЭ на основе нелинейной деформационной модели.

Список источников/References

1. Bhure N. Steel Concrete Composite Construction – A Review / N. Bhure, N. Tiwari // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2018. № 6, pp. 564–566. URL: <https://clck.ru/3RkTvK> (дата обращения 04.02.2026).

Bhure N., Tiwari N. Steel Concrete Composite Construction – A Review. In: *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 2018, no. 6, pp. 564–566. URL: <https://clck.ru/3RkTvK> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)

2. Han, L.H. Performans of Concrete-Encased CFST Stub Columns under Axial Compression / L.H. Han, Y.H. An. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.10.019 // Journal of Constructional Steel Research. 2014. № 93 (20). P. 92–76. URL: <https://clck.ru/3RkUaC> (дата обращения 04.02.2026).

Han L.H., An Y.H. Performans of Concrete-Encased CFST Stub Columns under Axial Compression. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, no. 93 (20), pp. 92–76. DOI:10.1016/j.jcsr.2013.10.019. URL: <https://clck.ru/3RkUaC> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)

3. Huang Z., Li D., Uy B., Wang J. Behaviour and Design of Ultra-High- Strength CFST Members Subjected to Compression and Bending. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, p. 106351. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106351. URL: <https://clck.ru/3RkUqU> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)

Behaviour and Design of Ultra- High- Strength CFST Members Subjected to Compression and Bending. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106351 // *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. P 106351. URL: <https://clck.ru/3RkUqU> (Accessed 02/04/2026).

4. Le, T.T. Prediction of Axial Load Capacity of Rectangular Concrete-Filled Steel Tube Columns Using Machine Learning

- Techniques / T.T Le, P.G. Asteris, M.E. Lemonis. DOI:10.1007/s00366-021-01461-0 // *Engineering with Computers*. 2021. P.1–34. URL <https://clck.ru/3RkV32> (дата обращения 04.02.2026).
- Le T.T, Asteris P.G. and Lemonis M.E. Prediction of Axial Load Capacity of Rectangular Concrete-Filled Steel Tube Columns Using Machine Learning Techniques. In: *Engineering with Computers*, 2021, pp.1–34. DOI: 10.1007/s00366-021-01461-0. URL <https://clck.ru/3RkV32> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)
5. Numerical Analysis of Axially Loaded Circular High Strength Concrete-Filled Double Steel Tubular Short Columns / M. Ahmed, Q.Q. Liang, V.I. Patel, M.N.S Hadi. DOI: 10.1016/j.tws.2019.02.001 // *Thin-Walled Structures*, 2019, Vol. 138, pp.105–116. URL: <https://clck.ru/3RkVHr> (дата обращения 04.02.2026).
- 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. In: *Thin-Walled Structures*, 2019, Vol. 138, pp.105–116. DOI: 10.1016/j.tws.2019.02.001. URL: <https://clck.ru/3RkVHr> 3RkV32 (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)
6. Axial Compressive Strength Predictive Models for Recycled Aggregate Concrete Filled Circular Steel Tube Columns Using ANN, GEP and MLR / L. Chen, P. Fakharian, D.R. Eidgahee [и др.] // *Journal of Building Engineering*. Volume 77, 15. October 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107439> (дата обращения 04.02.2026).
- Chen L., Fakharian P., Eidgahee D.R., Haji M., Arab A.M.A., Nouri Y. Axial Compressive Strength Predictive Models for Recycled Aggregate Concrete Filled Circular Steel Tube Columns Using ANN, GEP and MLR. In: *Journal of Building Engineering*, Vol. 77, 15. October 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107439> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)
7. Patel, V.I. Ultra-High Strength Circular Short CFST Columns: Axisymmetric Analysis, Behaviour and Design / V.I. Patel, M.F. Hassanein, Huu-Tai Thai [и др.]. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.081 // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 179 P. 268–283. URL: <https://clck.ru/3RkVf2> (дата обращения 04.02.2026).
- Patel V.I., Hassanein M.F., Thai Huu-Tai, et al. Ultra-High Strength Circular Short CFST Columns: Axisymmetric Analysis, Behaviour and Design. In: *Engineering Structures*, 2019, Vol. 179, pp. 268–283. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.081. URL: <https://clck.ru/3RkVf2> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)
8. Zhu, J.Y. Experimental Investigation on Octagonal Concrete Filled Stub Columns under Uniaxial Compression / J.Y. Zhu, T.M. Chan // *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. № 147. P. 457–467. URL: <https://clck.ru/3RkVrd> (дата обращения 04.02.2026).
- Zhu J.Y., Chan T.M. Experimental Investigation on Octagonal Concrete Filled Stub Columns under Uniaxial Compression. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, no.147, pp. 457–467. URL: <https://clck.ru/3RkVrd> 3RkVf2 (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)
9. Ведерникова, А.А. Совершенствование методики расчёта трубобетонных элементов обратным численно-аналитическим методом и её применение / А.А. Ведерникова // *Инженерный вестник Дона*. 2023. №11. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8798> (дата обращения 04.02.2026).
- Vedernikova A.A. Development and Implementation of the Concrete Filled Steel Tube Elements Inverse Numerical-Analytical Method. In: *Engineering Journal of Don*, 2023, no.11. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8798> (Accessed 02/04/2026). (In Russ., abstr.in Engl.)
10. Хазов, П.А. Экспериментальное исследование продольного и поперечного изгиба трубобетонных стержней / П.А. Хазов, А.П. Помазов // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 66–71. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-66-71>. (дата обращения 04.02.2026).
- Khazov P.A., Pomazov A.P. Experimental Study of Longitudinal and Transverse Bending of Pipe Concrete Rods. In: *Housing Construction*. 2023. № 12. С. 66–71. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-66-71>. (Accessed 02/04/2026). (In Russ., abstr.in Engl.)
11. Han, L.-H. (2005). Tests and Calculations for Hollow Structural Steel (HSS) Stub Columns Filled with Self-Consolidating Concrete (SCC) / L.-H. Han, G.-H. Yao, X.-L. Zhao. DOI: 10.1016/j.jcsr.2005.01.004 // *Journal of Constructional Steel Research*. 2005. № 61 (9). P. 1241–1269. URL: <https://clck.ru/3RkWFh8798> (дата обращения 04.02.2026).
- Han, L.-H., Yao, G.-H., & Zhao, X.-L. (2005). Tests and Calculations for Hollow Structural Steel (HSS) Stub Columns Filled with Self-Consolidating Concrete (SCC). In: *Journal of Constructional Steel Research*, no. 61 (9), pp. 1241–1269. DOI:10.1016/j.jcsr.2005.01.004. URL: <https://clck.ru/3RkWFh8798> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)
12. Hossain, K.M.A. Confinement of Six Different Concretes in CFST Columns Having Different Shapes and Slenderness / K.M.A. Hossain, K. Chu. DOI: 10.1007/s40091-019-0228-2 // *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2019. Vol. 11, P. 255–270. URL: <https://clck.ru/3RkWST> (дата обращения 04.02.2026).
- Hossain K.M.A., Chu K. Confinement of Six Different Concretes in CFST Columns Having Different Shapes and Slenderness. In: *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 2019, Vol. 11, pp.255–270. DOI: 10.1007/s40091-019-0228-2. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40091-019-0228-2#citeas> (Accessed 04.02.2026). URL: <https://clck.ru/3RkWST> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)
13. Hossain, K.M.A. Axial Load Behavior of Ultrahigh Strength Concrete-Filled Steel Tube Columns of Various Geometric and Reinforcement Configurations / K.M.A. Hossain, K. Chu and M.S. Anwar // *Infrastructures*. 2021. № 6. P. 6050066. URL: <https://clck.ru/3RkWST> (дата обращения 04.02.2026).
- 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. In:

Infrastructures, 2021, no. 6, p. 6050066. URL: <https://clck.ru/3RkWST> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)

14. He, Liusheng. Confinement Effect of Concrete-Filled Steel Tube Columns with Infill Concrete of Different Strength Grades / He Liusheng, Lin Siqi, Jiang Huanju. DOI: 10.3389/fmats.2019.00071 // *Journal of Frontiers in Materials*. 2019. Vol.6. URL: <https://clck.ru/3RkWtWt6> (дата обращения 04.02.2026).

He Liusheng, Lin Siqi, Jiang Huanju. Confinement Effect of Concrete-Filled Steel Tube Columns with Infill Concrete of Different Strength Grades. In: *Journal of Frontiers in Materials*, 2019, Vol. 6. DOI: 10.3389/fmats.2019.00071 URL: <https://clck.ru/3RkWtWt6> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)

15. Krishan, A.L. Numerical and Experimental Investigation of Axially Loaded Columns with Spiral Reinforcement / A.L. Krishan, M.A. Astafeva, E.P. Chernyshova. DOI: 10.4028/p-7841oa. // *Materials Science Forum*. 2023. № 1087, P. 163–168. URL: <https://clck.ru/3RkX6s> (дата обращения 04.02.2026).

Krishan A.L., Astafeva M.A., Chernyshova E.P. Numerical and Experimental Investigation of Axially Loaded Columns with Spiral Reinforcement. In: *Materials Science Forum*, 2023, no.1087, pp. 163–168. DOI: 10.4028/p-7841oa. URL: <https://clck.ru/3RkX6s> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)

16. Xiamuxi, A. A Study on Axial Compressive Behaviors of Reinforced Concrete Filled Tubular Steel Columns / A. Xiamuxi, A. Hasegawa // *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Vol. 76. P. 144–154. URL: <https://clck.ru/3RkXJb> (дата обращения 04.02.2026).

Xiamuxi, A., Hasegawa, A. A Study on Axial Compressive Behaviors of Reinforced Concrete Filled Tubular Steel Columns. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, Vol.76, pp. 144–154, doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.03.023. URL: <https://clck.ru/3RkXJb> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)

17. Прочность центрально сжатых трубобетонных элементов / А.Л. Кришан, В.И. Римшин, М.А. Астафьева, М.А. Лихидько // *Вестник МГСУ*. 2025. Т.20. Вып. 8. С. 1154–1164.

Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafeva M.A., Likhid'ko M.A. Strength of Centrally Compressed Tube-Concrete Elements.

In: *Vestnik MGSU*, 2025, Vol. 20, Iss. 8, pp. 1154–1164. (In Russ., abstr.in Engl.)

18. Кришан А. Л., Римшин В. И., Астафьева М.А. Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика / А.Л. Кришан, В.И. Римшин, М.А. Астафьева. М. : АСВ, 2020. 325 с.

Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafeva M.A. Compressed Concrete Tube Elements. Theory and Practice. Moscow, ASV Publ., 2020, 325 p. (In Russ.)

19. Size Effect of Circular Concrete-Filled Steel Tubular Short Columns Subjected to Axial Compression / Y. Wang, P. Chen, C. Liu, Y. Zhang. doi:10.1016/j.tws.2017.09.010 // *Thin-Walled Structures*. 2017. № 120. P. 397–407. URL: <https://clck.ru/3RkXZ7> (Accessed 04.02.2026).

Wang, Y., Chen, P., Liu, C., & Zhang, Y. (2017). Size Effect of Circular Concrete-Filled Steel Tubular Short Columns Subjected to Axial Compression. In: *Thin-Walled Structures*, 2017, no. 120, pp. 397–407. doi:10.1016/j.tws.2017.09.010. URL: <https://clck.ru/3RkXZ7> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)

20. Оценка прочностных и деформационных характеристик высокопрочных бетонов в конструкциях и динамики их изменения во времени / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, В.И. Травуш [и др.] // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 28–38.

Kaprielov S.S., Sheinfel'd A.V., Travush V.I., Karpenko N.I, Krylov S.B. Assessment of Strength and Deformation Characteristics of High-Strength Concrete in Structures and the Dynamics of Their Changes over Time. In: *Construction Materials*, 2023, no. 11, pp. 28–38.

21. Elasto-Plastic Analysis of Circular Concrete-Filled Steel Tube Stub Columns / F. Ding, Z. Yu, Y. Bai, Y. Gong. doi: 10.1016/j.jcsr.2011.04.001 // *Journal of Constructional Steel Research*. 2011. № 67 (10). P. 567–1577. URL: <https://clck.ru/3RkXpg> (дата обращения 04.02.2026).

Ding F., Yu Z., Bai Y., & Gong Y. (2011). Elasto-Plastic Analysis of Circular Concrete-Filled Steel Tube Stub Columns. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, no. 67 (10), pp. 1567–1577. DOI:10.1016/j.jcsr.2011.04.001/. URL: <https://clck.ru/3RkXpg> (Accessed 02/04/2026). (In Engl.)