

Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ¹, А.М. ХАТКЕВИЧ¹, Д.О. ГЛУХОВ¹¹ Полоцкий государственный университет (ПГУ) имени Евфросинии Полоцкой, г. Полоцк, Беларусь

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ В РАСЧЕТЕ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Рассмотрен вопрос применимости нелинейной деформационной модели для определения параметров напряженного-деформированного состояния внецентренно сжатых трубобетонных элементов. Для учета сложного напряженного состояния материалов бетона внутреннего сердечника и стали трубы введены корректировки их диаграмм деформирования. Поперечное сечение трубобетонного элемента рассматривается как совокупность элементарных площадок. В качестве критерия расчета сопротивления сжатию в предельной стадии по прочности предложено принимать максимальное усилие, вычисляемое из условия совместности деформаций стали и бетона. Преимуществом данного критерия является отсутствие необходимости нормирования предельной сжимаемости бетона и учет высокой степени перераспределения усилий в поперечных сечениях. На выборке экспериментальных данных выполнена верификация методики сопоставлением результатов расчетного и экспериментально полученного предельного усилия. Подтверждена применимость нелинейной деформационной модели на основе диаграмм деформирования с учетом многоосного напряженного состояния бетона и стали трубы для расчета внецентренно сжатых трубобетонных элементов.

Ключевые слова: трубобетонный элемент, нелинейная деформационная модель, корректировка диаграмм деформирования, критерий разрушения

D.N. LAZOVSKIY¹, A.M. KHATKEVICH¹, D.O. GLUKHOV¹¹Polotsk State University (PSU) named after Euphrosyne of Polotsk", Polotsk, Belarus

NONLINEAR DEFORMATION MODEL IN THE ANALYSIS OF ECCENTRICALLY COMPRESSED CONCRETE-FILLED STEEL TUBE ELEMENTS

Abstract. This paper discusses the applicability of a nonlinear deformation model for determining the parameters of the stress-strain state of eccentrically compressed concrete-filled steel tube elements. Adjustments to the deformation diagrams of the concrete core and the steel tube were introduced to account for the complex stress state of the materials. The cross-section of the concrete-filled steel tube element is considered as a collection of elementary areas. As the criterion for calculating compressive resistance at the ultimate strength stage, it is proposed to use the maximum force calculated based on the compatibility condition of steel and concrete deformations. The advantage of this criterion is that it eliminates the need to normalize the ultimate compressibility of concrete and accounts for the high degree of force redistribution in cross-sections. The method was verified by comparing the calculated and experimentally obtained ultimate forces on a sample of experimental data. The applicability of the nonlinear deformation model based on deformation diagrams, considering the multiaxial stress state of concrete and the steel tube, was confirmed for the analysis of eccentrically compressed concrete-filled steel tube elements.

Keywords: concrete-filled steel tube element, nonlinear deformation model, deformation diagram adjustment, failure criterion

Введение

Трубобетонные элементы, как один из видов сталежелезобетонных конструкций, широко применяются в строительстве благодаря своей эффективной работе при сжатии [1-4]. Целесообразность их использования в сжатых конструкциях определяется «эффектом обоймы», который испытывает бетон внутри стальной оболочки (трубы). Так, деформирование при сжатии бетона, испытывающего боковое давление, существенно отличается повышенным сопротивлением трещинообразованию, предельной прочностью и деформативностью [5-7]. В то же время сопротивление стальной трубы сжатию в продольном направлении снижается из-за растягивающих напряжений в поперечном (тангенциальном) направлении от давления бетона. На основе многочисленных базовых исследований сжатых трубобетонных элементов, подтверждающих вышеприведенное взаимодействие бетона и стальной трубы, издан нормативный документ СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» [8].

Многие ученые в предположении неизменяемости и разности коэффициентов поперечных деформаций бетона ($\nu = 0,2$) и стали ($\nu = 0,3$) ставят под сомнение совместную работу бетонного сердечника и стальной оболочки в виде трубы при традиционном способе передачи сжимающего усилия на бетонный сердечник и стальную оболочку [9-15] и в [10] указывают на ошибочность принятых допущений указанного СП [8]. В то же время испытания сжатых трубобетонных элементов показали изменчивость коэффициента поперечных деформаций сжатого бетона при его нелинейном деформировании за границей начала трещинообразования вплоть до значения 0,5 [16-18]. Учитывая неоднозначность подходов к расчету трубобетонных элементов, имеется ряд сопоставлений результатов расчетов по различным методикам [5, 19-21]. В [22-29], включая и нормы [8], предлагается нелинейный расчет сжатых трубобетонных элементов без представления в печати практической реализации данной методики и сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными.

Цель настоящей работы – исследовать применимость нелинейной деформационной модели в постановке нормативного документа СП 266.1325800.2016 к расчету внецентренно сжатых трубобетонных элементов с ее верификацией на результатах экспериментальных исследований различных авторов [20, 30-33].

Модели и методы

Поперечное сечение внецентренно сжатого трубобетонного элемента с наружным диаметром трубы D_p и толщиной стенки t_p рассматривается как совокупность элементарных площадок (рисунок 1), в пределах которых относительные деформации считаются равномерно распределенными. В поперечном сечении предполагается полная совместная работа бетона и стальной оболочки (трубы). Распределение относительных деформаций по поперечному сечению трубобетонного элемента подчиняется гипотезе плоских сечений для средних продольных относительных деформаций растянутой и сжатой зон, включающей поперечные сечения с трещинами нормального отрыва и сечения между трещинами.

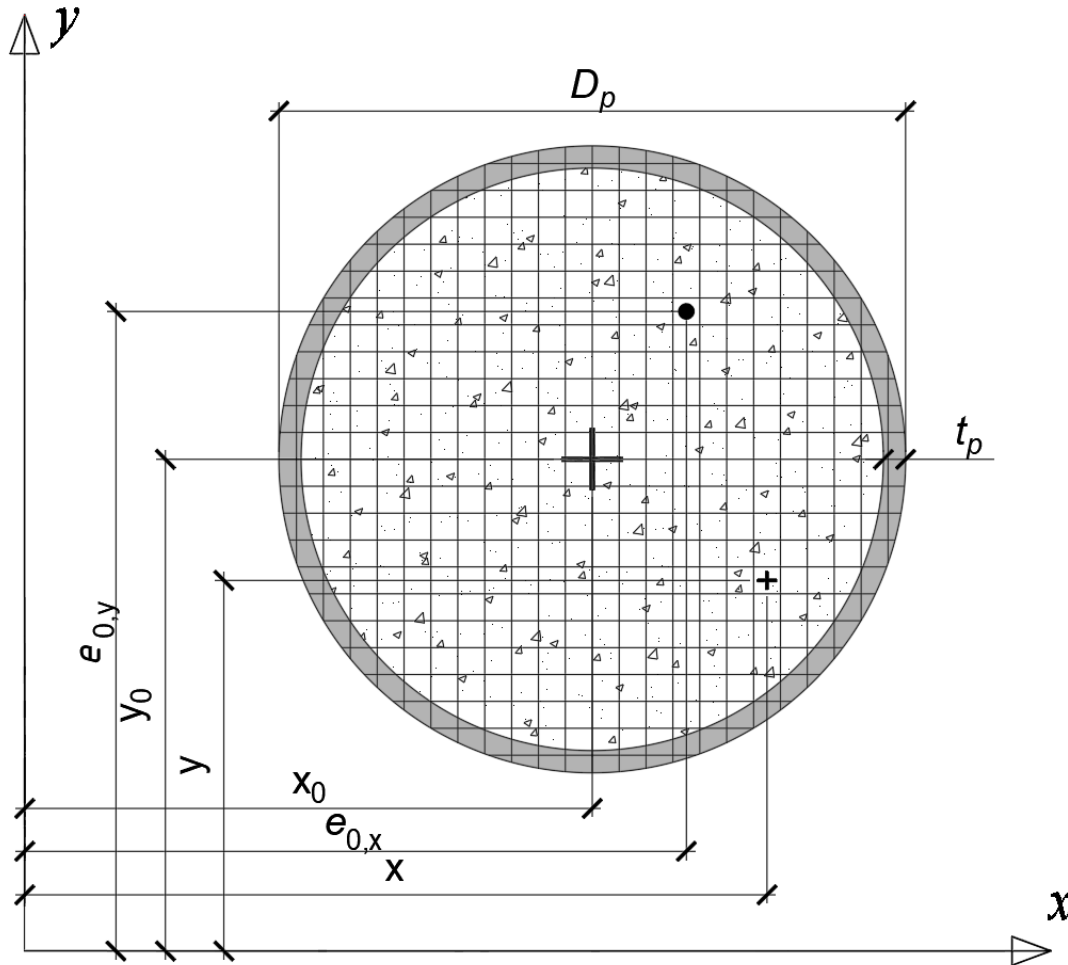


Рисунок 1 - Расчетное поперечное сечение внецентренно сжатого трубобетонного элемента

В качестве аппроксимации диаграммы деформирования бетона с призмной прочностью при сжатии f_c и начальным модулем упругости E_c , устанавливающей зависимость между напряжениями при сжатии (растяжении) σ_c (σ_{ct}) и средними относительными деформациями ε_c (ε_{ct}), принимается нелинейная диаграмма состояния бетона с ниспадающей ветвью (ЕКБ-ФИП) [34-36] без введения ограничений ее длины по деформациям сжатия с целью получения полного перераспределения усилий между бетоном и стальной трубой трубобетонного элемента (рисунок 2 а):

$$\begin{cases} \frac{\sigma_c}{f_c} = \frac{k_c \eta_c - \eta_c^2}{1 + (k_c - 2) \eta_c}; & k_c = \frac{1,1 E_{cm} |\varepsilon_{c1}|}{f_c}; & \eta_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}; & \varepsilon_{c1} = f_c \left(0,12 + \frac{18,8}{f_c} \right) \cdot 10^{-4}; \\ \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = \frac{k_{ct} \eta_{ct} - \eta_{ct}^2}{1 + (k_{ct} - 2) \eta_{ct}}; & k_{ct} = \frac{E_{ct} \varepsilon_{ct1}}{f_{ct}}; & \eta_{ct} = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct1}}; & \varepsilon_{ct1} = \frac{2 \cdot f_{ct}}{E_{ct}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\varepsilon_{c1} = 0,7 f_c^{0,31}$ – относительные деформации бетона в вершине диаграммы деформирования; $f_{ct} = 0,232 f_c^{2/3}$ – прочность бетона при растяжении.

В формуле (1) начальный модуль упругости бетона при растяжении E_{ct} , относительные деформации ε_{ct1} в вершине диаграммы деформирования и предельная растяжимость бетона ε_{ctu} определяются по [8]:

$$E_{ct} = \frac{10^7 \cdot f_{ct}}{750 + 81,55 \cdot f_{ct}}; \quad \varepsilon_{ctu} = \frac{K \cdot \varepsilon_{ct1}}{2}; \quad K = 6,4 + 0,1223 f_c. \quad (2)$$

С учетом многоосного напряженного состояния в составе трубобетонного элемента сопротивление бетона при сжатии продольным усилием с эксцентриситетом e_0 корректируется [8]:

$$f_{cp} = f_c + \Delta f_c \left(1 - \frac{7,5e_0}{D_p - 2t_p}\right), \quad (3)$$

где

$$\Delta f_c = f_c \left(2 + 2,52e_0^{\frac{-1}{(f_y A_p + f_c A_c)}}\right) \frac{t_p}{D_p - 2t_p} \cdot \frac{f_y}{f_c}. \quad (4)$$

В формуле (4) A_p и A_c – площадь поперечного сечения соответственно бетона и стальной трубы внецентренно сжатого трубобетонного элемента; постоянная $c = 25$ МН при измерении величин в формуле в МПа и м.

Идеализированная диаграмма деформирования стали трубы сопротивлением при сжатии и растяжении f_y с начальным модулем упругости E_s , устанавливающей зависимость между напряжениями σ_s и относительными деформациями ε_s , принимается билинейной с горизонтальным участком и ограничением относительных деформаций удлинения при растяжении и без ограничения при сжатии (рисунок 2 б). Предельное значение относительной деформации стали трубы при растяжении принимается $\varepsilon_{su} = 0,025$.

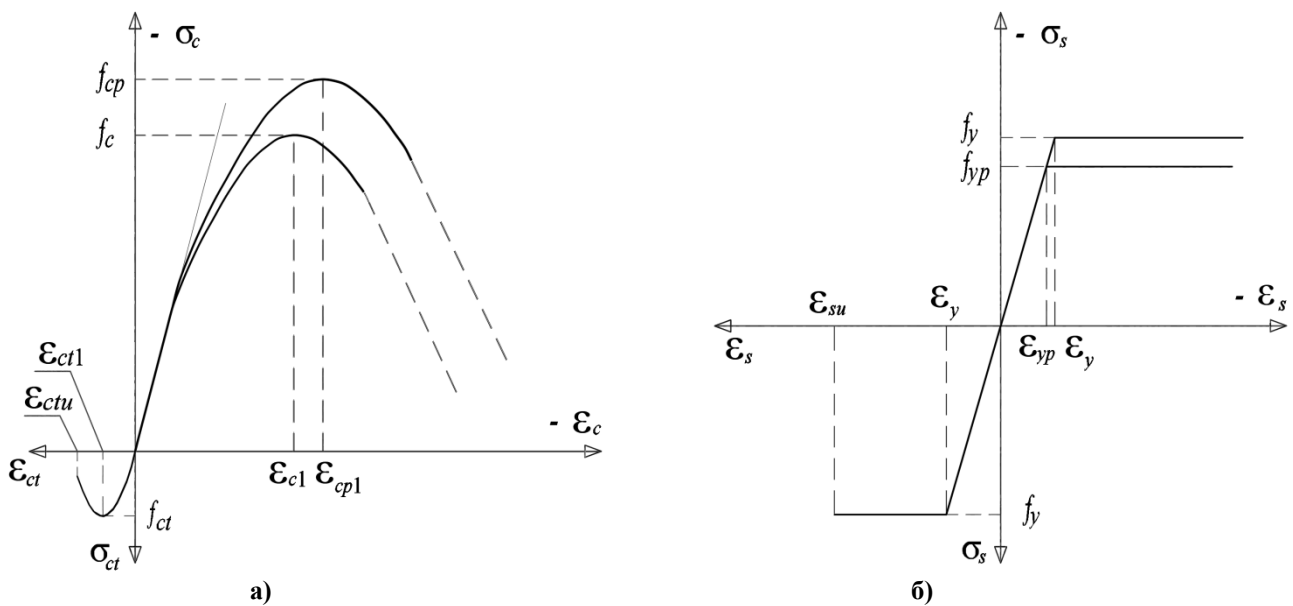


Рисунок 2 – Диаграммы деформирования: а) бетона, б) стали трубы

С учетом многоосного напряженного состояния сопротивление стали трубы при сжатии трубобетонного элемента корректируется по [8]:

$$f_{yp} = f_y - \frac{1}{4} f_y \left(1 - \frac{7,5e_0}{D_p - 2t_p}\right). \quad (5)$$

В формулах (3) и (5):

$$1 - \frac{7,5e_0}{D_p - 2t_p} \geq 0. \quad (6)$$

В общем случае система уравнений для расчета параметров напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатого трубобетонного элемента, состоящая из уравнений равновесия и гипотезы плоских сечений, описывающей положение плоскости распределения относительных деформаций по его поперечному сечению имеет вид:

$$\begin{cases} \iint \sigma(\varepsilon(x, y))(x - x_0) dx dy = N \cdot e_{0,x}; \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y))(y - y_0) dx dy = N \cdot e_{0,y}; \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y)) dx dy = N; \\ \varepsilon(x, y) = \varepsilon_{z\varepsilon} + 1/r_x (x - x_0) + 1/r_y (y - y_0), \end{cases} \quad (7)$$

где $\sigma(x, y)$, $\varepsilon(x, y)$ – нормальные напряжения, относительные деформации в элементарной площадке бетона или стали трубы с координатами (x, y) ; $e_{0,x}$ и $e_{0,y}$ – эксцентриситеты приложения продольного усилия в направлении соответственно оси x и y ; x_0 и y_0 – координаты центра тяжести поперечного сечения трубобетонного элемента; $1/r_x$ и $1/r_y$ – кривизна продольной оси трубобетонного элемента относительно соответственно оси x и y ; $\varepsilon_{z\varepsilon}$ – относительная деформация от действия продольного усилия, соответствующая его центральному приложению.

Критерием разрушения внецентренно сжатого трубобетонного элемента принято максимальное продольное усилие от внешних воздействий, которое способен воспринять элемент. Максимальное значение продольного усилия N_u , при котором процесс последовательных приближений сходится (соблюдаются условия равновесия и условие совместности деформаций (7)), соответствует прочности трубобетонного элемента. Преимуществом такого критерия разрушения является отсутствие необходимости нормирования предельной сжимаемости бетона и возможность учета высокой степени перераспределения усилий в поперечном сечении трубобетонного элемента. Достижение предельных относительных деформаций при разрыве ε_{su} стали трубы в растянутой зоне свидетельствует о разрушении стали, достижение предельных относительных деформаций при растяжении ε_{sti} свидетельствует об образовании нормальных трещин.

Результаты исследования и их анализ

Нелинейный деформационный расчет на основе принятых предпосылок позволяет получать параметры напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатого трубобетонного элемента на любой стадии его работы.

В качестве примера рассмотрен трубобетонный элемент диаметром $D_p = 106$ мм с толщиной стенки трубы $t_p = 3$ мм, нагруженный продольным сжимающим усилием с эксцентриситетом $e_0 = 100$ мм (рисунок 3).

Сопротивление стали трубы трубобетонного элемента равно $f_y = 288$ МПа, бетона сердечника – $f_c = 16,8$ МПа. Экспериментально полученное значение предельного усилия $N_u^{exp} = 115$ кН [32].

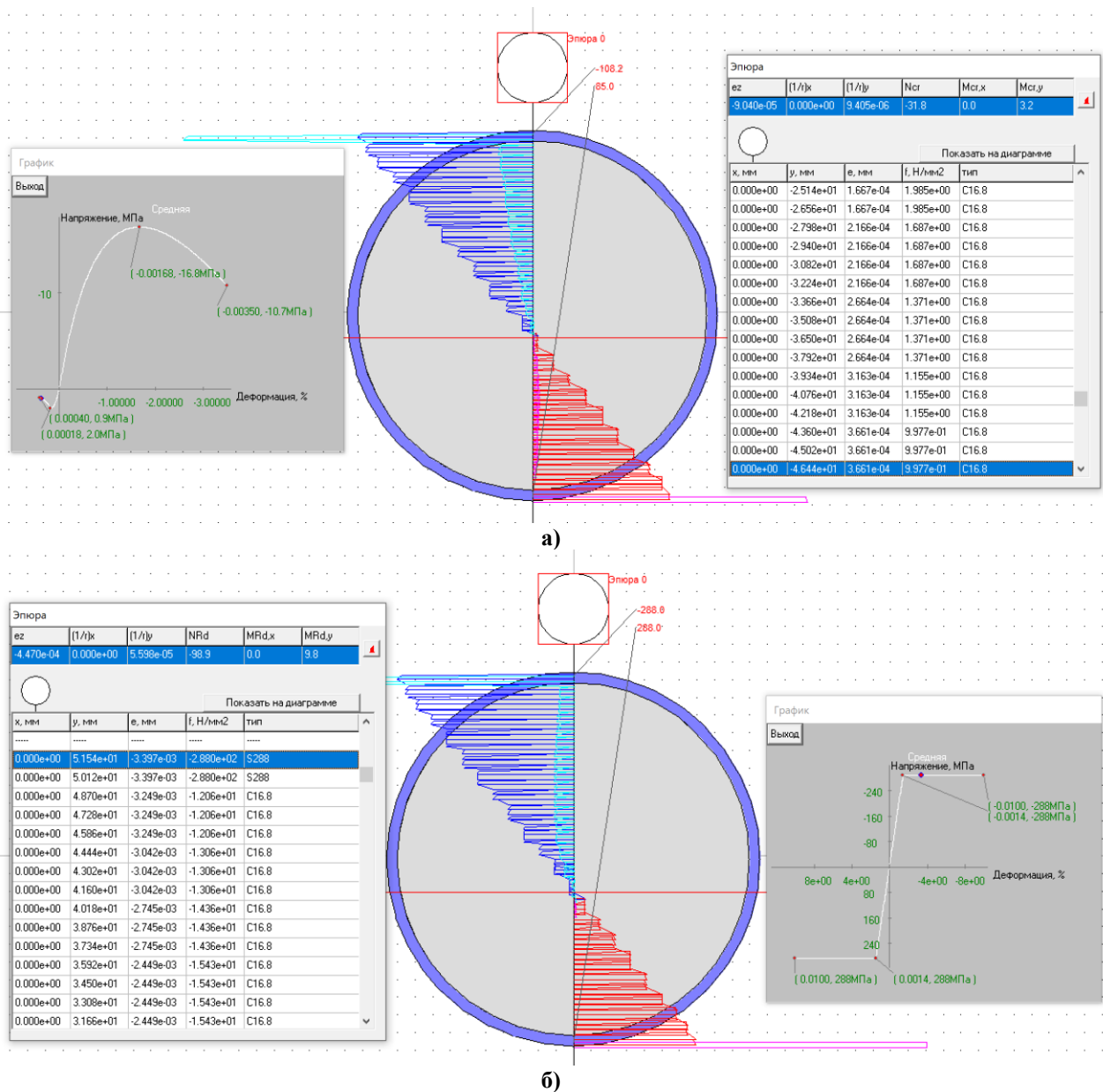


Рисунок 3 – Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению внецентренно сжатого трубобетонного элемента: а) на стадии образования трещин нормального отрыва N_{cr} , б) в предельном по прочности состоянии при N_u (цифры справа от сечения – нормальные напряжения в МПа)

В результате расчета по нелинейной деформационной модели получено усилие образования трещин нормального отрыва $N_{cr} = 31,8 \text{ кН}$, предельное усилие $N_u^{th} = 98,9 \text{ кН}$. Максимальное значение относительных деформаций бетона сердечника и стали трубы при сжатии составляет $\varepsilon_u = 339,7 \cdot 10^{-5}$, что превышает значения, соответствующие началу текучести стали трубы $\varepsilon_y = 144 \cdot 10^{-5}$ и вершины диаграммы деформирования бетона при сжатии $\varepsilon_{cl} = 168 \cdot 10^{-5}$.

Аналогичные нелинейные расчеты с корректировкой сопротивлений стали трубы и бетона при многоосном напряженном состоянии произведены для других экспериментальных данных из источников [20, 30-33]. Нелинейная деформационная модель для расчета внецентренно сжатых трубобетонных элементов имеет удовлетворительную сходимость с результатами экспериментальных исследований.

Сопоставление результатов нелинейного расчета предельного усилия N_u с экспериментальными данными приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сопоставление результатов нелинейного расчета предельного усилия с экспериментальными данными [20, 30-33]

№ п/п	Автор	$\frac{e_0}{D_p}$	D_p , мм	t_p , мм	f_y , МПа	f_{yp} , МПа	f_c , МПа	f_{cp} , МПа	$\varepsilon_u \cdot 10^{-5}$	N_u^{exp} , кН	N_u^{th} , кН	$\frac{N_u^{exp}}{N_u^{th}}$
1	А.И. Сагадатов [30]	0,06	159	6	295	257	22	51,4	277,2	1406	1377,6	1,02
2		0,13	159	6	295	295	22,5	22,5	346	1210	953,2	1,27
3		0,26	159	6	295	295	24,2	24,2	396,2	932	730,7	1,28
4		0,06	159	6	295	257	32,1	59,2	256,7	1559	1473,1	1,06
5		0,13	159	6	295	295	32,8	32,8	335	1412	1040,7	1,35
6		0,26	159	6	295	295	35,1	35,1	331,9	1066	816,7	1,31
7		0,06	219	8	290	256	32,5	54,3	260,5	2921	2480,2	1,18
8		0,13	219	8	290	290	30,5	30,5	319,5	2698	1709,1	1,58
9		0,26	219	8	290	290	32,1	32,1	347,4	1962	1334,4	1,47
10		0,06	219	8	290	253	46,1	71	249,4	3308	2867,9	1,15
11		0,13	219	8	290	290	43,4	43,4	295,2	3041	1974,2	1,54
12		0,26	219	8	290	290	45,6	45,6	315,5	2289	1506,4	1,52
13	К.С. Кузнецов [31]	0,125	159	6	440	440	38,9	38,9	334,7	1774	1403,8	1,26
14		0,25	159	6	440	440	41,6	41,6	341,2	1346	1092,9	1,23
15		0,375	159	6	440	440	38	38	418,8	1059	861,7	1,23
16		0,125	159	6	440	440	55,8	55,8	280,6	1842	1558	1,18
17		0,25	159	6	440	440	57,5	57,5	294,1	1515	1173,3	1,29
18		0,375	159	6	440	440	59	59	308,8	1238	927,2	1,33
19		0,125	106	4	435	435	40,5	40,5	295,5	849	608,4	1,4
20		0,25	106	4	435	435	41,2	41,2	365,9	633	477,4	1,33
21		0,375	106	4	435	435	37,4	37,4	395,2	468	372,1	1,26
22		0,125	106	4	435	435	54,6	54,6	293,3	839	678,3	1,24
23		0,25	106	4	435	435	58,2	58,2	297,1	691	515,7	1,34
24		0,375	106	4	435	435	57,8	57,8	323,3	572	405,8	1,41
25	Л.И. Стороженко [32]	0,09	106	3	288	267	16,8	27,8	322,5	400	382,2	1,05
26		0,189	106	3	288	288	16,8	16,8	350	300	272,3	1,1
27		0,283	106	3	288	288	16,8	16,8	423	270	230	1,17
28		0,377	106	3	288	288	16,8	16,8	463,6	230	199,8	1,15
29		0,472	106	3	288	288	16,8	16,8	439,7	200	174,7	1,14
30		0,943	106	3	288	288	16,8	16,8	339,7	115	98,9	1,16
31		0,376	133	4	288	288	16,8	16,8	479,4	480	386,9	1,24
32		0,752	133	4	288	288	16,8	16,8	410	250	241,8	1,03
33	В.Л. Шабров [33]	0,062	530	7,8	349,2	303	34,5	44,4	256,8	12500	11002	1,14
34		0,125	530	7,8	349,2	346	34,5	35,1	297	10700	8357,9	1,28
35		0,062	530	11,95	322,6	281	34,5	48,1	259	14500	12651	1,15
36		0,125	530	11,95	322,6	321	34,5	35	300,6	12500	9677,7	1,29
37		0,064	630	6,6	303	264	25,6	31,5	272,1	12000	11316	1,06
38		0,127	630	6,6	303	301	25,6	25,9	300,9	10500	8991,6	1,17
39		0,064	630	9,8	311	271	34,9	43,3	263,5	17000	14920	1,14
40		0,127	630	9,8	311	310	34,9	35,2	305,5	15000	11673	1,29
41		0,063	720	7,7	395,4	344	28,3	35,6	267,1	18500	16768	1,1
42		0,125	720	7,7	395,4	391	28,3	28,9	296,4	16000	13007	1,23
43		0,063	720	9,6	315,6	274	28,3	35,6	265,2	18500	16645	1,11
44		0,125	720	9,6	315,6	313	28,3	28,8	311,3	16000	13018	1,23
45		0,063	720	11,74	274	239	28,3	36	269,8	19000	16828	1,13
46		0,125	720	11,74	274	271	28,3	28,7	301,1	16650	13133	1,27

Расчеты расчетов показывают, что корректировка сопротивления бетона и стали трубы с учетом их многоосного напряженного состояния в соответствии с [8] до значений f_{cp} и f_{yp} положительно влияет на сближение результатов нелинейного расчета с экспериментальными

данными. Следует отметить осторожность нормативного документа СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» к учету влияния многоосного напряженного состояния на сопротивление бетона сердечника и стали трубы-оболочки.

Выводы

1. Результаты описанного исследования позволяют использовать нелинейную деформационную модель к расчету внецентренно сжатых трубобетонных элементов. Деформационный подход, в частности, позволяет учитывать физическую нелинейность деформирования материалов в виде стали трубы и бетона сердечника, корректировать их сопротивления с учетом многоосного напряженного состояния, получать параметры напряженно-деформированного состояния элементов произвольных размеров и формы поперечного сечения с различными эксцентриситетами приложения продольных усилий на всех уровнях нагружения.

2. Предложенный критерий расчета сопротивления внецентренному сжатию в предельной стадии по прочности в виде максимального усилия, воспринимаемого трубобетонным элементом из условия совместности деформаций бетона сердечника и стальной трубы-оболочки, позволяет учесть перераспределение усилий в поперечном сечении трубобетонных элементов и расчетным путем определять предельные деформации сжатия бетона, как правило, превышающие нормируемые значения его предельной сжимаемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кришан, А. Л. Трубобетонные колонны для многоэтажных зданий // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009 № 4. С. 75-80.
2. Дуванова, И. А., Сальманов И. Д. Трубобетонные колонны в строительстве высотных зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014 № 6(21). С. 89-103.
3. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 1. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой // Интернет-журнал Науковедение. 2015 Т.7 № 4(29). С. 90. DOI: 10.15862/95TVN415.
4. Пенкина, Е. В. Плотников А. И. К вопросу о применении трубобетонных колонн в многоэтажных и высотных зданиях // Научному прогрессу - творчество молодых: Международная молодежная научная конференция по естественнонаучным и техническим дисциплинам: материалы и доклады: в 3 частях, Йошкар-Ола, 19–20 апреля 2013 года / Поволжский государственный технологический университет. Том Часть 3. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2013. С. 121-123.
5. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 2. Расчет трубобетонных конструкций с металлической оболочкой // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2015 Т.7, №4 (29) DOI: 10.15862/112TVN415.
6. Несветаев, Г. В., Резван И. В. Оценка прочности трубобетона // Фундаментальные исследования. 2011 № 12-3. С. 580-583.
7. Кикин А. И., Санжароиский Р. С., Труль В. А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. М.: Стройиздат, 1974, 144 с.
8. СП 266.1325800.2016 Конструкции сталежелезобетонные : Правила проектирования : свод правил : издание официальное : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1030/пр : дата введения 01 июля 2017 г. – URL: <http://www.consultant.ru>.
9. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Нелинейное напряженно-деформированное состояние трубобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2018 № 7(83). С. 73-82.
10. Хазов П.А., Ситникова А.К., Чибаква Е.А. Расчет трубобетонных конструкций: современное состояние вопроса и перспективы дальнейших исследований (обзор) // Приволжский научный журнал. 2023 № 4. С.57-76.
11. Gardner N. J., Jacobson E. R. Structural Behavior of Concrete Filled Steel Tube // ACI Journal. 1967. P. 404-413.
12. Tomii M., Yoshimura K., Morishita Y. Experimental Studies on Concrete Filled Steel Tubular Columns under Centric Loading // Proc. Int. Colloquium on Stability of Structures Under Static and Dynamic Loads. 1977. – P. 718-741

13. Schneider, S. P. Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tubes // *Journal of Structural Engineering*. 1998 Vol. 124, Issue. 10. P. 1125-1138.
14. Kuranovas A., Goode D., Kvedaras A., Zhong S. Load-Bearing Capacity of Concrete-Filled Steel Columns // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2009 №15(1). P. 21–33. DOI:10.3846/1392-3730.2009.15.21-33
15. Jayalekshmi S. A., Sankar Jegadesh J. S. Comparative Study on Design Principles of Circular Concrete Filled Steel Tubular Columns // *Proceedings to the ICIDRET*. 2014. P. 133-137.
16. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 412 с.
17. Майлян Д. Р., Несветаев Г. В., Халезин С. В., Горцевской А. А. Деформационные свойства и параметрические точки бетонов каркасной структуры // *Инженерный вестник Дона*. 2018 № 2(49). С. 177.
18. Горынин Г. Л., Снигирева В. А., Горынин А. Г., Иванов А. В. Учет изменения коэффициента Пуассона бетона при нелинейном деформировании трубобетонных стоек // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2022 № 11(767). С. 15-27. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-767-11-15-27.
19. Стороженко Л.И., Семко А.В. Сравнение методик расчета трубобетонных конструкций // *Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник*. 2005 №63. С. 59-67.
20. Кришан А. Л., Наркевич М. Ю. Анализ существующих методик расчета внецентренно сжатых трубобетонных колонн городских сооружений и зданий // *Предотвращение аварий зданий и сооружений*. 2012 № 1. С. 1-5.
21. Астанков К.Ю., Пермикин А.С., Овчинников И.Г. Анализ возможности применения российских норм проектирования сталебетонных конструкций в малом мостостроении // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2022 № 2. С. 53-63. DOI: 10.15593/24111678/2022.02.07.
22. Хашхожев К. Н. Аваков А. А. Расчет центрально сжатых трубобетонных колонн кольцевого сечения с учетом физической нелинейности // *Строительство и архитектура*. 2021 Т. 9 № 3. С. 6-10. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-6-10.
23. Конин Д.В., Крылов А.С., Гаврилов Д.Н., Жданова А.А., Воропаева М.И. О работе сталежелезобетонных конструкций при внецентренном сжатии // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023 № 12. С. 31-37. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.31-37.
24. Кришан А.Л., Сагадатов А. И., Мельничук А.С. Реализация нелинейной деформационной модели при расчете прочности трубобетонных колонн // *Предотвращение аварий зданий и сооружений*. 2010 №10. С. 635-643.
25. Чепурненко В.С., Языев Б.М., Урвачёв П.М., Аваков А.А. Определение напряжённо-деформированного состояния коротких внецентренно-сжатых трубобетонных колонн методом конечных элементов путём сведения трёхмерной задачи к двумерной // *Строительство и архитектура*. 2020 Том 8. Выпуск 4 (29). С.87-94.
26. Кришан, А. Л. Диаграммный расчет прочности трубобетонных колонн // *Международная научно-практическая конференция "Инженерные системы - 2011": Тезисы докладов, Москва, 05–08 апреля 2011 года / Под общей редакцией С.Н. Кривошапко. Москва: Российский университет дружбы народов, 2011. С. 79.*
27. Кришан, А. Л., Трошкина Е. А., Кузьмин А. В. Предложения по расчету прочности трубобетонных колонн // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011 № 1(33). С. 66-69.
28. Ведерникова, А. А. Совершенствование методики расчета трубобетонных элементов обратным численно-аналитическим методом и ее применение // *Инженерный вестник Дона*. 2023 № 11(107). С. 437-449.
29. Snigireva, V.A., Gorynin, G.L. The nonlinear stress-strain state of the concrete-filled steel tube structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2018 83(7). P. 73-82. DOI: 10.18720/MCE.83.7.
30. Сагадатов А.И. Напряженно-деформированное состояние сжатых трубобетонных элементов с внутренним стальным сердечником. Дисс. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2006 – 180 с.
31. Кузнецов К.С. Прочность и деформативность колонн из стальных труб, заполненных высокопрочным предварительно обжатым бетоном. Дисс. ...канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2007 – 154 с.
32. Стороженко Л.И. Объемное напряженно-деформированное состояние железобетона с косвенным армированием: Дисс. ... докт. техн. наук. – Кривой Рог, 1984 – 587 с.
33. Шабров В.Л. Прочность трубобетонных элементов диаметром 500 мм и более при внецентренном сжатии: Дисс. канд. ... техн. наук. – М.: НИИЖБ, 1988 – 253 с.
34. CEB-FIB. Model Code for Concrete Structures. Ernst & Sohn, 2013. 402 p.
35. СП 5.03.01-2020 «Бетонные и железобетонные конструкции»//РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь, Минск, 2020 -236с.
36. ТКП 45-5.03-16-2005 (02250) Конструкции сталежелезобетонные покрытий и перекрытий. Правила проектирования / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь // Минск, 2006. – 71 с.

REFERENCES

1. Krishan, A. L. Trubobetonnye kolonny dlya mnogoetazhnykh zdaniy [The concrete-filled steel tube columns for high-rise buildings]. *Stroitel'naya mekhanika inzhe-nernykh konstruksii i sooruzhenii*. 2009 No 4. Pp. 75-80. (rus)
2. Duvanova, I. A., Sal'manov I. D. Trubobetonnye kolonny v stroitel'stve vysoznykh zdaniy i so-oruzhenii [Concrete-filled steel tube columns in construction high-rise building and structures]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenii*. 2014 No 6(21). Pp. 89-103. (rus)
3. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. O probleme rascheta trubobetonnykh konstruksii s obolochkoi iz raznykh materialov. Chast' 1. Opyt primeneniya trubobetona s metallicheskoj obolochkoi. *Internet-zhurnal Naukovedenie*. 2015 T.7 No 4(29). Pp. 90. DOI: 10.15862/95TVN415. (rus)
4. Penkina, E. V. Plotnikov A. I. K voprosu o primeneniі trubobetonnykh kolonn v mnogoetazhnykh i vysoznykh zdaniyakh. *Nauchnomu progressu - tvorchestvo molodykh : Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferen-tsiya po estestvennonauchnym i tekhnicheskim distsiplinam: materialy i doklady: v 3 chastyakh*, Ioshkar-Ola, 19–20 aprelya 2013 goda. Povolzhskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet. Tom Chast' 3. Yoshkar-Ola: Povolzhskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 2013. Pp. 121-123. (rus)
5. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. O probleme rascheta trubobetonnykh konstruksii s obolochkoi iz raznykh materialov. Chast' 2. Raschet trubobetonnykh konstruksii s metalli-cheskoj obolochkoi. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»*. 2015 T.7, No 4 (29) DOI: 10.15862/112TVN415. (rus)
6. Nesvetaev, G. V., Rezvan I. V. Otsenka prochnosti trubobetona [RESISTIBILITY EVALUATION OF THE COMPOSITE COLUMNS]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2011 No 12-3. Pp. 580-583. (rus)
7. Kikin A. I., Sanzharoiskii R. S., Trull' V. A. Konstruksii iz stal'nykh trub, zapolnennykh beto-nom. Moscow: Stroiizdat, 1974, 144 p. (rus)
8. SP 266.1325800.2016 Konstruksii stalezhelezobetonnye : Pravila proektirovaniya : svod pravil : izdanie ofitsial'noe : utverzhden Prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaistva Rossiiskoi Federatsii ot 30 dekabrya 2016 g. No 1030/pr : data vvedeniya 01 iyulya 2017 g. – URL: <http://www.consultant.ru>. (rus)
9. Snigireva V.A., Gorynin G.L. Nelineinoe napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie trubobetonnykh konstruksii [The nonlinear stress-strain state of the concrete-filled steel tube structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2018 No 7(83). Pp. 73-82. (rus)
10. Khazov P.A., Sitnikova A.K., Chibakova E.A. Raschet trubobetonnykh konstruksii: sovremennoe sostoyanie voprosa i perspektivy dal'neishikh issledovaniy (obzor). *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2023 No 4. Pp.57-76. (rus)
11. Gardner N. J., Jacobson E. R. Structural Behavior of Concrete Filled Steel Tube. *ACI Journal*. 1967. Pp. 404-413.
12. Tomii M., Yoshimura K., Morishita Y. Experimental Studies on Concrete Filled Steel Tubular Columns under Concentric Loading. *Proc. Int. Colloquium on Stability of Structures Under Static and Dynamic Loads*. 1977. – Pp. 718-741.
13. Schneider, S. P. Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tubes. *Journal of Structural Engineering*. 1998 Vol. 124, Issue. 10. Pp. 1125-1138.
14. Kuranovas A., Goode D., Kvedaras A., Zhong S. Load-Bearing Capacity of Concrete-Filled Steel Columns. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2009 No 15(1). Pp. 21-33. DOI:10.3846/1392-3730.2009.15.21-33
15. Jayalekshmi S. A., Sankar Jegadesh J. S. Comparative Study on Design Principles of Circular Concrete Filled Steel Tubular Columns. *Proceedings to the ICIDRET*. 2014. Pp. 133-137.
16. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona. Moscow: Stroiizdat, 1996. 412 p. (rus)
17. Mailyan D. R., Nesvetaev G. V., Khalezin S. V., Gortsevskoi A. A. Deformatsionnye svoystva i parametricheskie tochki betonov karkasnoi struktury. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2018 No 2(49). P. 177. (rus)
18. Gorynin G. L., Snigireva V. A., Gorynin A. G., Ivanov A. V. Uchet izmeneniya koeffitsienta Puasso-na betona pri nelineinom deformirovaniі trubobetonnykh stoek. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2022 No 11(767). P. 15-27. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-767-11-15-27. (rus)
19. Storozhenko L.I., Semko A.V. Sravnenie metodik rascheta trubobetonnykh konstruksii. *Kommunal'noe khozyaistvo gorodov. Nauchno-tekhnicheskii sbornik*. 2005 No 63. Pp. 59-67. (rus)
20. Krishan A. L., Narkevich M. Yu. Analiz sushchestvuyushchikh metodik rascheta vnetsentrenno szhatykh trubobetonnykh kolonn gorodskikh sooruzhenii i zdaniy. *Predotvrashchenie avarii zdaniy i sooruzhenii*. 2012 No 1. Pp. 1-5. (rus)
21. Astankov K.Yu., Permikin A.S., Ovchinnikov I.G. Analiz vozmozhnosti primeneniya rossiiskikh norm proektirovaniya staletrubobetonnykh konstruksii v malom mostostroenii. *Transport. Transportnye so-oruzheniya. Ekologiya*. 2022 No 2. Pp. 53-63. DOI: 10.15593/24111678/2022.02.07. (rus)
22. Khashkhodzhev K. N. Avakov A. A. Raschet tsentral'no szhatykh trubobetonnykh kolonn kol'tsevogo secheniya s uchetom fizicheskoi nelineinosti [CALCULATION OF CENTRALLY COMPRESSED CONCRETE FILLED STEEL TUBULAR COLUMNS OF ANNULAR SECTION TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL NONLINEARITY]. *Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2021 T. 9 No 3. Pp. 6-10. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-6-10. (rus)

23. Konin D.V., Krylov A.S., Gavrilov D.N., Zhdanova A.A., Voropaeva M.I. O rabote stalezhelezobetonnykh konstrukttsii pri vnetsentrennom szhatii. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2023 No 12. Pp. 31-37. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.31-37. (rus)
24. Krishan A.L., Sagadatov A. I., Mel'nichuk A.S. Realizatsiya nelineinoi deformatsionnoi modeli pri raschete prochnosti trubobetonnykh kolonn. *Predotvrashchenie avarii zdaniy i sooruzhenii*. 2010 No 10. Pp. 635-643. (rus)
25. Chepurmenko V.S., Yazyev B.M., Urvachev P.M., Avakov A.A. Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya korotkikh vnetsentrenno-szhatykh trubobetonnykh kolonn metodom konechnykh elementov putem svedeniya trekhmernoi zadachi k dvumernoi [DETERMINATION OF STRESS-STRAIN STATE OF SHORT ECCENTRICALLY LOADED CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR (CFST) COLUMNS USING FINITE ELEMENT METHOD WITH REDUCING THE PROBLEM FROM THREE-DIMENSIONAL TO TWO-DIMENSIONAL]. *Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2020 Tom 8. Vypusk 4 (29). Pp.87-94. (rus)
26. Krishan, A. L. Diagrammnyi raschet prochnosti trubobetonnykh kolonn // Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Inzhenernye sistemy - 2011": Tezisy dokladov, Moskva, 05–08 aprelya 2011 goda / Pod obshchei redaktsiei S.N. Krivoshepkov. Moskva: Rossiiskii universitet druzhby narodov, 2011. P. 79. (rus)
27. Krishan, A. L., Troshkina E. A., Kuz'min A. V. Predlozheniya po raschetu prochnosti trubobetonnykh kolonn. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2011 No 1(33). Pp. 66-69. (rus)
28. Vedernikova, A. A. Sovershenstvovanie metodiki rascheta trubobetonnykh elementov obratnym chislenno-analiticheskim metodom i ee primeneniye. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2023 No 11(107). Pp. 437-449. (rus)
29. Snigireva, V.A., Gorynin, G.L. The nonlinear stress-strain state of the concrete-filled steel tube structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2018 83(7). P. 73–82. DOI: 10.18720/MCE.83.7. (rus)
30. Sagadatov A.I. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie szhatykh trubobetonnykh elementov s vnutrennim stal'nyim serdechnikom. Diss. ... kand. tekhn. nauk. – Magnitogorsk, 2006 – 180 p.
31. Kuznetsov K.S. Prochnost' i deformativnost' kolonn iz stal'nykh trub, zapolnennykh vysokoprochnym predvaritel'no obzhatym betonom. Diss. ...kand. tekhn. nauk. – Magnitogorsk, 2007 – 154 p. (rus)
32. Storozhenko L.I. Ob'emnoe napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie zhelezobetona s kosvennym armirovaniem: Diss. ... dokt. tekhn. nauk. – Krivoi Rog, 1984 – 587 p. (rus)
33. Shabrov V.L. Prochnost' trubobetonnykh elementov diametrom 500 mm i bolee pri vnetsentrennom szhatii: Diss. kand. ... tekhn. nauk. – Moscow: NIIZhB, 1988 – 253 p. (rus)
34. CEB-FIB. Model Code for Concrete Structures. Ernst & Sohn, 2013. 402 p.
35. SP 5.03.01-2020 «Betonnye i zhelezobetonnye konstrukttsii»/RUP «Stroitekhnorm» Ministerstva arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus', Minsk, 2020 -236 p.
36. ТКР 45-5.03-16-2005 (02250) Konstrukttsii stalezhelezobetonnye pokrytii i perekrytii. Pravila proektirovaniya. Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus'. Minsk, 2006. – 71 p. (rus)

Информация об авторах:

Лазовский Дмитрий Николаевич

Полоцкий государственный университет (ПГУ) имени Евфросинии Полоцкой, г. Полоцк, Беларусь,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных конструкций
E-mail: d.lazovski@psu.by

Хаткевич Александр Михайлович

Полоцкий государственный университет (ПГУ) имени Евфросинии Полоцкой, г. Полоцк, Беларусь,
кандидат технических наук, старший преподаватель, заведующий кафедрой строительных конструкций
E-mail: haalex83@yandex.ru

Глухов Дмитрий Олегович

Полоцкий государственный университет (ПГУ) имени Евфросинии Полоцкой, г. Полоцк, Беларусь,
кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных систем и сетей
E-mail: d.gluhov@psu.by

Information about authors:

Lazovsky Dmitry N.

Polotsk State University (PSU) named after Euphrosyne Polotskaya, Polotsk, Belarus,
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Structures
E-mail: d.lazovski@psu.by

Alexander Mikhailovich Kh.

Polotsk State University (PSU) named after Euphrosyne Polotskaya, Polotsk, Belarus,
Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Head of the Department of Building Structures
E-mail: haalex83@yandex.ru

Glukhov Dmitry O.

Polotsk State University (PSU) named after Euphrosyne Polotskaya, Polotsk, Belarus,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computing Systems and Networks
E-mail: d.gluhov@psu.by