

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.012.45

DOI 10.52928/2070-1683-2025-40-1-2-12

АППРОКСИМАЦИИ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА В НЕЛИНЕЙНОМ РАСЧЕТЕ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ¹⁾, канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ²⁾,
канд. техн. наук А.М. ХАТКЕВИЧ³⁾, канд. техн. наук, доц. А.И. КОЛТУНОВ⁴⁾

^(1), 3), 4) Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, ²⁾ ООО «СофтКлуб», Минск)
¹⁾ d.lazovski@psu.by, ²⁾ d.gluhov@psu.by, ³⁾ a.khatkevich@psu.by, ⁴⁾ a.koltunov@psu.by

Рассмотрена возможность использования для расчета внецентренно сжатых трубобетонных элементов некоторых аппроксимаций диаграмм деформирования бетона. Сопоставлены результаты нелинейного расчета параметров напряженно-деформированного состояния с экспериментальными данными из сформированной выборки исследований. Аппроксимация диаграммы деформирования бетона с горизонтальным участком, следующим за пиковой точкой, позволяет получить параметры напряженно-деформированного состояния в большей степени соответствующие экспериментальным данным.

Ключевые слова: трубобетонный элемент, нелинейный расчет, диаграмма деформирования, аппроксимация диаграммы.

Введение. Мировая практика строительства подтверждает целесообразность использования трубобетонных элементов для сильно нагруженных конструкций зданий и сооружений. Трубобетонные элементы удачно сочетают в себе преимущества как стальных, так и железобетонных конструкций, обладая при оправданной стоимости изготовления высокой жесткостью и несущей способностью, а также высокой надежностью благодаря пластическому характеру разрушения. Этим объясняется большой интерес, проявляемый учеными-исследователями к трубобетонным элементам [1–35].

Разработка моделей и методов расчета, максимально соответствующих физическим процессам деформирования и разрушения трубобетонных элементов, не теряет своей актуальности и практической значимости для создания надежных строительных конструкций. В данном направлении известны работы [36–46].

Деформационные подходы к расчету строительных конструкций благодаря надежности получают в последнее время широкое распространение и допущены к применению нормами проектирования СП 266.1325800.2016¹⁾. Деформационная модель расчета базируется на совместном использовании диаграмм деформирования материалов, составляющих рассчитываемое поперечное сечение, а также обеспечении их совместной работы и условиях распределения деформаций в предположении соблюдения гипотезы плоских сечений. Описание нелинейного деформационного подхода к расчету трубобетонных элементов выполнялось в работах [45–48]. При этом вопрос аппроксимации в нелинейных расчетах диаграммы деформирования бетона, от которого в значительной степени зависит форма разрушения и несущая способность трубобетонных элементов, остается открытым.

В связи с этим цель данной работы – исследовать применимость различных аппроксимаций диаграмм деформирования бетона для выполнения нелинейных расчетов внецентренно сжатых трубобетонных элементов на результатах экспериментальных исследований различных авторов.

Результаты исследования и их анализ. Традиционно для бетона принимается нелинейная диаграмма состояния бетона « σ_c (σ_{ct}) – ε_c (ε_{ct})» с ниспадающей ветвью (ЕКБ-ФИП)²⁾ (рисунок 1, а):

$$\begin{cases} \frac{\sigma_c}{f_c} = \frac{k_c \eta_c - \eta_c^2}{1 + (k_c - 2) \eta_{c2}}; k_c = \frac{1,1 E_{cm} |\varepsilon_{c1}|}{f_c}; \eta_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}; \varepsilon_{c1} = f_c \left(0,12 + \frac{18,8}{f_c} \right) \cdot 10^{-4}; \\ \frac{\sigma_{ct}}{f_{ct}} = \frac{k_{ct} \eta_{ct} - \eta_{ct}^2}{1 + (k_{ct} - 2) \eta_{ct}}; k_{ct} = \frac{E_{ct} \varepsilon_{ct1}}{f_{ct}}; \eta_{ct} = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{ct1}}; \varepsilon_{ct1} = \frac{2 \cdot f_{ct}}{E_{ct}}, \end{cases} \quad (1)$$

¹⁾ СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные: Правила проектирования: свод правил: издание официальное: утв. 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>.

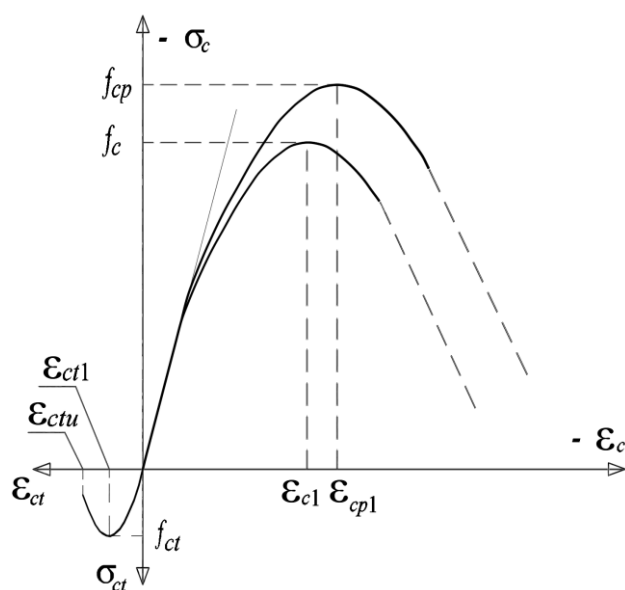
²⁾ СЕВ-FIB. Model Code for Concrete Structures. – Hoboken: Ernst & Sohn, 2013. – 402 p.

СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции / РУП «Стройтехнорм», М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – 236 с.

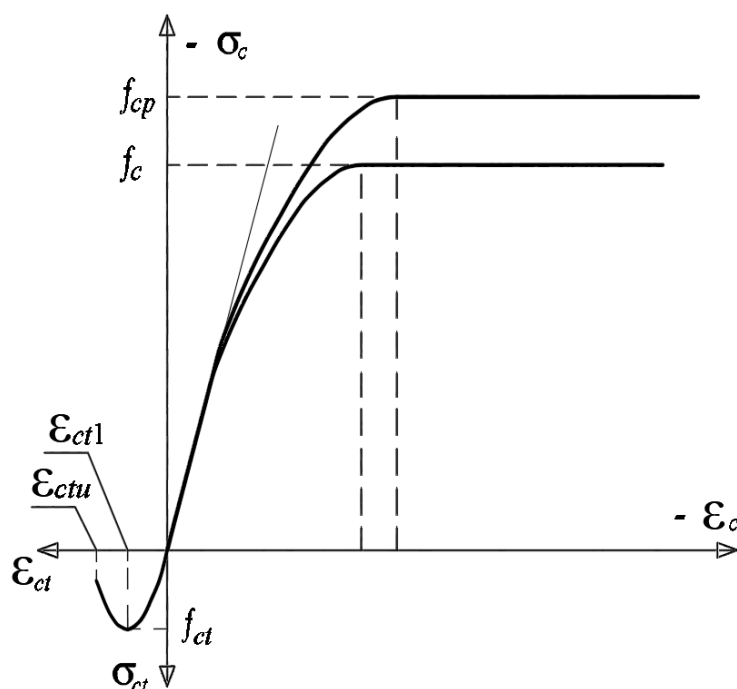
ТКП 45-5.03-16-2005 (02250). Конструкции сталежелезобетонные покрытий и перекрытий. Правила проектирования / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2006. – 71 с.

где $\sigma_c (\sigma_{ct})$ – напряжения при сжатии (растяжении);
 $\varepsilon_c (\varepsilon_{ct})$ – относительные деформации при сжатии (растяжении);
 $\varepsilon_{cl} = 0,7 f_c^{0,31}$ – относительные деформации бетона в вершине диаграммы деформирования;
 $f_{ct} = 0,232 f_c^{2/3}$ – прочность бетона при растяжении;
 f_c – призмная прочность при сжатии;
 E_c – начальный модуль упругости;
 E_{ct} – начальный модуль упругости бетона при растяжении;
 ε_{ct1} – относительные деформации в вершине диаграммы деформирования;
 ε_{ctu} – предельное значение относительных деформаций бетона при растяжении.

Для получения более полного перераспределения усилий между бетоном и стальной трубой трубобетонного элемента целесообразно отказаться от введения ограничения продолжительности ниспадающей ветви по деформациям сжатия.



а



б

Рисунок 1. – Диаграммы деформирования бетона с ниспадающей ветвью (а) и с горизонтальной ветвью (б)

В формуле (1) значения E_{ct} , ε_{ct1} и ε_{ctu} определяются по СП 266.1325800.2016:

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

Ввиду работы бетона в составе трубобетонных элементов в условиях многоосного сжатия сопротивление бетона может быть уточнено по СП 266.1325800.2016. В частности, при сжатии элемента продольным усилием с величиной эксцентриситета e_0 призмная прочность бетона:

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

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

где A_p – площадь поперечного сечения бетона;

A_c – площадь поперечного сечения стальной трубы;

c – постоянная, принимаемая 25 МН при размерностях величин в формуле в МПа и м.

В то же время нелинейная диаграмма деформирования по аппроксимации (1) достаточно «быстро реализуется», поскольку на ниспадающей ветви происходит резкое снижение прочности при относительно небольших значениях деформаций. Для трубобетонных элементов такой характер деформирования не будет объективно отражать картину происходящих процессов, ведь в условиях ограниченного стальной оболочкой деформирования (расширения в поперечном направлении) бетон не может исчерпать своей прочности до нулевых значений.

Поэтому для нелинейных расчетов трубобетонных элементов вместо ниспадающей ветви предлагается использовать горизонтальный участок без ограничения предельных деформаций (рисунок 1, б). Данную модернизацию можно выполнить, базируясь на положениях надежной работы трубобетонных элементов с сохранением совместной работы трубы и бетона на всех стадиях, включая закритическую, в которой относительные деформации стали трубы превышают предел текучести.

Диаграмму деформирования стали трубы сопротивлением при сжатии и растяжении f_y , устанавливающей зависимость между напряжениями σ_s и относительными деформациями ε_s , предлагается принимать билинейной с горизонтальным участком и ограничением относительных деформаций удлинения при растяжении и без ограничения при сжатии (рисунок 2). Предельное значение относительной деформации стали трубы при растяжении принимается $\varepsilon_{su} = 0,025$, при сжатии не ограничивается.

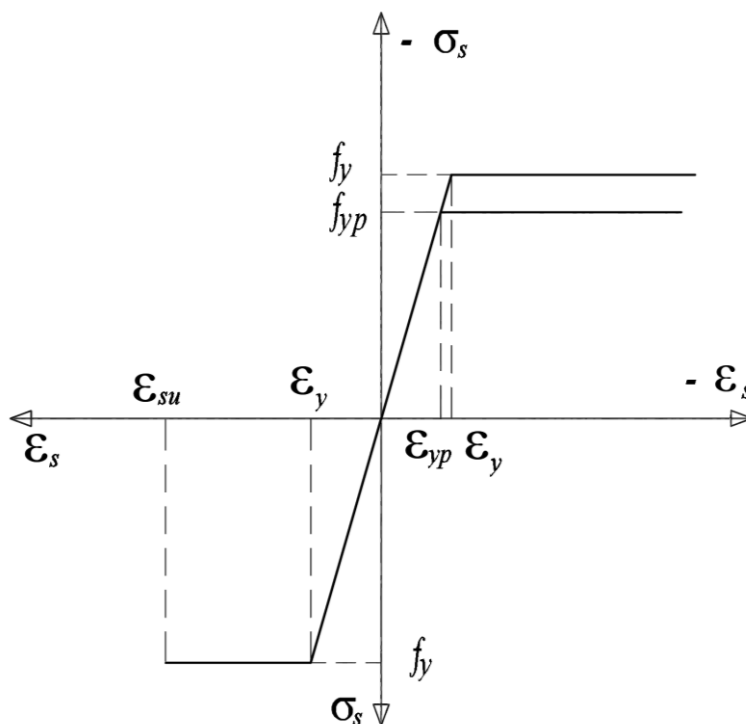


Рисунок 2. – Диаграмма деформирования стали трубы

Ввиду работы трубы в составе трубобетонных элементов сопротивление стали трубы может быть уточнено по СП 266.1325800.2016:

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

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

Нелинейный деформационный расчет на основе предпосылок, описанных нами в работах [45–48], позволяет получать параметры напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатого трубобетонного элемента на любой стадии нагружения. Для сопоставления теоретически рассчитанных параметров с экспериментальными данными была сформирована выборка исследований по данным испытаний различных авторов³.

Для наглядного примера результата расчета параметров напряженно-деформированного состояния рассмотрен внецентренно сжатый трубобетонный элемент со следующими характеристиками: диаметр трубы $D_p = 106$ мм, толщина стенки трубы $t_p = 3$ мм, эксцентриситет приложения продольного сжимающего усилия $e_0 = 100$ мм, сопротивление стали $f_y = 288$ МПа, сопротивление бетона $f_c = 16,8$ МПа. Экспериментально полученное значение предельного усилия $N_u^{exp} = 115$ кН. В результате расчета по нелинейной деформационной модели с использованием аппроксимации диаграммы деформирования бетона с ниспадающей ветвью (по рисунку 1, а) получено: усилие образования трещин $N_{cr} = 31,8$ кН, несущая способность $N_u^{th} = 98,9$ кН, максимальное значение относительных деформаций бетона сердечника и стали трубы при сжатии $\varepsilon_u = 339,7 \cdot 10^{-5}$, что превышает значения, соответствующие началу текучести стали трубы $\varepsilon_y = 144 \cdot 10^{-5}$ и вершины диаграммы деформирования бетона при сжатии $\varepsilon_{cl} = 168 \cdot 10^{-5}$.

При выполнении расчетов с использованием аппроксимации диаграммы деформирования бетона без ниспадающей ветви (по рисунку 1, б) получено: усилие образования трещин $N_{cr} = 38,1$ кН, несущая способность $N_u^{th} = 101$ кН, максимальное значение относительных деформаций бетона сердечника и стали трубы при сжатии $\varepsilon_u = 391 \cdot 10^{-5}$. Графическая интерпретация полученных результатов теоретического расчета приведена на рисунках 3–5.

Таким же образом были выполнены расчеты внецентренно сжатых трубобетонных элементов на результатах экспериментальных исследований из сформированной выборки. Сопоставление результатов нелинейного расчета приведено в таблице 1.

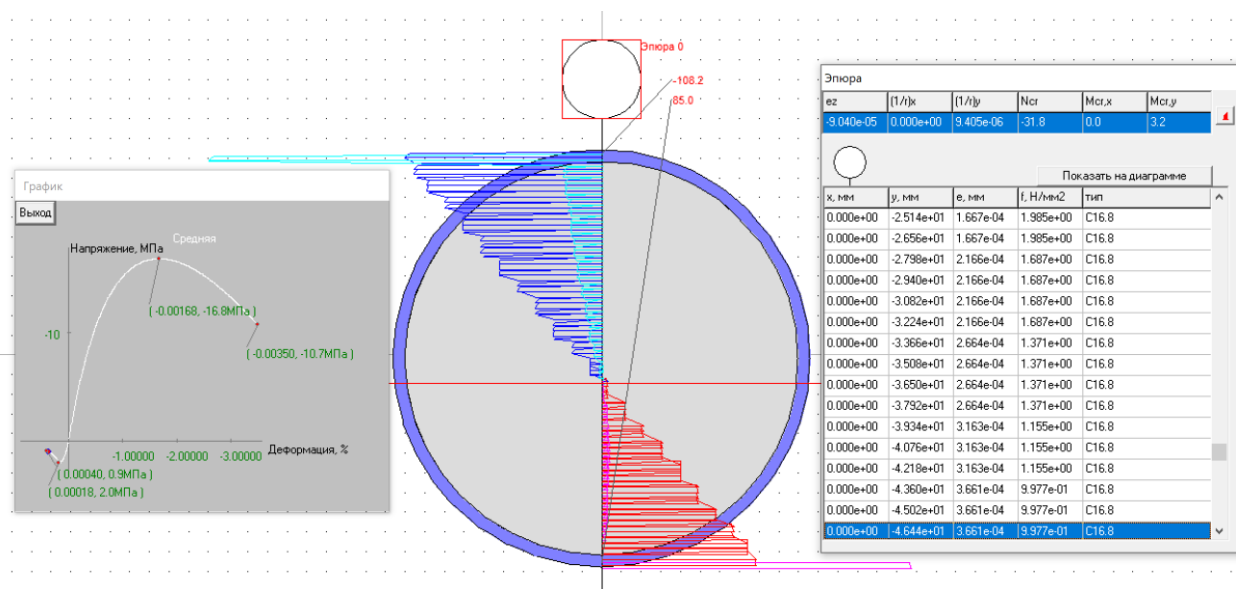


Рисунок 3. – Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению внецентренно сжатого трубобетонного элемента на стадии образования трещин при N_{cr} (цифры справа от сечения – нормальные напряжения в МПа)

³ Сагдатов А.И. Напряженно-деформированное состояние сжатых трубобетонных элементов с внутренним стальным сердечником: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Магнитогорск, 2006. – 180 л.

Кузнецов К.С. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром из высокопрочного бетона: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Магнитогорск, 2007 – 151 л.

Стороженко Л.И. Объемное напряженно-деформированное состояние железобетона с косвенным армированием: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01. – Кривой Рог, 1984. – 587 л.

Шабров В.Л. Прочность трубобетонных элементов диаметром 500 мм и более при внецентренном сжатии: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – М.: НИИЖБ, 1988. – 253 л.

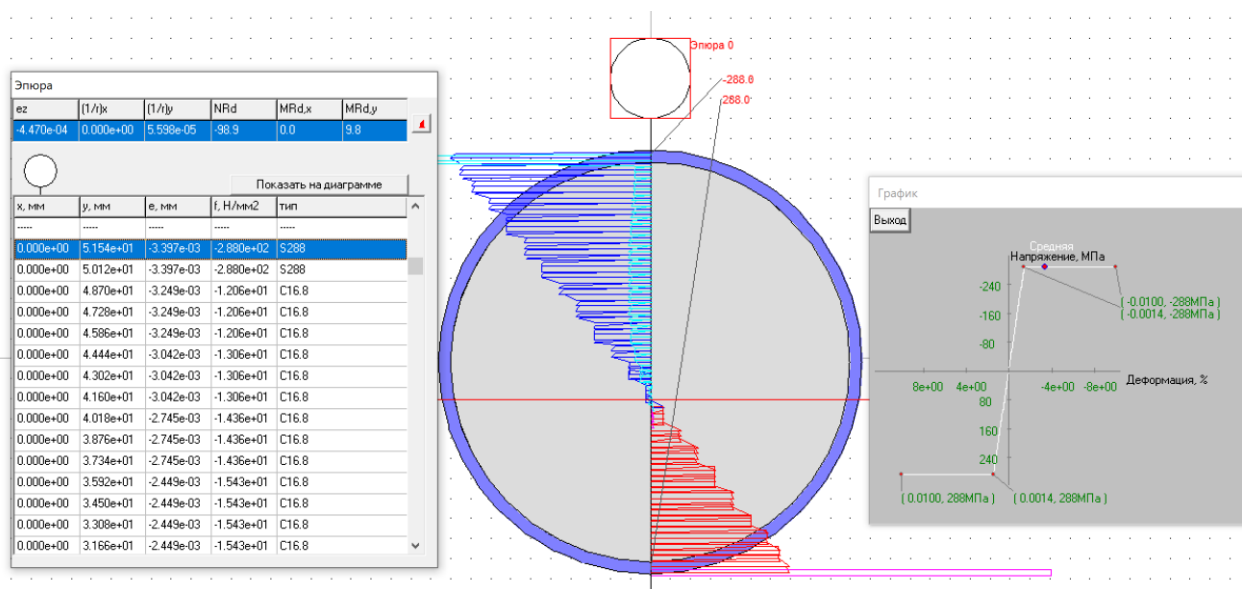
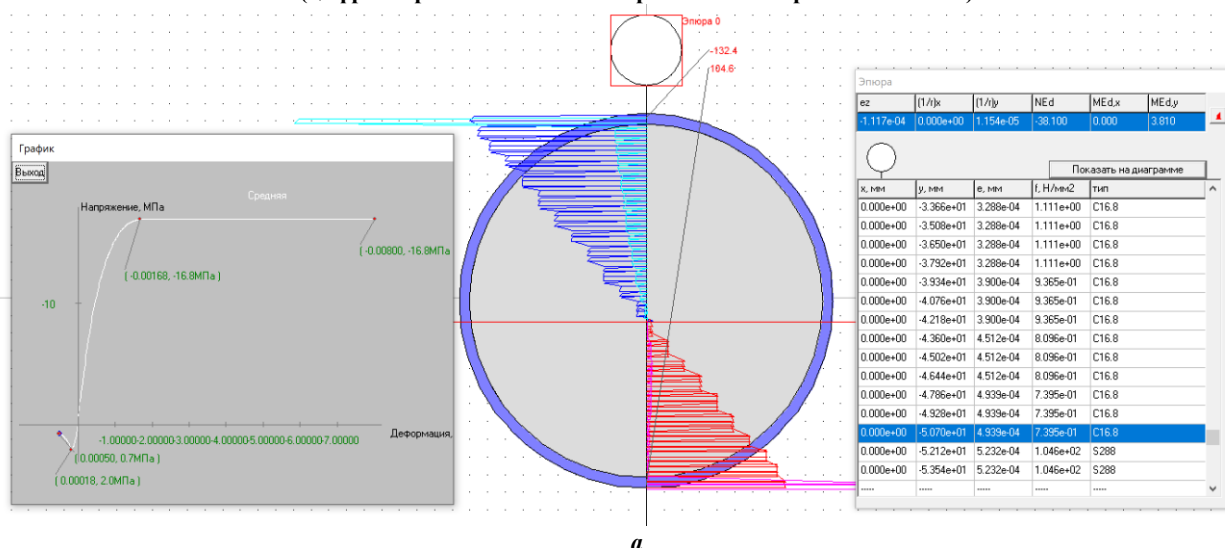
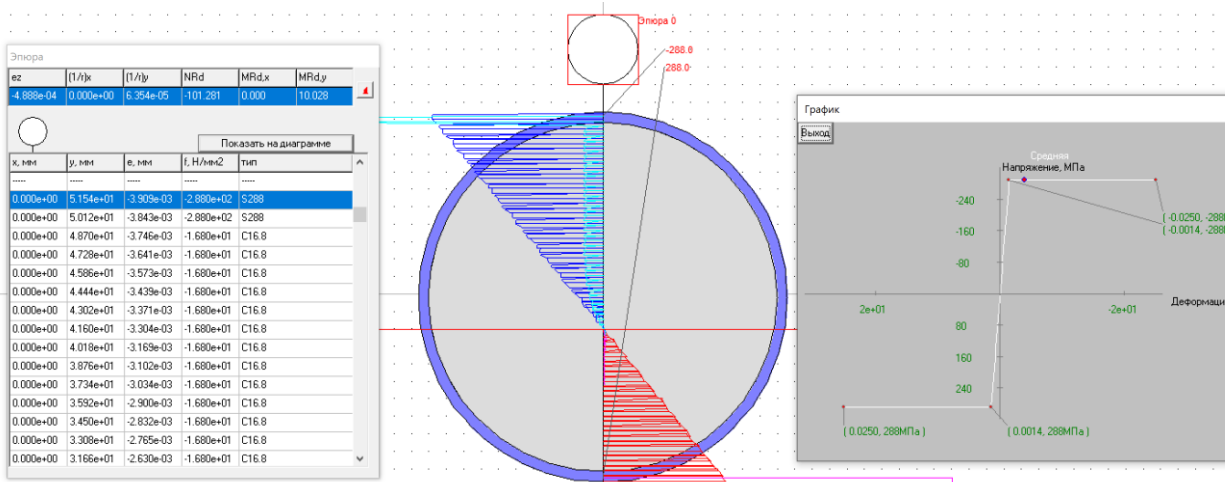


Рисунок 4. – Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению внецентренно сжатого трубобетонного элемента в предельном по прочности состоянии при N_u (цифры справа от сечения – нормальные напряжения в МПа)



а



б

Рисунок 5. – Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению внецентренно сжатого трубобетонного элемента на стадии образования трещин при N_{cr} (а) и в предельном по прочности состоянии при N_u (б) (цифры справа от сечения – нормальные напряжения в МПа)

Таблица 1. – Сопоставление результатов нелинейного расчета предельного усилия с экспериментальными данными из сформированной выборки

№ п/п	Автор	$\frac{e_0}{D_p}$	D_p , мм	t_p , мм	f_b , МПа	f_{sp} , МПа	f_c , МПа	f_{op} , МПа	Диаграмма бетона с ниспадающей ветвью				Диаграмма бетона с горизонтальным участком			
									$\varepsilon_u \cdot 10^{-5}$	N_u^{exp} , кН	N_u^{th} , кН	$\frac{N_u^{exp}}{N_u^{th}}$	$\varepsilon_u \cdot 10^{-5}$	N_u^{exp} , кН	N_u^{th} , кН	$\frac{N_u^{exp}}{N_u^{th}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	А.И. Сагатов	0,06	159	6	295	257	22	51,4	277,2	1406	1377,6	1,02	2217	1406	1447	0,97
2		0,13	159	6	295	295	22,5	22,5	346	1210	953,2	1,27	2405	1210	977	1,24
3		0,26	159	6	295	295	24,2	24,2	396,2	932	730,7	1,28	2150	932	791	1,18
4		0,06	159	6	295	257	32,1	59,2	256,7	1559	1473,1	1,06	2430	1559	1561	1,0
5		0,13	159	6	295	295	32,8	32,8	335	1412	1040,7	1,35	2194	1412	1126	1,25
6		0,26	159	6	295	295	35,1	35,1	331,9	1066	816,7	1,31	1680	1066	895	1,19
7		0,06	219	8	290	256	32,5	54,3	260,5	2921	2480,2	1,18	2440	2921	2624	1,11
8		0,13	219	8	290	290	30,5	30,5	319,5	2698	1709,1	1,58	1990	2698	1820	1,48
9		0,26	219	8	290	290	32,1	32,1	347,4	1962	1334,4	1,47	1790	1962	1459	1,34
10		0,06	219	8	290	253	46,1	71	249,4	3308	2867,9	1,15	2513	3308	3094	1,07
11	К.С. Кузнецов	0,13	219	8	290	290	43,4	43,4	295,2	3041	1974,2	1,54	2130	3041	2138	1,42
12		0,26	219	8	290	290	45,6	45,6	315,5	2289	1506,4	1,52	1823	2289	1692	1,35
13		0,125	159	6	440	440	38,9	38,9	334,7	1774	1403,8	1,26	2422	1774	1527	1,16
14		0,25	159	6	440	440	41,6	41,6	341,2	1346	1092,9	1,23	1938	1346	1252	1,08
15		0,375	159	6	440	440	38	38	418,8	1059	861,7	1,23	1750	1059	987	1,07
16		0,125	159	6	440	440	55,8	55,8	280,6	1842	1558	1,18	2354	1842	1750	1,05
17		0,25	159	6	440	440	57,5	57,5	294,1	1515	1173,3	1,29	1779	1515	1406	1,08
18		0,375	159	6	440	440	59	59	308,8	1238	927,2	1,33	1717	1238	1134	1,09
19		0,125	106	4	435	435	40,5	40,5	295,5	849	608,4	1,4	2333	849	758	1,12
20		0,25	106	4	435	435	41,2	41,2	365,9	633	477,4	1,33	2315	633	544	1,18
21	Л.И. Стороженко	0,375	106	4	435	435	37,4	37,4	395,2	468	372,1	1,26	1706	468	429	1,09
22		0,125	106	4	435	435	54,6	54,6	293,3	839	678,3	1,24	2410	839	752	1,11
23		0,25	106	4	435	435	58,2	58,2	297,1	691	515,7	1,34	1727	691	616	1,12
24		0,375	106	4	435	435	57,8	57,8	323,3	572	405,8	1,41	1547	572	491	1,16
25		0,09	106	3	288	267	16,8	27,8	322,5	400	382,2	1,05	2455	400	400	1,0
26		0,189	106	3	288	288	16,8	16,8	350	300	272,3	1,1	2314	300	290	1,03
27		0,283	106	3	288	288	16,8	16,8	423	270	230	1,17	1746	270	247	1,09
28		0,377	106	3	288	288	16,8	16,8	463,6	230	199,8	1,15	1403	230	212	1,02
29		0,472	106	3	288	288	16,8	16,8	439,7	200	174,7	1,14	754	200	182	1,1
30		0,943	106	3	288	288	16,8	16,8	339,7	115	98,9	1,16	391	115	101	1,14
31		0,376	133	4	288	288	16,8	16,8	479,4	480	386,9	1,24	1563	480	410	1,17
32		0,752	133	4	288	288	16,8	16,8	410	250	241,8	1,03	560	250	246	1,02

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
33	В.Л. Шабров	0,062	530	7,8	349,2	303	34,5	44,4	256,8	12500	11002	1,14	2151	12500	11566	1,08
34		0,125	530	7,8	349,2	346	34,5	35,1	297	10700	8357,9	1,28	1860	10700	8704	1,22
35		0,062	530	11,95	322,6	281	34,5	48,1	259	14500	12651	1,15	976	14500	13228	1,1
36		0,125	530	11,95	322,6	321	34,5	35	300,6	12500	9677,7	1,29	2138	12500	11698	1,07
37		0,064	630	6,6	303	264	25,6	31,5	272,1	12000	11316	1,06	2450	12000	11788	1,02
38		0,127	630	6,6	303	301	25,6	25,9	300,9	10500	8991,6	1,17	2272	10500	10855	0,97
39		0,064	630	9,8	311	271	34,9	43,3	263,5	17000	14920	1,14	2235	17000	15700	1,08
40		0,127	630	9,8	311	310	34,9	35,2	305,5	15000	11673	1,29	2016	15000	12590	1,19
41		0,063	720	7,7	395,4	344	28,3	35,6	267,1	18500	16768	1,1	2333	18500	17544	1,05
42		0,125	720	7,7	395,4	391	28,3	28,9	296,4	16000	13007	1,23	2346	16000	16021	1,0
43		0,063	720	9,6	315,6	274	28,3	35,6	265,2	18500	16645	1,11	2330	18500	17396	1,06
44		0,125	720	9,6	315,6	313	28,3	28,8	311,3	16000	13018	1,23	2150	16000	14020	1,14
45		0,063	720	11,74	274	239	28,3	36	269,8	19000	16828	1,13	2328	19000	17617	1,08
46		0,125	720	11,74	274	271	28,3	28,7	301,1	16650	13133	1,27	1996	16650	14081	1,18

Заключение. Нелинейными расчетами внецентренно сжатых трубобетонных элементов показана возможность применения аппроксимаций деформирования бетона при сжатии как с ниспадающей ветвью, так и с горизонтальной ветвью.

Результаты проведенного исследования выявили, что аппроксимация диаграммы деформирования бетона с горизонтальным участком, следующим за пиковой точкой, позволяет получить параметры напряженно-деформированного состояния, в большей степени соответствующие экспериментальным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прочность изгибаемых трубобетонных элементов усовершенствованной конструкции / А.Л. Кришан, В.И. Римшин, В.Д. Колесников и др. // Стр-во и реконструкция. – 2024. – № 6(116). – С. 37–47. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-37-47.
2. Прочность центрально сжатых трубобетонных элементов усовершенствованной конструкции / А.Л. Кришан, В.И. Римшин, М.А. Астафьева // Стр-во и реконструкция. – 2018. – № 3(77). – С. 12–21.
3. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика. – М.: АСВ, 2020. – 322 с.
4. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. Самозаклинивающиеся элементы в трубобетонных колоннах // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 3. – С. 140–148. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-140-148.
5. Прочность коротких трубобетонных колонн квадратного сечения / Римшин В.И., Анпилов С.М., Кришан А.Л. и др. // Русский инженер. – 2023. – № 2(79). – С. 46–48.
6. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А., Сагадатов А.И., Семенова М.Н., Ступак А.А. Прочность и деформативность сжатых трубобетонных элементов квадратного сечения // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2022. – № 6(1054). – С. 16–18.
7. Кришан А.Л., Суровцов М.М. Экспериментальные исследования прочности гибких трубобетонных колонн // Вестн. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2013. – № 1(41). – С. 90–92.
8. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns / M. Ahmed, Q.Q. Liang, V.I. Patel et al. // Thin-Walled Structures. – 2019. – № 138. – P. 105–116. DOI: 10.1016/j.tws.2019.02.001.
9. Residual Axial Bearing Capacity of Concrete-Filled Circular Steel Tubular Columns (CFCSTCs) after Transverse Impact / G. Du, A. Andjelic, Z. Li et al. // Applied Sciences. – 2018. – № 8(5). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/5/793/htm> (дата обращения 16.12.2024).
10. Ge H.B., Usami T. Strength analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns // Journal of Constructional Steel Research. – 1994. – Vol. 30, № 3. – P. 259–281. DOI: 10.1016/0143-974X(94)90003-5.
11. Han L.-H., Lam D., Nethercot D. Design Guide for Concrete-filled Double Skin Steel Tubular Structures. – London: CRC Press, 2018. – 125 p. DOI: 10.1201/9780429440410.
12. Hassanein M.F., Elchalakani M., Patel V.I. Overall buckling behaviour of circular concrete-filled dual steel tubular columns with stainless steel external tubes // Thin-Walled Structures. – 2017. – № 115(10). – P. 336–348. DOI: 10.1016/j.tws.2017.01.035.
13. Kibriya T. Performance of Concrete Filled Steel Tubular Columns // American Journal of Civil Engineering and Architecture. – 2017. – Vol. 5, № 2. – P. 35–39.
14. O'Shea M.D., Bridge R.Q. Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes // Journal of Structural Engineering. – 2000. – Vol. 126, № 11. – P. 1295–1303. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:11(1295).
15. Uy B., Tao Z., Han L.-H. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns // Journal of Constructional Steel Research. – 2011. – № 67(3). – P. 360–378. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.10.004.
16. Abed F.H., Abdelmageed Y.I., Ilgun A.K. Flexural response of concrete-filled seamless steel tubes // Journal of Constructional Steel Research. – 2018. – № 149. – P. 53–63. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.06.030.
17. Jiang A., Chen J., Jin W.L. Experimental investigation and design of thin-walled concrete-filled steel tubes subject to bending // Thin-Walled Structures. – 2013. – № 63. – P. 44–50. DOI: 10.1016/j.tws.2012.10.008.
18. Gho W.M., Liu D. Flexural behavior of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow sections // Journal of Constructional Steel Research. – 2004. – № 60(11). – P. 1681–1696. DOI: 10.1016/j.jcsr.2004.03.007.
19. Flexural behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube / G. Li, D. Liu, Z. Yang et al. // Journal of Constructional Steel Research. – 2017. – № 128. – P. 732–744. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.10.007.
20. Further Study on the Flexural Behavior of Concrete-filled Steel Tubes / L.-H. Han, H. Lu, G.-H. Yao et al. // Journal of Constructional Steel Research. – 2006. – № 62(6). – P. 554–565. DOI: 10.1016/j.jcsr.2005.09.002.
21. Al-Obaidi S., Salim T., Hemzah S.A. Flexural behavior of concrete filled steel tube composite with different concrete compressive strength // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2018. – № 9(7). – P. 824–832.
22. Xiong M.-X., Xiong D.-X., Liew J.Y.R. Flexural performance of concrete filled tubes with high tensile steel and ultra-high strength concrete // Journal of Constructional Steel Research. – 2017. – № 132. – P. 191–202. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.01.017.
23. Tomii M., Sakino K. Elasto-plastic behavior of concrete filled square steel tubular beam-columns // Transactions of the Architectural Institute of Japan. – 1979. – № 280. – P. 111–120.
24. Uy B. Strength of short concrete filled high strength steel box columns // Journal of Constructional Steel Research. – 2001. – № 57(2). – P. 113–134. DOI: 10.1016/S0143-974X(00)00014-6.
25. Flexural performance of rectangular CFST members / R. Wang, L.-H. Han, J.-G. Nie et al. // Thin-Walled Structures. – 2014. – № 79. – P. 154–165. DOI: 10.1016/j.tws.2014.02.015.
26. Арленинов П.Д., Крылов С.Б., Смирнов П.П. Расчетно-экспериментальные исследования изгибаемых трубобетонных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 4. – С. 34–38.
27. Хазов П.А., Помазов А.П. Экспериментальное исследование продольного и поперечного изгиба трубобетонных стержней // Жилищное строительство. – 2023. – № 12. – С. 66–71. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-66-71.
28. Якупова Л.З., Астанков К.Ю., Овчинников И.Г. О возможности применения свода правил СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» для проектирования трубобетонных конструкций в малом мостостроении // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – № 2. – С. 112–121.

29. Deng Y.-Q., Huang Y., Young B. Design of concrete-filled high-strength steel RHS and SHS tubes under bending // *Engineering Structures*. – 2024. – Vol. 320. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118891.
30. Попов И.П. Повышение несущей способности балки // *Вестн. Инженерной школы Дальневосточного федерального ун-та*. – 2024. – № 3(60). – С. 96–101. DOI: 10.24866/2227-6858/2024-3/96-101.
31. Повышение нагрузочной способности трубобетонной балки / И.Г. Овчинников, Д.Н. Парышев, А.В. Ильяков и др. // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. – 2019. – № 4. – С. 58–66.
32. Исследование напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов строительных конструкций из трубобетона / О.Е. Сысоев, С.В. Макаренко, А.Ю. Добрышкин и др. // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 94–99.
33. Упругопластическое деформирование сталебетонных балок с локальным смятием при трехточечном изгибе / П.А. Хазов, О.И. Ведяйкина, А.П. Помазов и др. // *Проблемы прочности и пластичности*. – 2024. – Т. 86, № 1. – С. 71–82. DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-1-71-82.
34. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Трулль В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. – М.: Стройиздат, 1974. – 144 с.
35. О работе сталежелезобетонных конструкций при внецентренном сжатии / Д.В. Конин, А.С. Крылов, Д.Н. Гаврилов и др. // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2023. – № 12. – С. 31–37. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.31-37.
36. 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.
37. 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. 14–18. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-14-18.
38. Определение напряженно-деформированного состояния коротких внецентренно-сжатых трубобетонных колонн методом конечных элементов путём сведения трёхмерной задачи к двумерной / В.С. Чепурненко, Б.М. Языев, П.М. Урвачёв и др. // *Строительство и архитектура*. – 2020. – Т. 8, № 4. – С. 87–94. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-4-87-94.
39. Кришан А.Л., Сагатов А.И., Мельничук А.С. Реализация нелинейной деформационной модели при расчете прочности трубобетонных колонн // *Предотвращение аварий зданий и сооружений*. – 2010. – № 10. – С. 635–643.
40. Кришан А.Л. Диаграммный расчет прочности трубобетонных колонн // *Междунар. науч.-практ. конф. «Инженерные системы – 2011»*: тез. докл., Москва, 05–08 апр. 2011 г. / Под общ. ред. С.Н. Кривошапко. – М.: Рос. ун-т дружбы народов, 2011. – С. 79.
41. Кришан А.Л., Трошкина Е.А., Кузьмин А.В. Предложения по расчету прочности трубобетонных колонн // *Вестн. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова*. – 2011. – № 1(33). – С. 66–69.
42. Ведерникова А.А., Опбул Э.К. Расчет несущей способности внецентренно сжатых трубобетонных элементов с учетом нелинейных диаграмм материалов // *Вестн. гражданских инженеров*. – 2021. – № 1(84). – С. 36–45. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-36-45.
43. Ведерникова А.А. Совершенствование методики расчета трубобетонных элементов обратным численно-аналитическим методом и ее применение // *Инженерный вестн. Дона*. – 2023. – № 11. – С. 437–449.
44. Астанков К.Ю. Анализ современных подходов к проектированию и строительству арочных мостов с использованием трубобетона // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. – 2023. – Т. 10, № 4. – DOI: 10.15862/11SATS423.
45. 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.
46. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов // *Вестн. МГСУ*. – 2024. – Т. 19, № 9. – С. 1469–1483. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483.
47. Нелинейный расчет изгибаемых сталежелезобетонных элементов / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, А.М. Хаткевич и др. // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр.-во. Прикладные науки*. – 2024. – № 2(37). – С. 9–23. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23.
48. Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Колтунов А.И., Хаткевич А.М. Нелинейный расчет трубобетонных элементов с круглыми трубами при изгибе // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр.-во. Прикладные науки*. – 2024. – № 3(38). – С. 2–11. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-38-3-2-11.
49. Лазовский Д.Н., Хаткевич А.М., Глухов Д.О. Нелинейная деформационная модель в расчете внецентренно сжатых трубобетонных элементов // *Стр.-во и реконструкция*. – 2024. – № 6(116). – С. 48–59. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-48-59.

REFERENCES

1. Krishan, A.L., Rimshin, V.I., Kolesnikov, V.D., Astafeva, M.A. & Likhid'ko, M.A. (2024). Prochnost' izgibaemykh trubobetonnykh elementov usovershenstvovannoi konstruktsii [Strength of bending concrete filled steel elements of improved design]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 6(116), 37–47. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-37-47.
2. Krishan, A.L., Rimshin, V.I. & Astafeva, M.A. (2018). Prochnost' tsentral'no szhatykh trubobetonnykh elementov usovershenstvovannoi konstruktsii [Strength of centrally compressed pipe elements of improved design]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 3(77), 12–21. (In Russ., in Engl.).
3. Krishan, A.L., Rimshin, V.I. & Astafeva, M.A. (2020). *Szhatye trubobetonnye elementy. Teoriya i praktika*. Moscow: ASV. (In Russ.).
4. Krishan, A.L., Rimshin, V.I. & Astafeva, M.A. (2023). Samozaklinivayushchiesya elementy v trubobetonnykh kolonnakh [Self-Locking Elements in Pipe-Concrete Columns]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]*, (3), 140–148. (In Russ., in Engl.). DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-140-148.
5. Rimshin, V.I., Anpilov, S.M., Krishan, A.L., Astafeva, M.A. & Stupak, A.A. (2023). Prochnost' korotkikh trubobetonnykh kolonn kvadratnogo secheniya [Strength of short concrete filled steel tube columns of square section]. *Russkii inzhener [Russian engineer]*, 2(79), 46–48. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Krishan, A.L., Rimshin, V.I., Astafeva, M.A., Sagatov, A.I., Semenova, M.N. & Stupak, A.A. (2022). Prochnost' i deformativnost' szhatykh trubobetonnykh elementov kvadratnogo secheniya. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki*, 6(1054), 16–18. (In Russ.).
7. Krishan, A.L. & Surovtsov, M.M. (2013). Eksperimental'nye issledovaniya prochnosti gibkikh trubobetonnykh kolonn [Experimental reserches of strength of flexible concrete-filled tube (CFT) columns]. *Vestn. Magnitogorskogo gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*, 1(41), 90–92. (In Russ., abstr. in Engl.).

8. Ahmed, M., Liang, Q.Q., Patel, V.I. & Hadi, M.N.S. (2019). Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns. *Thin-Walled Structures*, (138), 105–116. DOI: 10.1016/j.tws.2019.02.001
9. Du, G., Andjelic, A., Li, Z., Lei, Z. & Bie, X. (2018). Residual Axial Bearing Capacity of Concrete-Filled Circular Steel Tubular Columns (CFCSTCs) after Transverse Impact. *Applied Sciences*, 8(5). URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/5/793/htm>.
10. Ge, H.B. & Usami, T. (1994). Strength analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 30(3), 259–281. DOI: 10.1016/0143-974X(94)90003-5.
11. Han, L.-H., Lam, D., & Nethercot, D. (2018). *Design Guide for Concrete-filled Double Skin Steel Tubular Structures*. London: CRC Press. DOI: 10.1201/9780429440410.
12. Hassanein, M.F., Elchalakani, M. & Patel, V.I. (2017). Overall buckling behaviour of circular concrete-filled dual steel tubular columns with stainless steel external tubes. *Thin-Walled Structures*, 115(10), 336–348. DOI: 10.1016/j.tws.2017.01.035.
13. Kibriya, T. (2017). Performance of Concrete Filled Steel Tubular Columns. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5(2), 35–39.
14. O'Shea, M.D. & Bridge, R.Q. (2000). Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes. *Journal of Structural Engineering*, 126(11), 1295–1303. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:11(1295).
15. Uy, B., Tao, Z. & Han, L.-H. (2011). Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(3), 360–378. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.10.004.
16. Abed, F.H., Abdelmageed, Y.I. & Ilgun, A.K. (2018). Flexural response of concrete-filled seamless steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, (149), 53–63. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.06.030.
17. Jiang, A., Chen, J. & Jin, W.L. (2013). Experimental investigation and design of thin-walled concrete-filled steel tubes subject to bending. *Thin-Walled Structures*, (63), 44–50. DOI: 10.1016/j.tws.2012.10.008.
18. Gho, W.M. & Liu, D. (2004). Flexural behavior of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(11), 1681–1696. DOI: 10.1016/j.jcsr.2004.03.007.
19. Li, G., Liu, D., Yang, Z. & Zhang, C. (2017). Flexural behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube. *Journal of Constructional Steel Research*, (128), 732–744. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.10.007.
20. Han, L.-H., Lu, H., Yao, G.-H. & Liao, F. (2006). Further Study on the Flexural Behavior of Concrete-filled Steel Tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(6), 554–565. DOI: 10.1016/j.jcsr.2005.09.002.
21. Al-Obaidi, S., Salim, T. & Hemzah, S.A. (2018). Flexural behavior of concrete filled steel tube composite with different concrete compressive strength. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(7), 824–832.
22. Xiong, M.-X., Xiong, D.-X. & Liew, J.Y.R. (2017). Flexural performance of concrete filled tubes with high tensile steel and ultra-high strength concrete. *Journal of Constructional Steel Research*, (132), 191–202. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.01.017.
23. Tomii, M. & Sakino, K. (1979). Elasto-plastic behavior of concrete filled square steel tubular beam-columns. *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, (280), 111–120.
24. Uy, B. (2001). Strength of short concrete filled high strength steel box columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 57(2), 113–134. DOI: 10.1016/S0143-974X(00)00014-6.
25. Wang, R., Han, L.-H., Nie, J.-G. & Zhao, X.-L. (2014). Flexural performance of rectangular CFST members. *Thin-Walled Structures*, (79), 154–165. DOI: 10.1016/j.tws.2014.02.015.
26. Arleninov, P.D., Krylov, S.B. & Smirnov, P.P. (2017). Raschetno-eksperimental'nye issledovaniya izgibaemykh trubobetonnykh konstruksii [Calculation of the central and eccentrically compressed pipe-concrete structures strength]. *Seismostoikeye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], (4), 34–38. (In Russ., abstr. in Engl.).
27. Khazov, P.A. & Pomazov, A.P. (2023). Eksperimental'noe issledovanie prodol'nogo i poperechnogo izgiba trubobetonnykh sterzhnei [Experimental Study of Longitudinal and Transverse Bending of Pipe Concrete Rods]. *Zhishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction], (12), 66–71. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.31659/0044-4472-2023-12-66-71.
28. Yakupova, L.Z., Astankov, K.Y., & Ovchinnikov, I.G. (2023). O vozmozhnosti primeneniya svoda pravil SP 266.1325800.2016 «Konstruksii stalezhelzobetonnye. Pravila projektirovaniya trubobetonnykh konstruksii v malom mostostroenii [The code of norms SP 266.1325800.2016 «Composite steel and concrete structures. Design rules» applicability for the low-span bridges made of concrete-filled steel tubes design]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport facilities. Ecology], (2), 112–121. (In Russ., abstr. in Engl.).
29. Deng, Y.-Q., Huang, Y. & Young, B. (2024). Design of concrete-filled high-strength steel RHS and SHS tubes under bending. *Engineering Structures*, 320. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118891.
30. Popov, I.P. (2024). Povyshenie nesushchei sposobnosti balki [Increasing the load-bearing capacity of the beam]. *Vestn. Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo un-ta [FEFU: School of Engineering Bulletin]*, 3(60), 96–101. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.24866/2227-6858/2024-3/96-101.
31. Ovchinnikov, I.G., Paryshev, D.N., Il'yakov, A.V., Moiseev, O.Y., Kharin, V.V., Popov, I.P. & Kharin, D.A. (2019). Povyshenie nagruzochnoi sposobnosti trubobetonnoi balki [Increasing the load capacity of a concrete beam]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport facilities. Ecology], (4), 58–66. (In Russ., abstr. in Engl.).
32. Sysoev, O.E., Makarenko, S.V., Dobryshkin, A.Y. & Kuznetsov, E.A. (2015). Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya izgibaemykh elementov stroitel'nykh konstruksii iz trubobetona. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 1(3), 94–99. (In Russ.).
33. Khazov, P.A., Vedyakina, O.I., Pomazov, A.P. & Kozhanov, D.A. (2024). Uprugoplasticheskoe deformirovanie stalebetonnykh balok s lokal'nym smyatiem pri trekhtochesnom izgibe [Elastic-plastic deformation of steel-concrete beams with local crumpling during three-point bending]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity], 86(1), 71–82. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-1-71-82.
34. Kikin, A.I., Sanzharovskii, R.S. & Trull', V.A. (1974). *Konstruksii iz stal'nykh trub, zapolnennykh betonom*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
35. Konin, D.V., Krylov, A.S., Gavrilo, D.N., Zhdanova, A.A. & Voropaeva, M.I. (2023). O rabote stalezhelzobetonnykh konstruksii pri vneshennem szhatii. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, (12), 31–37. (In Russ.). DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.31-37.
36. Khazov, P.A., Sitnikova, A.K. & Chibakova, E.A. (2023). Raschet trubobetonnykh konstruksii: sovremennoe sostoyanie voprosa i perspektivy dal'neishikh issledovaniy (obzor) [Calculation of pipe-concrete structures: the current state of the issue and prospects for further research (review)]. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal], (4), 57–76. (In Russ., abstr. in Engl.).

37. Khashkhozhev, K.N. & Avakov, A.A. (2021). Raschet tsentral'no szhatykh trubobetonnykh kolonn kol'tsevogo secheniya s uchetoм fizicheskoi nelineinosti [Calculation of centrally compressed concrete filled steel tubular columns of annular section taking into account physical nonlinearity]. *Stroitel'stvo i arkhitektura [Construction and Architecture]*, 9(3), 14–18. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-14-18.
38. Chepurmenko, V.S., Yazyev, B.M., Urvachev, P.M. & Avakov, A.A. (2020). 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 [Construction and Architecture]*, 8(4), 87–94. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-4-87-94.
39. Krishan, A.L., Sagadatov, A.I. & Mel'nychuk, A.S. (2010). Realizatsiya nelineinoi deformatsionnoi modeli pri raschete prochnosti trubobetonnykh kolonn. *Predotvrashchenie avarii zdaniy i sooruzheniy*, (10), 635–643. (In Russ.).
40. Krishan, A.L. (2011). Diagrammnyi raschet prochnosti trubobetonnykh kolonn. In S.N. Krivoshapko (Eds.) *Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Inzhenernye sistemy – 2011»: tez. dokl.*, Moskva, 05–08 apr. 2011 g. (79). Moscow: Ros. un-t družby narodov. (In Russ.).
41. Krishan, A.L., Troshkina, E.A. & Kuz'min, A.V. (2011). Predlozheniya po raschetu prochnosti trubobetonnykh kolonn. *Vestn. Magnitogorskogo gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova*, 1(33), 66–69. (In Russ.).
42. Vedernikova, A.A. & Opubl, E.K. (2021). Raschet nesushchei sposobnosti vnetsentrenno szhatykh trubobetonnykh elementov s uchetoм nelineinykh diagramm materialov [Bearing capacity calculation of eccentrically compressed concrete filled steel tube columns taking into account non-linear diagrams of materials]. *Vestn. grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 1(84), 36–45. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-36-45.
43. Vedernikova, A.A. (2023). Sovershennstvovanie metodiki rascheta trubobetonnykh elementov obratnym chislenno-analiticheskim metodom i ee primenenie. *Inzhenernyi vestn. Dona*, (11), 437–449. (In Russ.).
44. Astankov K.Y. (2023). Analiz sovremennykh podkhodov k proektirovaniyu i stroitel'stvu arochnykh mostov s ispol'zovaniem trubobetona [Analysis of modern approaches to the design and construction of arch bridges using tube-reinforced concrete]. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya» [Russian Journal of Transport Engineering]*, 10(4). (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.15862/11SATS423.
45. Krishan, A. L. & Narkevich, M. Y. (2012). Analiz sushchestvuyushchikh metodik rascheta vnetsentrenno szhatykh trubobetonnykh kolonn gorodskikh sooruzheniy i zdaniy. *Predotvrashchenie avarii zdaniy i sooruzheniy*, (1), 1–5. (In Russ.).
46. Lazovskii, D.N., Gil', A.I. & Glukhov, D.O. (2024). Deformatsionnyi podkhod k raschetu soprotivleniya szhatiyu stalezhelezobetonnym elementam [Deformation approach to the calculation of compressive strength of steel-reinforced concrete elements]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, 19(9), 1469–1483. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483.
47. Lazovskii, D.N., Glukhov, D.O., Khatkevich, A.M., Gil', A.I. & Chaparanga, E. (2024). Nelineinyi raschet izgibaemykh stalezhelezobetonnym elementam [Nonlinear calculation of bent steel-reinforced concrete elements]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 2(37), 9–23. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23.
48. Lazovskii, D.N., Glukhov, D.O., Koltunov, A.I. & Khatkevich, A.M. (2024). Nelineinyi raschet trubobetonnykh elementov s kruglymi trubami pri izgibe [Nonlinear calculation of tubular concrete elements during bending]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 3(38), 2–11. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.52928/2070-1683-2024-38-3-2-11.
49. Lazovskii, D.N., Khatkevich, A.M. & Glukhov, D.O. (2024). Nelineinaya deformatsionnaya model' v raschete vnetsentrenno szhatykh trubobetonnykh elementov [Nonlinear deformation model in the analysis of eccentrically compressed concrete-filled steel tube elements]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 6(116), 48–59. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.33979/2073-7416-2024-116-6-48-59.

Поступила 26.12.2024

APPROXIMATIONS OF CONCRETE DEFORMATION DIAGRAMS IN THE NONLINEAR CALCULATION OF NON-CENTRALLY COMPRESSED TUBULAR CONCRETE ELEMENTS

D. LAZOUSKI¹⁾, D. GLUKHOV²⁾, A. KHATKEVICH³⁾, A. KALTUNOU⁴⁾,

^(1), 3), 4) Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, ²⁾ LLC «SoftClub», Minsk)

The possibility of using some approximations of concrete deformation diagrams to calculate non-centrally compressed tubular concrete elements is considered. The results of nonlinear calculation of stress-strain state parameters are compared with experimental data from the formed sample of studies. Approximation of the concrete deformation diagram with a horizontal section following the peak point makes it possible to obtain stress-strain state parameters that are more consistent with experimental data.

Keywords: tube concrete element, nonlinear calculation, deformation diagram, diagram approximation.