



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

2016, ТОМ 22, НОМЕР 1, 5–22

УДК 624.014:621.315.1

(16)-0339-1

КОМПЛЕКС ЧИСЕЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ БАГАТОГРАННИХ ТРУБОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ЦЕНТРОВОМУ СТИСКУ

І. М. Гаранжа¹, А. В. Танасогло², Ж. М. Войтова³, С. В. Гаранжа⁴

Донбаська національна академія будівництва і архітектури,

2, вул. Державіна, м. Макіївка, 86123.

E-mail: ¹ garigo@mail.ru, ² a.v.tan@mail.ru, ³ jnv2002@mail.ru, ⁴ bilichenko90@mail.ru

Отримана 27 листопада 2015; прийнята 22 січня 2016.

Анотація. У статті коротко розглянуто питання актуальності створення багатограних трубобетонних конструкцій (МТБ), пов'язане з можливістю їх застосування в міському будівництві як споруд, що відповідають підвищеним сучасним вимогам до їхньої естетики та низького землевідводу. Оговорені особливості створення розрахункової кінцево-елементної моделі таких конструкцій в ANSYS, які полягають у можливості моделювання нелінійних матеріалів, врахування контактної взаємодії між ними, використання спеціальних типів кінцевих елементів, що дозволяють максимально коректно чисельно описувати роботу конструкцій під навантаженням, а також принципів введення обмежень ступенів свободи моделі. Описані аналітичні способи визначення параметрів нелінійності використовуваних матеріалів, а також фізико-механічних характеристик бетону, що працює в стиснутих умовах. На конкретних прикладах чисельно визначена і проаналізована зміна несучої здатності МТБ при різних умовах зчеплення матеріалів (коефіцієнт тертя μ варіювався в межах 0,1...0,6), а також зміна рівня внеску сталі і бетону в сумарну несучу здатність композитної конструкції в цілому. Проаналізована «уніфікована» аналітична методика визначення несучої здатності МТБ із вказівкою ступеня мінливості граничного стискального навантаження залежно від варіювання кількості граней і товщини металеві стінки багатогранної моделі.

Ключові слова: багатогранні композитні конструкції, бетон, що самоущільнюється, центровий стиск, несуча здатність, нелінійність матеріалу, ізотропне зміцнення сталі, модель Мандера, критерії пластичності Друкера–Прагера, контакт між матеріалами, коефіцієнт тертя.

КОМПЛЕКС ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МНОГОГРАННЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ СЖАТИИ

И. М. Гаранжа¹, А. В. Танасогло², Ж. Н. Войтова³, С. В. Гаранжа⁴

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,

2, ул. Державина, г. Макеевка, 86123.

E-mail: ¹ garigo@mail.ru, ² a.v.tan@mail.ru, ³ jnv2002@mail.ru, ⁴ bilichenko90@mail.ru

Получена 27 ноября 2015; принята 22 января 2016.

Аннотация. В статье кратко рассмотрен вопрос актуальности создания многогранных трубобетонных конструкций (МТБ), связанный с возможностью их применения в городском строительстве в качестве сооружений, отвечающих повышенным современным требованиям к их эстетике и низкому землеотводу. Оговорены особенности создания расчетной конечно-элементной модели таких конструкций в ANSYS, которые заключаются в возможности моделирования нелинейных материалов, учета контактного взаимодействия между ними, использования специальных типов конечных элементов, позволяющих максимально корректно численно описывать работу конструкций под нагрузкой, а также принципов введения ограничений степеней свободы модели. Описаны аналитические

способы определения параметров нелинейности используемых материалов, а также физико-механических характеристик бетона, работающего в условиях обжатия. На конкретных примерах численно определено и проанализировано изменение несущей способности МТБ при различных условиях сцепления материалов (коэффициент трения μ варьировался в пределах 0,1...0,6), а также изменение уровня вклада стали и бетона в суммарную несущую способность композитной конструкции в целом. Проанализирована «унифицированная» аналитическая методика определения несущей способности МТБ с указанием степени изменчивости предельной сжимающей нагрузки в зависимости от варьирования количества граней и толщины металлической стенки многогранной модели.

Ключевые слова: многогранные композитные конструкции, самоуплотняющийся бетон, центральное сжатие, несущая способность, нелинейность материала, изотропное упрочнение стали, модель Мандера, критерии пластичности Друкера–Прагера, контакт между материалами, коэффициент трения.

NUMERICAL RESEARCHES COMPLEX OF MULTIFACETED COMPOSITE ELEMENTS UNDER AXIAL COMPRESSION

Igor Garanzha ¹, Anton Tanasoglo ², Zhanna Voitova ³, Sofiia Garanzha ⁴

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

2, Derzhavina Str., Makiivka, 86123.

E-mail: ¹ garigo@mail.ru, ² a.v.tan@mail.ru, ³ jnv2002@mail.ru, ⁴ bilichenko90@mail.ru

Received 27 November 2015; accepted 22 January 2016.

Abstract. In the article the relevance of creating multifaceted pipe-concrete structures (MPCS), associated with the possibility of their use in urban construction as structures that meet high modern demands for their aesthetics and low land allocation has been considered. It has been given the features of a computational finite element model of such structures in ANSYS, which consist in the possibility of nonlinear materials simulation, taking into account contact interaction between them, the use of special types of finite elements that can help to correct numerically describe the structures work under load, and also the principles of the restrictions of degrees of freedom for a structural model. The analytical methods for determining the nonlinearity parameters of the used materials, as well as the physical and mechanical properties of a confined concrete have been described. At specific examples numerically it has been identified and analyzed the changing of MPCS load capacity under various conditions of materials adhesion (a friction coefficient μ varied in the range 0.1...0.6), and also the changing of steel and concrete deposit level to the total load capacity of the composite structure as a whole. It has been analyzed «the unified» analytical method for determination of the MPCS load capacity with indicating the degree of variability of the compressive limit load depending of the number of face variation and the thickness of a metal wall of the multifaceted model.

Keywords: multifaceted composite structures, self-compacting concrete, axial compression, load capacity, nonlinear material, steel isotropic hardening, Mander model, Criteria plasticity of Drucker–Prager, contact between materials, friction coefficient.

Введение

На сегодняшний день для башенных сооружений, расположенных в городских условиях, таких как низковольтные распределительные воздушные (ВЛ до 110 кВ), опоры мобильной и радиосвязи, осветительные опоры, опоры контактной сети городского электротранспорта и т. д., остро стоят вопросы эстетики и земельного использования [1–10, 42, 46]. Требования к

данным критериям строительных конструкций постоянно растут. Модифицированные композитные решения, о численном исследовании несущей способности которых пойдет речь в данной статье, рассматриваются как альтернатива существующим металлическим решетчатым, железобетонным, деревянным аналогам, а также конструкциям на основе пустотелых металлических многогранных стоек. Это позво-

лит привести вышеупомянутые городские сооружения в соответствие всем требованиям и одновременно повысить их несущую способность.

Следовательно, актуальными являются исследования, направленные на изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) композитных модификаций конструкций под различными типами нагрузок и воздействиями (центральное и внецентренное сжатие, изгиб, кручение, различные виды динамических воздействий). Также необходимо изучение таких эффектов, как усадка и ползучесть бетона, обжатого металлической трубой, что позволит повысить качество создаваемых конструкций, а также снизить их стоимость и трудоёмкость строительства. В статье рассмотрен вопрос, связанный с исследованием несущей способности многогранных трубобетонных стоек, заполненных самоуплотняющимся бетоном.

Состояние изученности трубобетонных конструкций

На сегодняшний день в мире проведен достаточно широкий спектр исследований, направленных на изучение поведения бетона, обжатого металлической оболочкой при различных видах напряженного состояния (центральное и внецентренное сжатие, изгиб, кручение и их комбинации). К таковым следует отнести:

- обзорные исследования литературных источников, целью которых является определение степени изученности трубобетонных конструкций;
- численный анализ (с применением современных конечно-элементных программно-вычислительных комплексов) напряженно-деформированного состояния тонкостенных оболочек [20–32], а также НДС бетона в условиях обжатия [33–38];
- численные исследования, направленные на изучение особенностей совместной работы стали и бетона в составе композитной конструкции (в том числе и многогранной), с целью разработки аналитических методик расчета несущей способности при сжатии [8–19, 40–52];
- экспериментальные исследования (натурные и лабораторные), в процессе которых,

используя методы нагрузочных испытаний, определены характер разрушения, несущая способность и особенности НДС трубобетонных конструкций при различных силовых воздействиях [40, 41, 53–58].

Особенностью работы (процесс и результаты которой описываются в данной статье), отличающей ее от работ предыдущих исследований, является рассмотрение вопроса, связанного с численным изучением несущей способности многогранных композитных конструкций (основанных на уже апробированных в практике металлических многогранных труб) с использованием нетрадиционного вида бетона (самоуплотняющегося) и учетом контакта между материалами.

Цель и задачи исследований

Целью исследований является численное изучение особенностей работы многогранных трубобетонных конструкций при центральном сжатии с применением самоуплотняющегося бетона, учётом вариации их геометрических параметров, марок и классов материалов, а также условий контакта между сталью и бетоном.

Для достижения поставленной цели решены следующие *задачи*:

- выбраны законы физически нелинейной работы стали и бетона в составе композитной конструкции, позволяющие максимально корректно моделировать работу трубобетонных элементов под нагрузкой;
- для проведения численных исследований созданы расчетные конечно-элементные модели стоек МТБ в ANSYS с учетом вариации геометрических параметров, механических характеристик материалов и условий их контактного взаимодействия;
- определена и проанализирована изменчивость несущей способности МТБ, что позволило определить влияние условий сцепления материалов на несущую способность конструкций;
- проанализирована «унифицированная» аналитическая методика определения несущей способности многогранных и цилиндрических ($n = \infty$) трубобетонных конструкций, в результате определены изменения значения несущих способностей конструкций

в зависимости от варьирования количества граней n , толщины трубы t , а также механических характеристик материалов.

Предмет и объект исследования

Предмет исследования – несущая способность и параметры напряженно-деформированного состояния металлических многогранных стоек, заполненных самоуплотняющимся бетоном.

Объект исследования – металлические многогранные стойки, заполненные самоуплотняющимся бетоном.

Особенности создания конечно-элементной модели композитной конструкции

Наиболее популярными отечественными программными комплексами для расчета строительных конструкций методом конечных элементов (МКЭ) являются «Structural CAD» (SCAD) и «Lira Soft», из которых более предпочтительной для научных исследований, направленных на учет физически нелинейного характера работы стали, является Lira. Но ни один из вышеупомянутых комплексов не позволяет в полной мере моделировать контактное взаимодействие между сталью и бетоном при их совместной работе в составе рассматриваемых композитных конструкций, что не дает возможности исследователю корректно создать численное описание НДС с помощью МКЭ. Кроме того, отечественные МКЭ комплексы не позволяют моделировать работу бетона как нелинейного материала, что, безусловно, снижает качество получаемых результатов.

Принимая во внимание вышеупомянутые несовершенства комплексов SCAD и Lira, для проведения численных исследований многогранных трубобетонных элементов (МТБ) выбрана система конечно-элементного анализа ANSYS, имеющая в своем арсенале все необходимые инструменты для учета особенностей контактного взаимодействия между составляющими композитной конструкции, а также дающая возможность моделировать физически нелинейный характер работы бетона.

При создании расчетных моделей МТБ в ANSYS варьировались следующие параметры:

- класс прочности бетона на сжатие (B20...B45);
- марка стали (С235, С275);
- количество граней трубобетонных элементов ($n = 6, 8, 12$);
- толщина стенки многогранной трубы ($t = 3, 5$ и 8 мм).

При этом высота $h = 500$ мм и диаметр описанной окружности $d = 200$ мм для всех моделей принимались постоянными.

Для моделирования физически нелинейного характера работы стали использовался закон ее изотропного упрочнения, реализованный в виде билинейной и мультгилинейной аппроксимации диаграмм деформирования стали (кривая Рамберга–Осгуда), приведенных на рис. 1.

Бетон, как нелинейный материал, моделировался путем введения в исходные данные для расчета критериев пластичности Друкера–Прагера (угол внутреннего трения φ и когезия c), вычисленные на основании данных, получен-

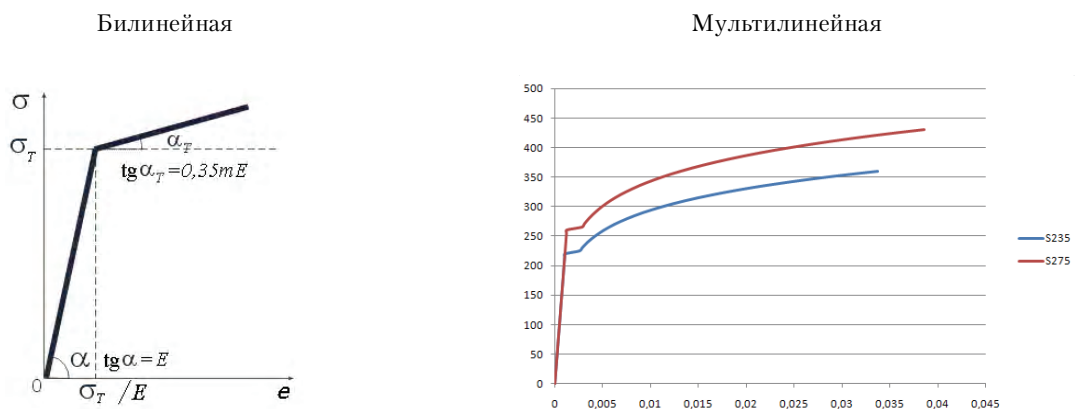


Рисунок 1. Методы аппроксимации кривых деформирования стали.

ных по кривой (модели) деформирования Мандера (рис. 2), для бетона, обжатого металлической оболочкой, по формулам (1) и (2) соответственно:

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{3}{1 + 2 \frac{f_{cc}}{f_c}} \right); \quad (1)$$

$$c = f_{cc} - 5\sqrt{3} \cdot \left(\frac{3 - \sin \varphi}{6 \cos \varphi} \right). \quad (2)$$

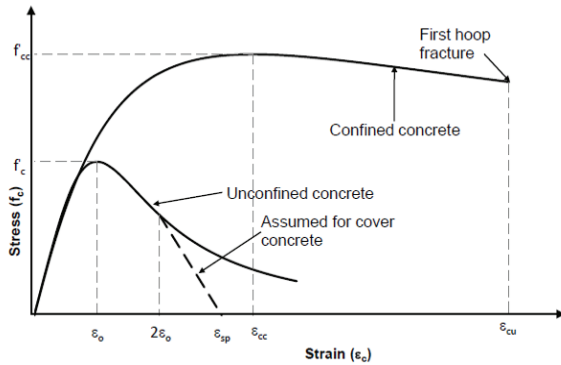


Рисунок 2. Модель деформирования Мандера для бетона [33, 34]: f_{cc} – расчетное сопротивление сжатию бетона в трубе; f_c – расчетное сопротивление сжатию бетона без обжатия металлической оболочкой; ε_0 – деформация, соответствующая f_c ; ε_{cc} – деформация, соответствующая f_{cc} .

Алгоритм определения физико-механических характеристик, необходимых для построения кривой Мандера [33, 34] и вычисления критериев пластичности бетона Друкера–Прагера [59–62] для МТБ, сформулирован в выражениях (3)–(10).

$$f_{cc} = f_c \left(-1,254 + 2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94 f'_i}{f_c} - 2 \frac{f'_i}{f_c}} \right), \quad (3)$$

где f_c – призмная (цилиндрическая) прочность бетона, принятая из нормативных данных [64] или полученная экспериментальным путем;

f'_i – напряжение в бетоне, возникающее вследствие бокового обжатия металлической трубой и определяемое по формуле (4):

$$f'_i = k_e p_s f_y, \quad (4)$$

где k_e – коэффициент эффективности обжатия бетона многогранной трубой (при использовании в составе композитной конструкции круглой трубы k_e принимается равным 1);

$p_s = A_s / A_c$ – отношение площадей поперечных сечений стальной трубы к бетону;

f_y – расчетное сопротивление стали по пределу текучести, принятое согласно [63] или полученное из экспериментальных данных.

Коэффициент k_e определяется с помощью выражения (5):

$$k_e = \frac{n^2 - 4}{n^2 + 20}, \quad (5)$$

где n – количество граней металлической трубы (при расчете композитных конструкций на основе круглых труб принимается $n = \infty$). Деформация бетона ε_{cc} , соответствующая этапу появления напряжений, равных расчетному сопротивлению обжатого бетона f_{cc} , вычисляется согласно выражению (6):

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right], \quad (6)$$

где $\varepsilon_{c0} = 0,002$ – деформация свободного (необжатого) бетона, соответствующая расчетному сопротивлению f_c .

Тангенциальный модуль упругости необжатого бетона принимается по результатам механических испытаний либо определяется по формуле (7):

$$E_c = 4700 \dots 5000 \sqrt{f_c}. \quad (7)$$

Модуль упругости обжатого бетона необходимо определять согласно выражению (8):

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}}. \quad (8)$$

На основании результатов вычислений физико-механических характеристик бетона построена кривая деформирования Мандера для обжатого бетона многогранной оболочкой при различных ее геометрических характеристиках и вариацией марок стали и классов бетона. На рис. 3 приведена рассматриваемая кривая на примере МТБ с фиксированными геометрическими параметрами, количеством граней трубы $n = 6$, маркой стали С235 и классом прочности

самоуплотняющегося бетона В20 (расчетная характеристика f_c принята по результатам механических испытаний образцов самоуплотняющегося бетона).

На рис. 3 введены две характеристики, описывающие предельную прочность обжатого бетона при сжатии [33–38]:

f_{cu} – временное сопротивление (предел прочности) бетона в металлической трубе;

ε_{cu} – деформации бетона, соответствующие его временному сопротивлению.

Согласно закону деформирования бетона Мандера вышеупомянутые характеристики определяются по формулам (9) и (10):

$$f_{cu} \approx 0,85f_{cc}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_{cu} = 5\varepsilon_{cc}. \quad (10)$$

Для создания расчетной модели МТБ элемента в ANSYS использованы следующие типы конечных элементов (рис. 4) [43–52]:

- для стали Solid 185 (шестигранный восьмиузловой 3D-элемент для моделирования объемных конструкций. Обладает тремя степенями свободы в каждом узле (линейные перемещения X, Y, Z). Имеет свойства пластичности, гиперупругости, ползучести, больших перемещений и деформаций);
- для бетона Solid 65 (шестигранный восьмиузловой 3D-элемент для моделирования объемных бетонных или железобетонных

тел, имеющий возможность образования трещин при растяжении и дробления при сжатии).

Для моделирования контактного взаимодействия элементов композитной конструкции по типу «поверхность к поверхности» использовались специальные конечные элементы CONTA 173 и TARGE 170 [65]. В данном случае КЭ типа CONTA присвоен контактирующей (деформируемой) поверхности, а TARGET – поверхности проникновения, которая относится к материалу, жесткость которого больше. Следовательно, внутренняя грань стальной трубы – это деформируемая поверхность (контактирующая), а внутренняя поверхность бетонного ядра – проникающая.

В качестве ограничений степеней свободы в расчет вводились жесткое закрепление узлов, расположенных в основании моделей. Сжимающая нагрузка моделировалась не путем приложения направленных сил к поверхности модели, а с помощью заданного перемещения вдоль вертикальной оси конструкций для узлов, расположенных на поверхности бетона. Создавалось оно путем объединения перемещений каждого отдельного узла верхней плоскости бетонного ядра (сжатие прикладывалось непосредственно к бетону). В результате определялись опорные реакции центральных узлов бетонной составляющей, расположенных в ос-

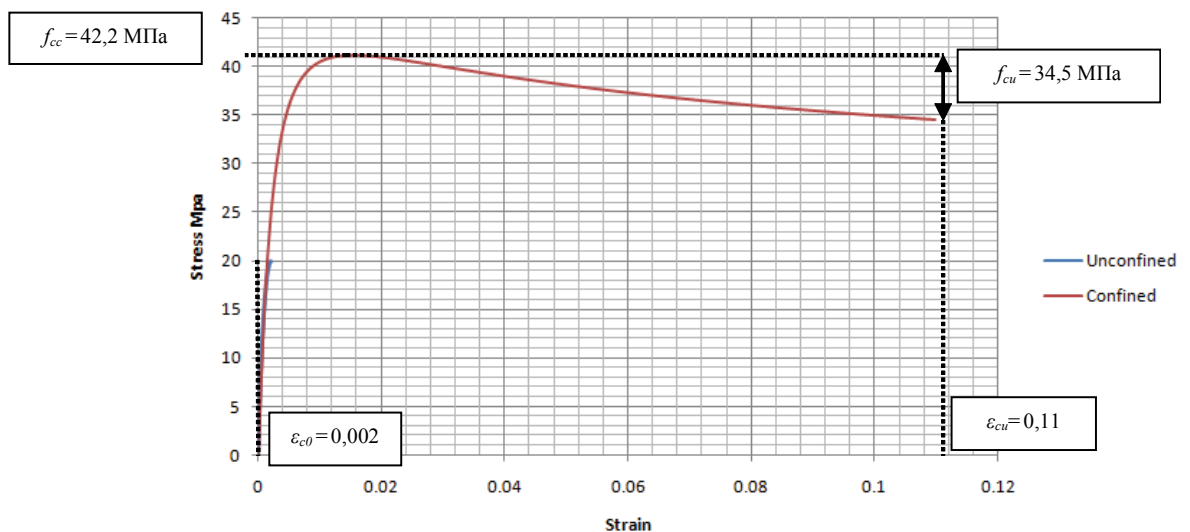


Рисунок 3. Кривая деформирования Мандера для обжатого многогранной трубой бетона ($n = 8$): confined – обжатый бетон, unconfined – свободный бетон (без обжатия металлической трубой).

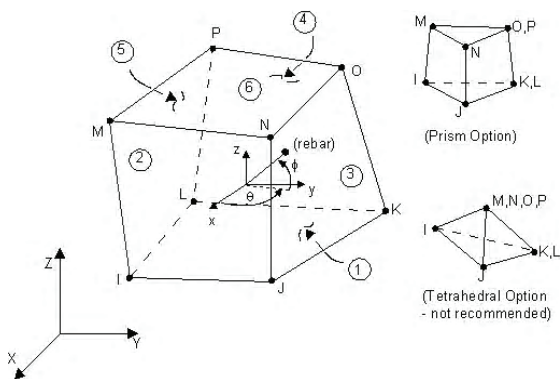


Рисунок 4. Геометрическая форма КЭ Solid [43–52].

новании моделей, которые численно равны значению критической силы и интерпретировались как несущая способность многогранных трубобетонных элементов при центральном сжатии. Для снижения времени расчета использовалась $\frac{1}{4}$ трубобетонной модели.

На рис. 5 представлены конечно-элементные модели многогранной трубы, заполненной бетоном с использованием «упорядоченного» типа создания КЭ сетки.

На рис. 6 и 7 приведены результаты расчета в ANSYS многогранной ($n = 6$) и круглой тру-

бобетонных моделей в виде цветowych мозаик распределения основных параметров НДС: продольных и поперечных деформаций, главных и эквивалентных напряжений.

Анализ полученных мозаик для деформаций, а также главных и эквивалентных напряжений многогранного и круглого трубобетона показал существенные расхождения не только в самом принципе распределения рассматриваемых параметров НДС, но и в их численных значениях. Это объясняется в первую очередь геометрическими особенностями поперечных сечений элементов.

На основании результатов, полученных в ANSYS, определена несущая способность ($N_{пред}$ – предельная сжимающая нагрузка, которую способен выдержать трубобетонный элемент) и параметры НДС многогранных трубобетонных стоек (главные и эквивалентные напряжения, осевые деформации) при различных условиях сцепления материалов (коэффициент трения μ варьировался в пределах 0,1...0,6). Проанализировано изменение несущей способности конструкции, применяя различные марки стали (С235, С275) и классы бетона (В20...В45). Основные результаты, на примере восьмигранной МТБ модели, приведены на рис. 8–12.

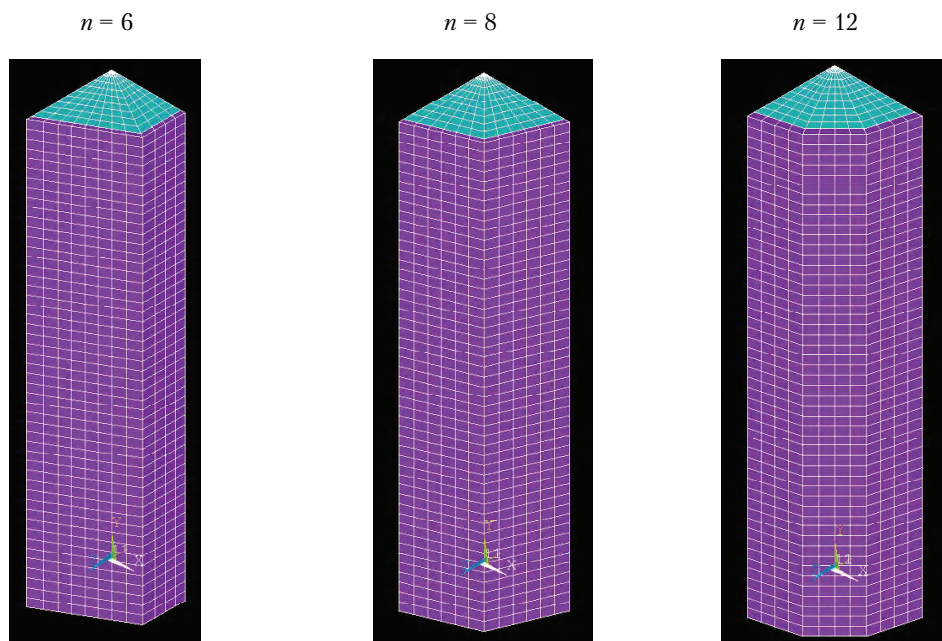


Рисунок 5. КЭ модели многогранного трубобетона.

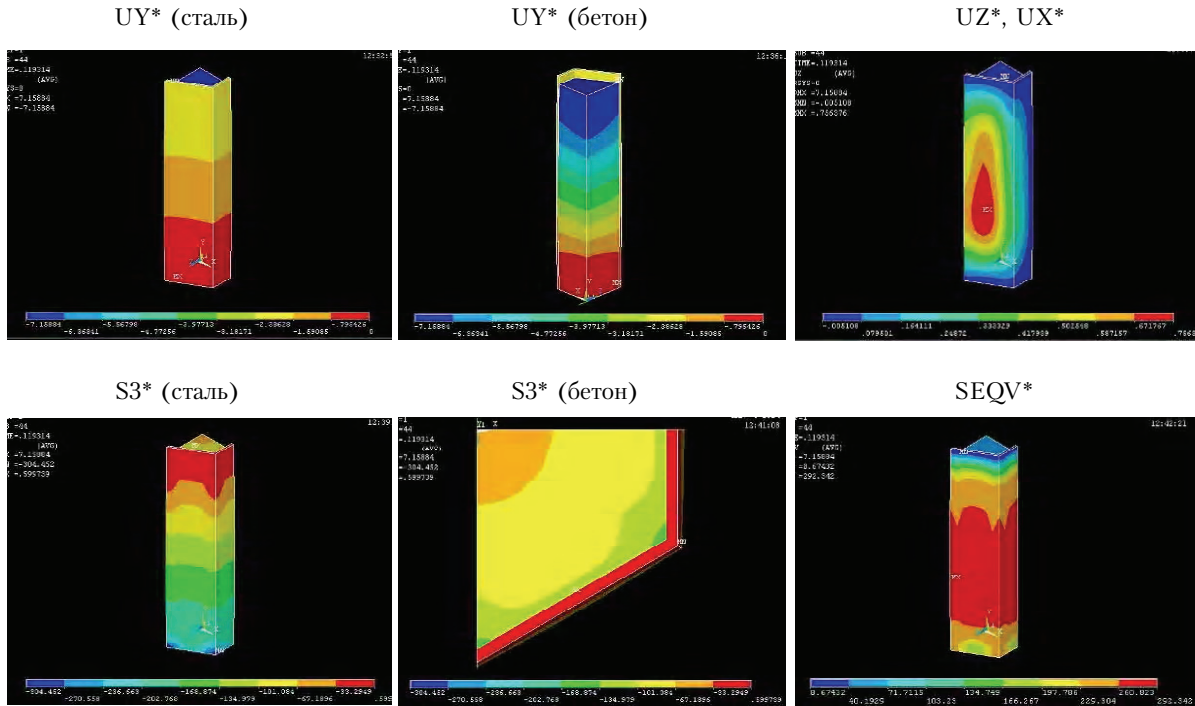


Рисунок 6. Картина распределения напряжений и деформаций конструкций для четверти шестигранной трубо-бетонной конструкции (ANSYS) при $\mu = 0,2$.

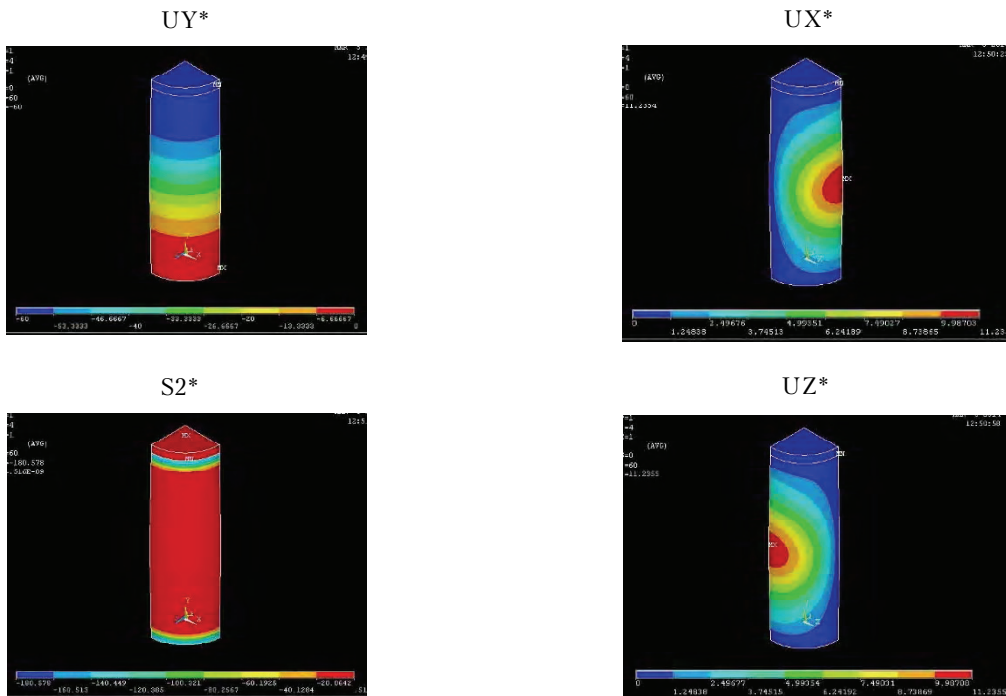


Рисунок 7. Картина распределения напряжений и деформаций конструкций для четверти круглой трубы (ANSYS).

На рис. 6 и 7 приняты следующие обозначения:

UX*, UY*, UZ* – деформации конструкций вдоль соответствующих осей;

S2*, S3* – главные напряжения в элементах конструкций в соответствующих направлениях;

SEQV* – эквивалентные напряжения по Мизесу (для стальных элементов).

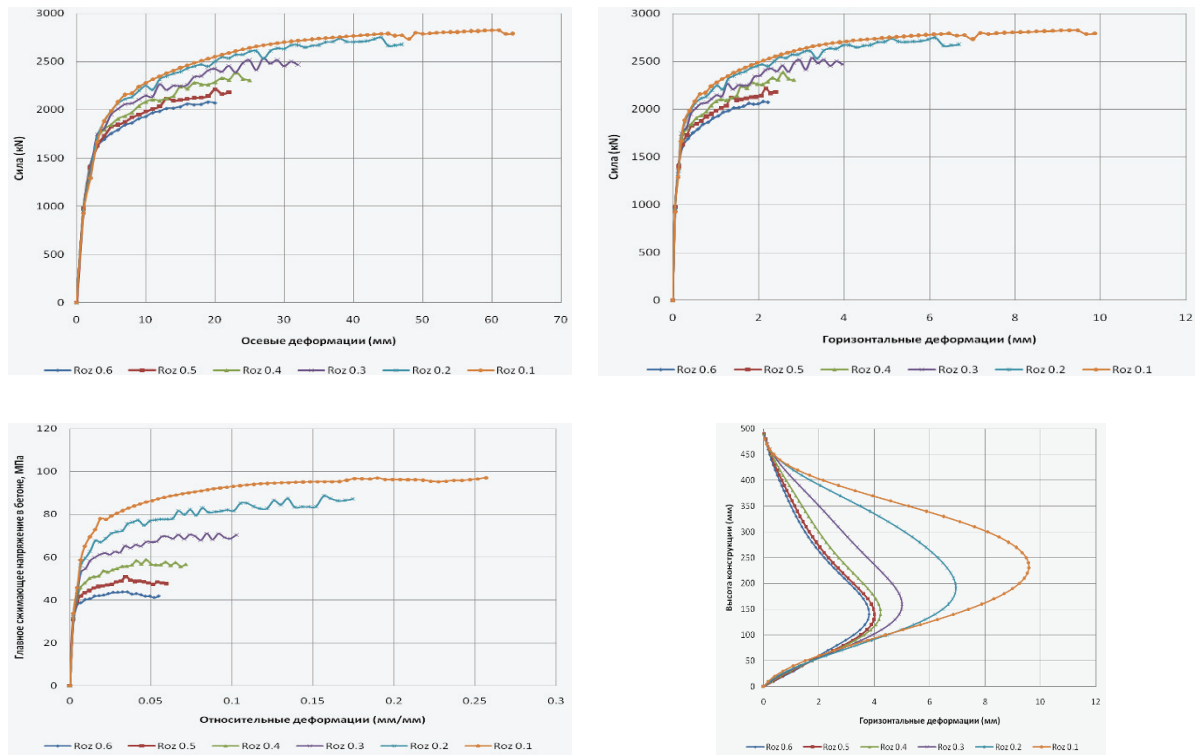


Рисунок 8. Изменение несущей способности и параметров НДС при $\mu = 0,1 \dots 0,6$ ($n = 8, R_y = 235$ МПа, $R_b = 25$ МПа).

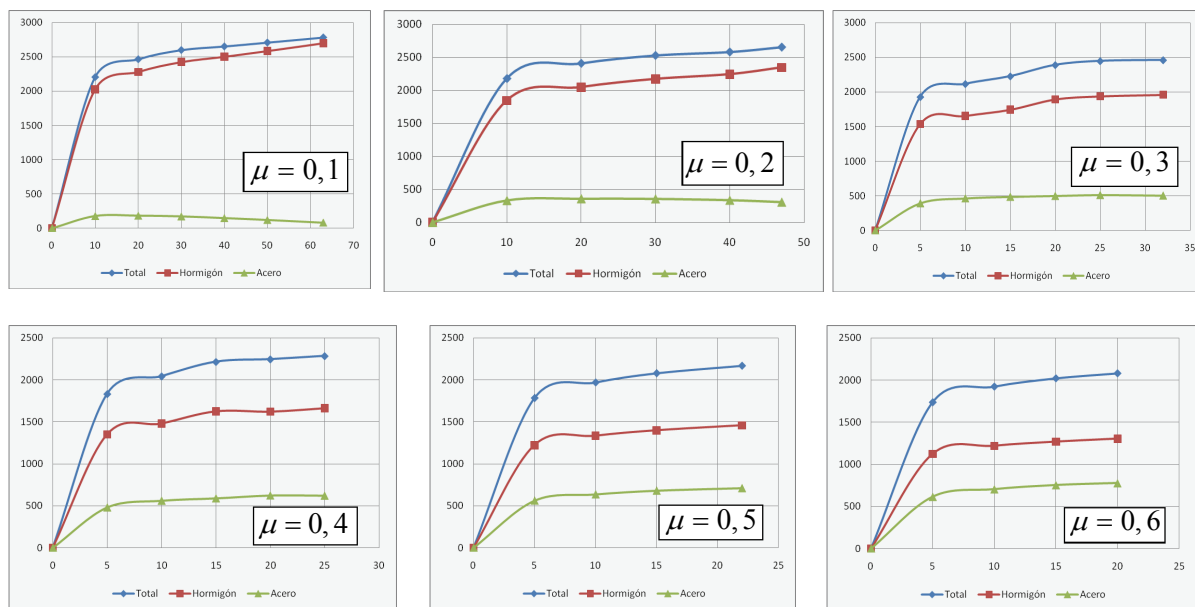


Рисунок 9. Изменение несущих способностей стали и бетона относительно суммарной несущей способности трубобетонной конструкции при $\mu = 0,1 \dots 0,6$ ($n = 8, R_y = 235$ МПа, $R_b = 25$ МПа).

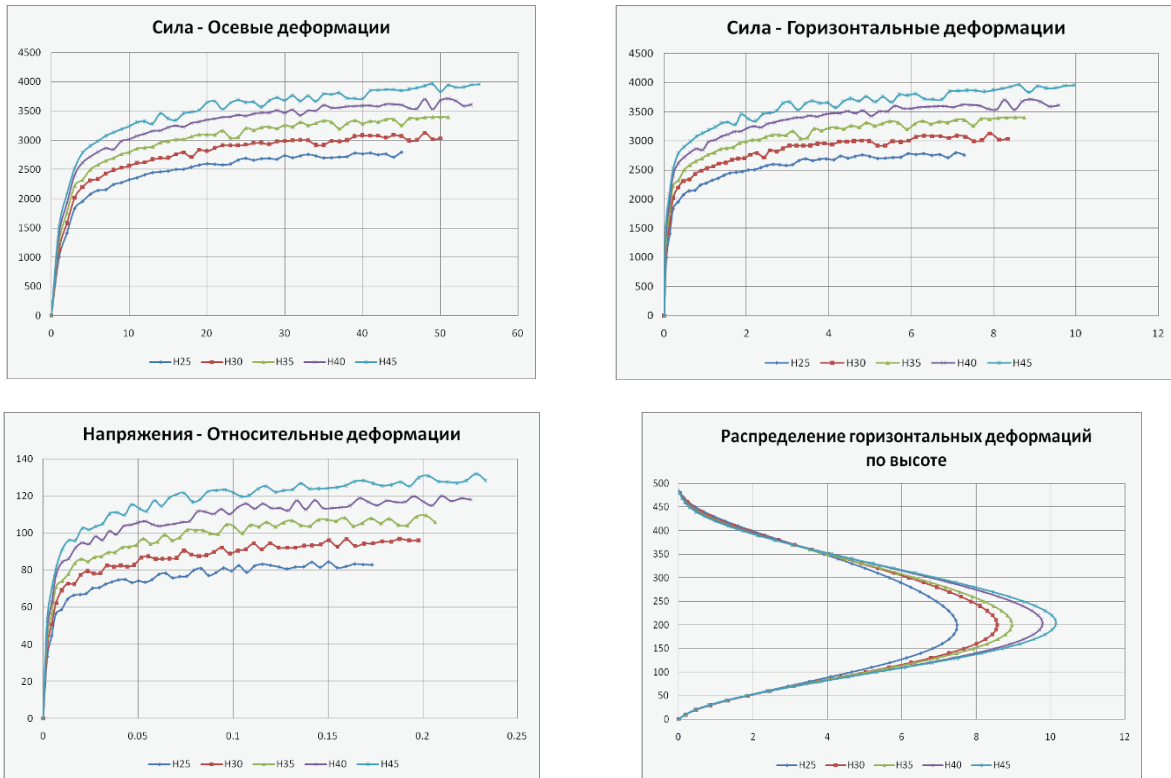


Рисунок 10. Изменение несущей способности и параметров НДС при вариации классов бетона ($n = 8$, $R_y = 235$ МПа).

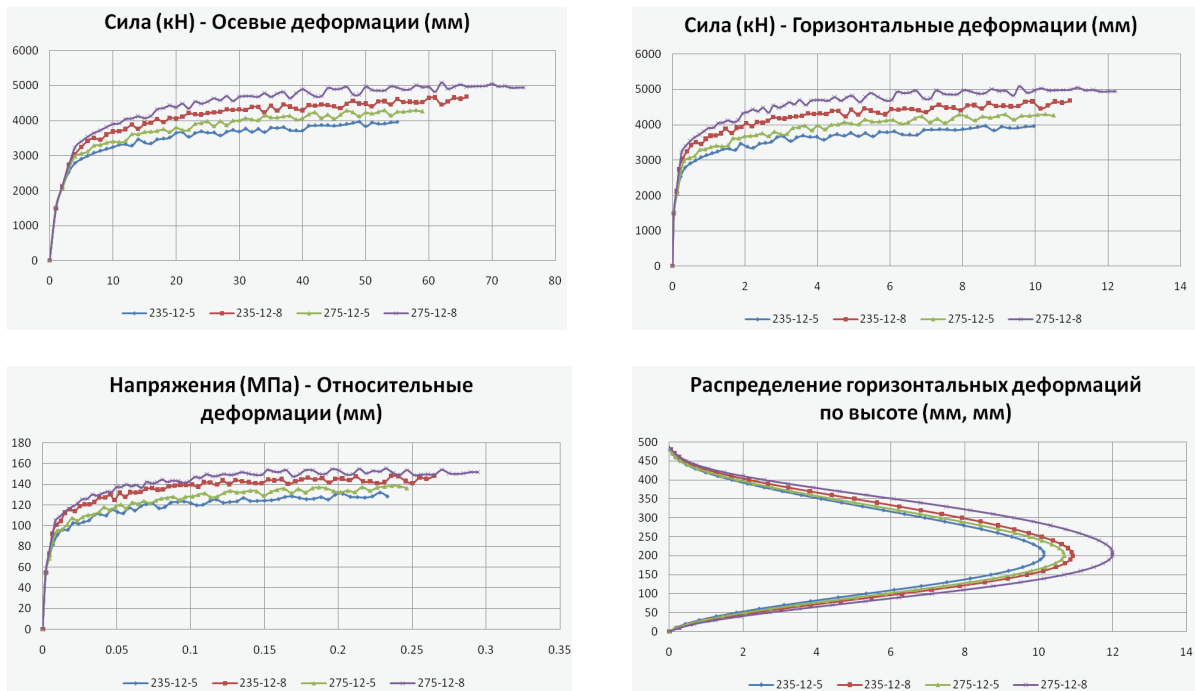


Рисунок 11. Изменение несущей способности и параметров НДС при вариации количества граней ($n = 8$ и 12), марки стали (С235, С275) и толщины трубы ($t = 5$ и 8 мм).

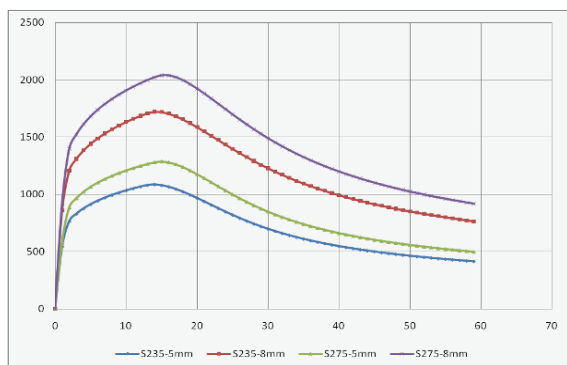


Рисунок 12. Несущая способность трубобетонной конструкции при изменении марки стали (С235, С275) и толщины трубы ($t = 5$ и 8 мм) при ($n = 8$, $R_b = 25$ МПа).

Анализ результатов, приведенных на рис. 7–12, показал:

- повышение несущей способности МТБ элементов (\approx на 30 %) при работе на сжатие вследствие уменьшения коэффициента трения между материалами μ от 0,6 до 0,1;
- при увеличении коэффициента μ от 0,1 до 0,6 вклад стальной трубы в общую несущую способность повышается, а бетонного ядра – снижается;
- рост несущей способности сжатых МТБ элементов (\approx на 40 %), принимая класс бетона

- в пределах В20...В45, при этом его призмная прочность увеличивается на 55 %;
- изменение марки стали с С235 на С275 при фиксированной толщине трубы, количестве граней в сечении и классе бетона повышает несущую способность МТБ (\approx на 6 %);
- увеличение толщины стенки многогранной трубы (при фиксированных материалах и остальных геометрических параметрах) повышает несущую способность МТБ (\approx на 10 %).

Помимо конечно-элементных исследований в данной работе проанализирована «унифицированная» аналитическая методика определения несущей способности многогранных (с количеством граней $n = 6...12, 14, 16, 18, 20$ и 24) и цилиндрических ($n = \infty$) трубобетонных конструкций [40, 41]. В результате анализа определены изменения значения несущих способностей конструкций в зависимости от варьирования количества граней n , толщины трубы t , а также марок стали и классов бетона. Выборочно данные по расчету 6- и 12-гранных трубобетонных элементов длиной $L = 500$ мм и диаметром описанной окружности $D = 200$ мм при различной толщине трубы приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, каждый добавленный миллиметр толщины стенки трубы увеличивает несущую способность в пределах 15...20 %. А

Таблица 1. Несущая способность многогранного трубобетона для $n = 6$ и 12 с различной толщиной трубы t (при использовании бетона В20 и стали С235), определенная по методике [40]

Количество граней, n	Толщина, t , мм	Несущая способность, N_y^* , кН	$\Delta = N_{yi} / N_{y(i-1)}$	Несущая способность, N_u^* , кН	$\Delta = N_{ui} / N_{u(i-1)}$
6	3	908,6	1,00	1 464,0	1,00
	4	1 051,0	1,16	1 680,7	1,15
	5	1 192,0	1,31	1 895,0	1,29
	6	1 331,1	1,47	2 107,1	1,44
	8	1 605,5	1,77	2 524,5	1,73
	10	1 874,0	2,07	2 932,0	2,00
12	3	1 107,7	1,00	1 766,8	1,00
	4	1 291,2	1,16	2 163,4	1,22
	5	1 472,9	1,33	2 621,2	1,48
	6	1 652,6	1,49	3 142,3	1,77
	8	2 006,3	1,81	4 383,5	2,48
	10	2 352,4	2,12	5 906,2	3,34

N_y^*, N_u^* – несущая способность (предельная нагрузка) по пределу текучести и временному сопротивлению.

при увеличении количества граней n с 6 до 12 для одинаковой толщины трубы вышеупомянутая характеристика увеличивается на 21...26 %.

В табл. 2 приведены результаты для анализа изменения несущей способности при постоянной высоте конструкции $L = 500$ мм и диаметре описанной окружности $D = 200$ мм, для толщины трубы $t = 3, 5$ и 8 мм и различном количестве граней n .

Из таблицы видно, что увеличение параметра n когда $t = \text{const}$ ведет к повышению несущей

способности конструкции от 12 до 32 % относительно минимального принятого значения $n = 6$. Но при этом с каждым последующим увеличением n уровень повышения несущей способности снижается относительно предыдущего количества граней, от 13 до 4 % по нелинейному закону, как показано на рис. 13. Кроме того, на данном рисунке графически представлено изменение несущей способности (по пределу текучести) рассматриваемых конструкций при вариации количества граней n и толщины стенки t . Данное изменение носит линейный характер.

Таблица 2. Несущая способность многогранного трубобетона для $t = 3, 5$ и 8 мм с различным количеством граней n (при использовании бетона В20 и стали С235), определенная по методике [40]

Толщина, t , мм	Количество граней, n	Несущая способность, N_y , кН	$\Delta = N_{yi} / N_{y(i-1)}$	Несущая способность, N_u , кН	$\Delta = N_{ui} / N_{u(i-1)}$
3	6	908,6	1,00	1 464,1	1,00
	8	1 017,1	1,12	1 636,8	1,12
	10	1 074,2	1,18	1 727,4	1,18
	12	1 107,7	1,22	1 766,8	1,21
	18	1 152,9	1,27	1 812,8	1,24
5	6	1 191,8	1,00	1 895,0	1,00
	8	1 343,6	1,13	2 133,7	1,13
	10	1 424,8	1,20	2 261,2	1,19
	12	1 472,9	1,24	2 621,2	1,38
	18	1 538,2	1,29	2 689,5	1,42
8	6	1 605,5	1,00	2 524,5	1,00
	8	1 820,6	1,14	2 859,8	1,13
	10	1 937,1	1,21	3 041,0	1,21
	12	2 006,3	1,25	4 383,5	1,74
	18	2 101,1	1,31	4 497,6	1,78

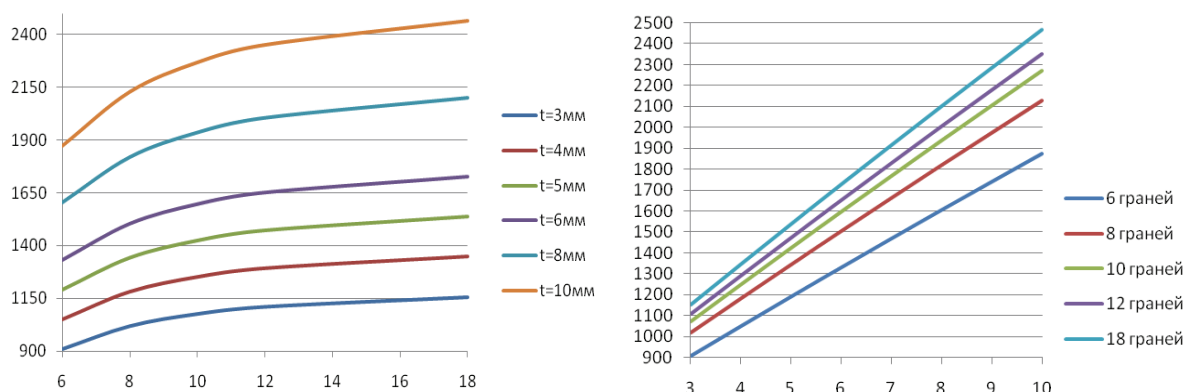


Рисунок 13. Изменение несущей способности многогранных трубобетонных конструкций при вариации геометрических параметров.

Вывод

В результате проведенной работы, с целью численно исследовать работу МТБ при центральном сжатии, рассмотрены некоторые особенности создания расчетной модели в системе конечно-элементного анализа ANSYS, используя

законы деформирования стали и бетона. Определены уровни изменчивости их несущей способности, что в комплексе позволит проектировщикам такого рода выйти на качественно новый уровень при создании сооружений на основе трубобетонных элементов.

Литература

1. Гаранжа, І. М. Напружено-деформований стан металевих багатограничних стоек з урахуванням особливостей вітрового впливу [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / Гаранжа Ігор Михайлович ; Донбаська національна академія будівництва і архітектури. – Макіївка, 2012. – 20 с.
2. Горохов, Е. В. Перспективные направления повышения эффективности работы воздушных линий электропередачи в Украине [Текст] / Е. В. Горохов, В. Н. Васылев, И. М. Гаранжа, А. А. Лещенко // Металлические конструкции. 2013. Т. 19, № 2. С. 67–80.
3. Гаранжа, І. М. Модифіцировані опори воздушних ліній електропередачі на основі металевих багатограничних стоек [Текст] / І. М. Гаранжа // Воздушні лінії. Санкт-Петербург, 2013. № 3(12). С. 15–20.
4. Гаранжа, І. М. Ефективні електросетеві конструкції на основі багатограничних трубобетонних стоек [Текст] / І. М. Гаранжа // Сучасні будівельні конструкції з металу і дерева: Збірник наукових праць. Одеса, 2013. № 17. С. 45–50.
5. Duvanova, I. Composite columns in a construction of tall buildings and structures [Текст] / I. Duvanova, I. Salmanov // Construction of Unique Buildings and Structures. 2014. № 6(21). P. 89–103.
6. Shaohuay, Ts. A new application experience of concrete-filled tubes in China [Текст] / Ts. Shaohuay // Concrete & Reinforcement Concrete. 2001. № 3. P. 20–24.
7. Cai, S. H. Modern Street Tube Confined Concrete Structures [Текст] / S. H. Cai. – China: Communication Press, 2003. – 358 p.
8. Johnson, R. S. Concrete-Filled Steel Tubes [Текст] / R. S. Johnson // Composite Structures of steel and Concrete. 1984. Vol. 1, Chapter 5. P. 171–177.
9. Стороженко, Л. І. Сталезалізобетонні конструкції [Текст] / Л. І. Стороженко, О. В. Семко, В. Ф. Пенц. – Полтава : ПолНТУ, 2005. – 182 с.
10. Стороженко, Л. І. Трубобетонні конструкції [Текст] / Л. І. Стороженко. – К. : Будівельник, 1978. – 80 с.
11. Стороженко, Л. І. Расчет трубобетонных конструкций [Текст] / Л. І. Стороженко, П. І. Пла-

References

1. Garanzha, I. M. Strain-stress behavior of metal multifaceted down gates taking into account characteristic properties of air influence: Author's abstract thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering. Makiyivka, 2012. 20 p. (in Ukrainian)
2. Gorokhov, Yevgen; Vasylev, Volodymyr; Garanzha, Igor; Leshchenko, Olexandr. The perspective directions of increase overhead power lines performance efficiency in Ukraine. In: *Metal Constructions*, 2013, Volume 19, Volume 2, pp. 67–80. (in Russian)
3. Garanzha, I. M. Modified supports of overhead transmission lines based on metal many-sided bars. In: *Overhead lines*, 2013, No. 3(12), pp. 15–20. (in Russian)
4. Garanzha, I. M. Powerful electricity supply network construction based on many sided tube and concrete stanchions. In: *Current civil constructions made from metal and wood: Edited Volume*, 2013, Number 17, pp. 45–50. (in Russian)
5. Duvanova, I.; Salmanov, I. Composite columns in a construction of tall buildings and structures. In: *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2014, No. 6(21), pp. 89–103.
6. Shaohuay, Ts. A new application experience of concrete-filled tubes in China. In: *Concrete & Reinforcement Concrete*, 2001, No. 3, pp. 20–24.
7. Cai, S. H. Modern Street Tube Confined Concrete Structures. China: Communication Press, 2003. 358 p.
8. Johnson, R. S. Concrete-Filled Steel Tubes. In: *Composite Structures of steel and Concrete*, 1984, Vol. 1, Chapter 5, pp. 171–177.
9. Storozhenko, L. I.; Semko, A. V.; Pents, V. F. Reinforced concrete construction. Poltava: PolNTU, 2005. 182 p. (in Ukrainian)
10. Storozhenko, L. I. Tube Confined Concrete constructions. Kyiv: Budivelnik, 1978. 80 p. (in Russian)
11. Storozhenko, L. I.; Plahotnyi, P. I.; Chernyi, A. Ya. Analysis of tube and concrete constructions. Kyiv: Constructor, 1991. 120 p. (in Russian)
12. Storozhenko, L. I. Strength and deformability of pipe-concrete elements. In: *Concrete and reinforced concrete*, 1980, No. 12, pp. 8–9. (in Russian)
13. Kikin, A.; Sanzharovskiy, R.; Trull, V. Tube Confined Concrete constructions. Moscow: Stroiizdat, 1974. 144 p. (in Russian)

- хотный, А. Я. Черный. – К.: Будивельник, 1991. – 120 с.
12. Стороженко, Л. И. Прочность и деформативность трубобетонных элементов [Текст] / Л. И. Стороженко // Бетон & Железобетон. 1980. № 12. С. 8–9.
 13. Кикин, А. Трубобетонные конструкции [Текст] / А. Кикин, Р. Санжаровский, В. Труль. – М.: Стройиздат, 1974. – 144 с.
 14. Кикин, А. И. К проблеме прочности стальных труб, заполненных бетоном [Текст] / А. И. Кикин, В. А. Труль, Р. С. Санжаровский // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1977. № 6. С. 3–7.
 15. Катаев, В. А. Теоретические исследования и расчеты трубобетонных стержней [Текст] / В. А. Катаев // Бетон & Железобетон. 1993. № 2. С. 26–28.
 16. Morino, S. Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column System in Japan [Текст] / S. Morino, K. Tsuba // Earthquake and Engineering Seismology. 2005. No. 1, Vol. 4. P. 51–73.
 17. Росновский, В. Исследование труб, заполненных бетоном [Текст] / В. Росновский, А. Липатов // Железнодорожное строительство. 1952. № 11. С. 27–30.
 18. Липатов, А. Исследование прочности трубобетонных элементов [Текст] / А. Липатов // Труды ЦНИИСК: Сб. труд. М.: Трансжелдориздат, 1956. Вып. 19. С. 15–25.
 19. Маренин, В. Ф. Вопросы прочности стальных труб, заполненных бетоном [Текст] / В. Ф. Маренин, А. Б. Ренский // Материалы по металлическим конструкциям. 1959. № 4. С. 58–64.
 20. Gonçalves, R. A geometrically exact approach to lateral-torsional buckling of thin-walled beams with deformable cross-section [Текст] / R. Gonçalves // Computers and Structures. 2012. № 106–107. P. 9–19.
 21. Bleich, F. Buckling strength of metal structures [Текст] / F. Bleich. – New York, USA: McGraw-Hill, 1952. – 242 p.
 22. Власов, В. З. Тонкостенные стержни [Текст]: перевод с французского / В. З. Власов. – М.: Физматгиз, 1962. – 363 с.
 23. Timoshenko, S. Theory of elastic stability [Текст] / S. Timoshenko, J. Gere. – New York, USA: McGraw-Hill, 1961. – 541 p.
 24. Trahair, N. S. Flexural-torsional buckling of structures [Текст] / N. S. Trahair. – London, England: E & FNSpon, 1993. – 115 p.
 25. Garifullin, M. Local Buckling of Cold-Formed Steel Members with Edge Stiffened Holes [Текст] / M. Garifullin, D. Trubina, N. Vatin // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 725–726, P. 697–702.
 26. Gonçalves, R. Buckling behaviour of thin-walled regular polygonal tubes subjected to bending or torsion [Текст] / R. Gonçalves, D. Camotim // Thin-Walled Structures. 2013. № 73. P. 185–197.
 27. Gonçalves, R. Elastic buckling of uniformly compressed thin-walled regular polygonal tubes [Текст] / R. Gonçalves, D. Camotim // Thin-Walled Structures. 2013. № 71. P. 35–45.
 28. Kikin, A. I.; Trull, V. A.; Sanzharovskiy, R. C. Problem of strength of steel pipes filled with concrete. In: *News of Higher Educational Institutions. Civil engineering and architecture*, 1977, No. 6, pp. 3–7. (in Russian)
 29. Kataev, V. A. Theoretical study and calculation pipe-concrete rods. In: *Concrete and reinforced concrete*, 1993, No. 2, pp. 26–28. (in Russian)
 30. Morino, S.; Tsuba, K. Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column System in Japan. In: *Earthquake and Engineering Seismology*, 2005, No. 1, Vol. 4, pp. 51–73.
 31. Rosnovskiy, V.; Lipatov, A. Investigation of pipes filled with concrete. In: *Railway construction*, 1952, No. 11, pp. 27–30. (in Russian)
 32. Lipatov, A. Strength of pipe-concrete elements. In: *Work of TsNISK*, Moscow: Transzheldorizdat, 1956, Issue 19, pp. 15–25. (in Russian)
 33. Marenin, V. F.; Renskiy, A. B. Questions strength steel pipes filled with concrete. In: *Materials in assembled steel sections*, 1959, No. 4, pp. 58–64. (in Russian)
 34. Gonçalves, R. A geometrically exact approach to lateral-torsional buckling of thin-walled beams with deformable cross-section. In: *Computers and Structures*, 2012, No. 106–107, pp. 9–19.
 35. Bleich, F. Buckling strength of metal structures. New York, USA: McGraw-Hill, 1952. 242 p.
 36. Vlasov, V. Z. Thin-walled bars. Moscow: Fizmatgiz, 1962. 363 p. (in Russian)
 37. Timoshenko, S., Gere, J. Theory of elastic stability. New York, USA: McGraw-Hill, 1961. 541 p.
 38. Trahair, N. S. Flexural-torsional buckling of structures. London, England: E & FNSpon, 1993. 115 p.
 39. Garifullin, M.; Trubina, D.; Vatin, N. Local Buckling of Cold-Formed Steel Members with Edge Stiffened Holes. In: *Applied Mechanics and Materials*, 2014, Vol. 725–726, pp. 697–702.
 40. Gonçalves, R.; Camotim, D. Buckling behavior of thin-walled regular polygonal tubes subjected to bending or torsion. In: *Thin-Walled Structures*, 2013, No. 73, pp. 185–197.
 41. Gonçalves, R.; Camotim, D. Elastic buckling of uniformly compressed thin-walled regular polygonal tubes. In: *Thin-Walled Structures*, 2013, No. 71, pp. 35–45.
 42. Gonçalves, R.; Camotim, D. On the behavior of thin-walled steel regular polygonal tubular members. In: *Thin-Walled Structures*, 2013, No. 62, pp. 191–205.
 43. Avent, R.; Robinson, J. Elastic stability of polygon folded plate columns. In: *Journal of the Structural Division*, ASCE, 1976, No. 102(5), pp. 1015–1029.
 44. Aoki, T.; Migita, Y.; Fukumoto, Y. Local buckling strength of closed polygon folded section columns. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 1991, No. 20(4), pp. 259–270.
 45. Godat, A.; Legeron, F.; Bazonga, D. Stability investigation of local buckling behavior of tubular polygon columns under concentric compression. In: *Thin-Walled Structures*, 2012, No. 53, pp. 131–140.

28. Gonçalves, R. On the behavior of thin-walled steel regular polygonal tubular members [Текст] / R. Gonçalves, D. Camotim // *Thin-Walled Structures*. 2013. № 62. P. 191–205.
29. Avent, R. Elastic stability of polygon folded plate columns [Текст] / R. Avent, J. Robinson // *Journal of the Structural Division, ASCE*. 1976. № 102(5). P. 1015–1029.
30. Aoki, T. Local buckling strength of closed polygon folded section columns [Текст] / T. Aoki, Y. Migita, Y. Fukumoto // *Journal of Constructional Steel Research*. 1991. № 20(4). P. 259–270.
31. Godat, A. Stability investigation of local buckling behavior of tubular polygon columns under concentric compression [Текст] / A. Godat, F. Legeron, D. Bazonga // *Thin-Walled Structures*. 2012. № 53. P. 131–140.
32. Teng, J. Local buckling of thin-walled polygonal columns subjected to axial compression or bending [Текст] / J. Teng, S. Smith, L. Ngok // *Advances in steel structures, 2nd International conference on advances in steel structures (ICASS99)* / editors: S. Chan, J. Teng. 1999. Vols. 1&2. P. 109–115.
33. Mander, J. B. Theoretical stress-strain model for confined concrete [Текст] / J. B. Mander, J. N. Priestley, R. Park // *Engineering Structures*. 1989. 116. P. 1804–1825.
34. Mander, J. B. Observed stress-strain behavior of confined concrete [Текст] / J. B. Mander, J. N. Priestley, R. Park // *Engineering Structures*. 1988. 114. P. 1827–1849.
35. Bresler, B. Influences of High Strain Rate and Cyclic Loading on Behavior of Unconfined and Confined Concrete in Compression [Текст] / B. Bresler, V. V. Bertero // *Second Canadian Conference on Earthquake Engineering, June 5–6, 1975, McMaster University: Proceedings / Canadian National Committee for Earthquake Engineering, McMaster University, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics*. – Hamilton, Ontario, Canada: McMaster University Bookstore, [1976?]. – P. 1–32.
36. Park, R. Ductility of square-confined concrete columns [Текст] / R. Park, M. J. Priestley, W. D. Gill // *J. Struct. Div., ASCE*. 1982. № 108(4). P. 929–950.
37. Popovics, S. A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete [Текст] / S. Popovics // *Cement and Concrete Researches*. 1973. No. 3(5). P. 583–589.
38. Richart, F. E. A study of the failure of concrete under combined compressive stress [Текст] / F. E. Richart, A. Brandzaeg, R. L. Brown. – Urbana: University of Illinois, 1928. – 105 p. – (Series/Report: University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin; no. 185; University of Illinois Bulletin; Vol. 26, No. 12).
39. Modeling of Concrete Behavior under Compression [Текст] / D. A. Kitaeva, Y. I. Rudaev, B. S. Ordobaev, S. S. Abdykeeva // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725–726. P. 623–628.
40. A unified formulation for circle and polygon concrete-filled steel tube columns under axial compression [Текст] / Min Yu, Xiaoxiong Zha, Jianqiao
41. Teng, J.; Smith, S.; Ngok, L. Local buckling of thin-walled polygonal columns subjected to axial compression or bending. In: *Advances in steel structures, 2nd International conference on advances in steel structures (ICASS99)* / Chan, S.; Teng, J. editors, 1999, Vols. 1&2, pp. 109–115.
42. Mander, J. B.; Priestley, J. N.; Park, R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. In: *Engineering Structures*, 1989, 116, pp. 1804–1825.
43. Mander, J. B.; Priestley, J. N.; Park, R. Observed stress-strain behavior of confined concrete. In: *Engineering Structures*, 1988, 114, pp. 1827–1849.
44. Bresler, B.; Bertero, V. V. Influences of High Strain Rate and Cyclic Loading on Behavior of Unconfined and Confined Concrete in Compression. In: *Second Canadian Conference on Earthquake Engineering, June 5–6, 1975, McMaster University: Proceedings / Canadian National Committee for Earthquake Engineering, McMaster University, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics*. Hamilton, Ontario, Canada: McMaster University Bookstore, [1976?], pp. 1–32.
45. Park, R.; Priestley, M. J.; Gill, W. D. Ductility of square-confined concrete columns. In: *J. Struct. Div., ASCE*, 1982, No. 108(4), pp. 929–950.
46. Popovics, S. A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete. In: *Cement and Concrete Researches*, 1973, No. 3(5), pp. 583–589.
47. Richart, F. E.; Brandzaeg, A.; Brown, R. L. A study of the failure of concrete under combined compressive stress. Urbana: University of Illinois, 1928. 105 p. (Series/Report: University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin; no. 185; University of Illinois Bulletin; Vol. 26, No. 12).
48. Kitaeva, D. A.; Rudaev, Y. I.; Ordobaev, B. S.; Abdykeeva, S. S. Modeling of Concrete Behavior under Compression. In: *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vols. 725–726, pp. 623–628.
49. Yu, Min; Zha, Xiaoxiong; Ye, Jianqiao; Li, Yuting. A unified formulation for circle and polygon concrete-filled steel tube columns under axial compression. In: *Engineering Structures*, 2013, 49, pp. 1–10.
50. Yu, Min; Zha, Xiaoxiong; Ye, Jianqiao; She, Chunyan. A unified formulation for hollow and solid concrete-filled steel tube columns under axial compression. In: *Engineering Structures*, 2010, 32, pp. 1046–1053.
51. Garanzha, I.; Vatin, N. Analytical methods for determination a load capacity of concrete-filled tubes under axial compression. In: *Applied Mechanics and Materials*, 2014, Vol. 633–634, pp. 965–971.
52. Ellobody, E.; Young, B. Nonlinear analysis of concrete-filled steel SHS and RHS columns. In: *Thin-Walled Structures*, 2006, No. 44(8), pp. 919–930.
53. Hu, H. T.; Huang, C. S.; Wu, M. H., et al. Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect. In: *J. Struct. Eng.*, 2003, No. 129(10), pp. 1322–1329.
54. Tao, Z.; Uy, B.; Liao, F. Y.; Han, L. H. Nonlinear analysis of concrete-filled square stainless steel stub columns under axial compression. In:

- Ye, Yuting Li // *Engineering Structures*. 2013. 49. P. 1–10.
41. A unified formulation for hollow and solid concrete-filled steel tube columns under axial compression [Текст] / Min Yu, Xiaoxiong Zha, Jianqiao Ye, Chunyan She // *Engineering Structures*. 2010. Volume 32, Issue 4. P. 1046–1053.
 42. Garanzha, I. Analytical methods for determination a load capacity of concrete-filled tubes under axial compression [Текст] / I. Garanzha, N. Vatin // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 633–634. P. 965–971.
 43. Ellobody, E. Nonlinear analysis of concrete-filled steel SHS and RHS columns [Текст] / E. Ellobody, B. Young // *Thin-Walled Structures*. 2006. № 44(8). P. 919–930.
 44. Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect [Текст] / H. T. Hu, C. S. Huang, M. H. Wu [et al.] // *J Struct. Eng.* 2003. № 129(10). P. 1322–1329.
 45. Nonlinear analysis of concrete-filled square stainless steel stub columns under axial compression [Текст] / Z. Tao, B. Uy, F. Y. Liao, L. H. Han // *Construction Steel Researches*. 2011. № 67(11). P. 1719–1732.
 46. Garanzha, Igor. About Approaches to the Calculation of Composite Tubes in Ukraine and Abroad [Текст] / Igor Garanzha // *Metal Structures*. 2014. Vol. 20, No. 1. P. 45–53.
 47. Dai, X. Numerical modelling of the axial compressive behavior of short concrete-filled elliptical steel columns [Текст] / X. Dai, D. Lam // *Construction Steel Researches*. 2010. № 66(4). P. 542–555.
 48. Georgios, G. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns [Текст] / G. Georgios, D. Lam // *Journal of Constructional Steel Research*. 2004. Vol. 60. P. 1049–1068.
 49. Simulation and design recommendations of eccentrically loaded slender concrete-filled tubular columns [Текст] / J. M. Portoles, M. L. Romero, F. C. Filippou, J. L. Bonet // *Engineering Structures*. 2013. № 33(5). P. 1576–1593.
 50. Fam, A. Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression and lateral cyclic loads [Текст] / A. Fam, F. S. Qie, S. Rizkalla // *Engineering Structures*. 2004. № 130(4). P. 631–640.
 51. Hajjar, J. F. Representation of concrete-filled steel tube cross-section strength [Текст] / J. F. Hajjar, B. C. Gourley // *Engineering Structures*. 1996. № 122(11). P. 1327–1336.
 52. Johansson, M. Mechanical behavior of circular steel-concrete composite stub columns [Текст] / M. Johansson, K. Gylltoft // *Engineering Structures*. 2002. № 128(8). P. 1073–1081.
 53. Experimental behavior of thin-walled steel tube confined concrete column to RC beam joints under cyclic loading [Текст] / Han Lin-Hai, Qu Hui, Tao Zhong, Wang Zai-Feng // *Thin-Walled Structures*. 2009. № 47. P. 847–857.
 54. Труль, В. Экспериментальные исследования несущей способности трубы, заполненной бетоном [Текст] / В. Труль, Р. Санжаровский // *Известия Академии Наук Сибири. Технические науки. Строительство*, 2011, No. 67(11), pp. 1719–1732.
 46. Garanzha, Igor. About Approaches To The Calculation Of Composite Tubes In Ukraine And Abroad. In: *Metal Structures*, 2014, Vol. 20, No. 1, pp. 45–53.
 47. Dai, X.; Lam, D. Numerical modelling of the axial compressive behavior of short concrete-filled elliptical steel columns. In: *Construction Steel Researches*, 2010, No. 66(4), pp. 542–555.
 48. Georgios, G.; Lam, D. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, Vol. 60, pp. 1049–1068.
 49. Portoles, J. M.; Romero, M. L.; Filippou, F. C.; Bonet, J. L. Simulation and design recommendations of eccentrically loaded slender concrete-filled tubular columns. In: *Engineering Structures*, 2013, No. 33(5), pp. 1576–1593.
 50. Fam, A.; Qie, F. S.; Rizkalla, S. Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression and lateral cyclic loads. In: *Engineering Structures*, 2004, No. 130(4), pp. 631–640.
 51. Hajjar, J. F.; Gourley, B. C. Representation of concrete-filled steel tube cross-section strength. In: *Engineering Structures*, 1996, No. 122(11), pp. 1327–1336.
 52. Johansson, M.; Gylltoft, K. Mechanical behavior of circular steel-concrete composite stub columns. In: *Engineering Structures*, 2002, No. 128(8), pp. 1073–1081.
 53. Lin-Hai, Han; Hui, Qu; Zhong, Tao; Zai-Feng, Wang. Experimental behavior of thin-walled steel tube confined concrete column to RC beam joints under cyclic loading. In: *Thin-Walled Structures*, 2009, No. 47, pp. 847–857.
 54. Trull, V.; Sanzharovskiy, R. Experimental studies of the bearing capacity of the pipe filled with concrete. In: *News of Higher Educational Institutions. Civil engineering and architecture*, 1968, No. 3, pp. 27–30. (in Russian)
 55. Schneider, S. P.; Alostaz, Y. M. Experimental behavior of connections to concrete-filled steel tubes. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 1998, No. 45(3), pp. 321–352.
 56. Xiao, Y.; Tomii, M.; Sakino, K. Experimental study on design method to prevent shear failure of reinforced concrete short circular columns by confining in steel tube. In: *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1986, No. 8, pp. 535–542.
 57. Chen, Ju; Jin, Weiliang. Experimental investigation of thin-walled complex section concrete-filled steel stub columns. In: *Thin-Walled Structures*, 2010, No. 48, pp. 718–724.
 58. Perea, Tiziano; Leon, Roberto T.; Hajjar, Jerome F.; Denavit, Mark D. Full-Scale Tests of Slender Concrete-Filled Tubes Axial Behavior. In: *Engineering Structures*, 2013, No. 10, pp. 1943–1957.
 59. Drucker, D. C.; Prager, W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design. In: *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, Vol. 10, No. 2, pp. 157–165.
 60. Liu, C.; Huang, Y.; Stout, M. G. On the asymmetric yield surface of plastically orthotropic materials: A phenomenological study. In: *Acta Materialia*, 1997, Vol. 45, No. 6, pp. 2397–2406.

- стия вузов. Строительство и архитектура. 1968. № 3. С. 27–30.
55. Schneider, S. P. Experimental behavior of connections to concrete-filled steel tubes [Текст] / S. P. Schneider, Y. M. Alostaz // Journal of Constructional Steel Research. 1998. № 45(3), P. 321–352.
 56. Xiao, Y. Experimental study on design method to prevent shear failure of reinforced concrete short circular columns by confining in steel tube [Текст] / Y. Xiao, M. Tomii, K. Sakino // Transactions of the Japan Concrete Institute. 1986. № 8. P. 535–542.
 57. Chen, Ju. Experimental investigation of thin-walled complex section concrete-filled steel stub columns [Текст] / Ju Chen, Weiliang Jin // Thin-Walled Structures. 2010. № 48. P. 718–724.
 58. Full-Scale Tests of Slender Concrete-Filled Tubes Axial Behavior [Текст] / Tiziano Perea, Roberto T. Leon, Jerome F. Hajjar, Mark D. Denavit // Engineering Structures. 2013. № 10. P. 1943–1957.
 59. Drucker, D. C. Soil mechanics and plastic analysis for limit design [Текст] / D. C. Drucker, W. Prager // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10, № 2. P. 157–165.
 60. Liu, C. On the asymmetric yield surface of plastically orthotropic materials: A phenomenological study [Текст] / C. Liu, Y. Huang, M. G. Stout // Acta Materialia. 1997. Vol. 45, № 6. P. 2397–2406.
 61. Drucker, D. C. Relations of experiments to mathematical theories of plasticity [Текст] / D. C. Drucker // Journal of Applied Mechanics. 1949. Vol. 16. P. 349–357.
 62. Cazacu, O. Generalization of Drucker's yield criterion to orthotropy [Текст] / O. Cazacu, F. Barlat // Mathematics and Mechanics of Solids. 2001. Vol. 6, № 6. P. 613–630.
 63. EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings [Текст]. – Supersedes ENV 1993-1-1:1992. – Brussels : European Committee of Standardization, 2005. – 91 p.
 64. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings [Текст]. – Supersedes ENV 1992-1-1:1991, ENV 1992-1-3:1994, ENV 1992-1-4:1994, ENV 1992-1-5:1994, ENV 1992-1-6:1994, ENV 1992-3:1998. – Brussels : European Committee of Standardization, 2004. – 152 p.
 65. Лукьянова, А. Н. Моделирование контактной задачи с помощью программы ANSYS [Текст] / А. Н. Лукьянова. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 52 с.
 61. Drucker, D. C. Relations of experiments to mathematical theories of plasticity. In: *Journal of Applied Mechanics*, 1949, Vol. 16, pp. 349–357.
 62. Cazacu, O.; Barlat, F. Generalization of Drucker's yield criterion to orthotropy. In: *Mathematics and Mechanics of Solids*, 2001, Vol. 6, No. 6, pp. 613–630.
 63. EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings. Brussels: European Committee of Standardization, 2005. 91 p.
 64. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings. Brussels: European Committee of Standardization, 2004. 152 p.
 65. Lukianova, A. N. Model operation of contact problem due to ANSYS program. Samara: SSTU, 2010. 52 p. (in Russian)

Гаранжа Ігор Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: вивчення дійсної роботи металевих ґратчастих, багатогранних листових і трубобетонних опор повітряних ліній електропередавання. Створення нових конструктивних рішень опор ПЛ із застосуванням прогресивних технологій і матеріалів.

Танасогло Антон Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність та

оптимальне проектування конструкцій повітряних ліній електропередачі і антенних опор; вивчення дійсної роботи металевих ґратчастих конструкцій баштового типу.

Войтова Жанна Миколаївна – доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: оптимальне проектування металевих і дерев'яних конструкцій.

Гаранжа Софія Віталіївна – магістрант кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: вивчення дійсної роботи і пошук раціональних конструктивних рішень трубобетонних конструкцій з використанням прогресивних матеріалів.

Гаранжа Игорь Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: изучение действительной работы металлических решетчатых, многогранных листовых и трубобетонных опор воздушных линий электропередачи. Создание новых конструктивных решений опор ВЛ с применением прогрессивных технологий и материалов.

Танасогло Антон Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: эксплуатационная надежность и оптимальное проектирование конструкций воздушных линий электропередачи и антенных опор, изучение действительной работы металлических решетчатых конструкций башенного типа.

Войтова Жанна Николаевна – доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: оптимальное проектирование металлических и деревянных конструкций.

Гаранжа София Витальевна – магистрант кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: изучение действительной работы и поиск рациональных конструктивных решений трубобетонных конструкций с использованием прогрессивных материалов.

Garanzha Igor – Ph.D. (Engineering), Associate Professor; Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: studying of the valid work steel lattice, multifaceted and composite supports of overhead power transmission lines. Creation new constructive decisions of OPTL supports with application progressive technologies and materials.

Tanasoglo Anton – Ph.D. (Engineering), Associate Professor; Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: operational reliability and optimal designing of overhead power transmission line and antenna support structures. Studying of the valid work of metal lattice tower supports.

Voitova Zhanna – Associate Professor, Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: optimal design of steel and wooden structures.

Garanzha Sofiia – master student; Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: a studying of a real work of pipe-concrete structures using advanced materials.