



ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОГРАННИХ КОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ БЕТОНУ, ЩО САМОУЩІЛЬНЮЄТЬСЯ, ПРИ ОСЬОВОМУ СТИСКУ

І. М. Гаранжа¹, А. В. Танасогло², А. А. Ягмур³, С. О. Фоменко⁴, А. М. Оржеховський⁵

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.*

*E-mail: ¹garigo@mail.ru, ²a.v.tan@mail.ru, ³aayagmur@mail.ru,
⁴fomenko_sa@mail.ru, ⁵oan@mail.ru*

Отримана 14 квітня 2015; прийнята 26 червня 2015.

Анотація. У статті розглянуто принцип проведення механічних випробувань, спрямованих на визначення механічних характеристик бетону, що самоущільнюється, класів міцності В20 і В30 (згідно з іспанськими методиками). Експериментально вивчена несуча здатність і характер руйнування 6- і 12-гранних композитних (трубобетонних) елементів при центральному стиску. Встановлено черговість руйнування матеріалів і характерні види руйнування багатогранних трубобетонних елементів, такі як розвиток пластичних деформацій сталеві труби, а також розрив поздовжніх зварних швів. Виконано порівняння результатів визначення несучої здатності трубобетонних стоек, що вказує на її завищення при аналітичному та кінцево-елементному розрахунках до 30 %.

Ключові слова: багатогранні трубобетонні конструкції, бетон, що самоущільнюється, механічні випробування, центровий стиск, фізико-механічні характеристики бетону, характер руйнування, несуча здатність.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОГРАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

І. М. Гаранжа¹, А. В. Танасогло², А. А. Ягмур³, С. А. Фоменко⁴, А. Н. Оржеховський⁵

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
2, ул. Державина, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.*

*E-mail: ¹garigo@mail.ru, ²a.v.tan@mail.ru, ³aayagmur@mail.ru,
⁴fomenko_sa@mail.ru, ⁵oan@mail.ru*

Получена 14 апреля 2015; принята 26 июня 2015.

Аннотация. В статье рассмотрен принцип проведения механических испытаний, направленных на определение физико-механических характеристик самоуплотняющегося бетона классов прочности В20 и В30 (в соответствии с испанскими методиками). Экспериментально изучена несущая способность и характер разрушения 6- и 12-гранных композитных (трубобетонных) элементов при центральном сжатии. Установлена очередность разрушения материалов и характерные виды разрушения многогранных трубобетонных элементов, такие как развитие пластических деформаций стальной трубы, а также разрыв продольных сварных швов. Выполнено сравнение результатов определения несущей способности трубобетонных стоек, указывающее на ее завышение при аналитическом и конечно-элементном расчете до 30 %.

Ключевые слова: многогранные трубобетонные конструкции, самоуплотняющийся бетон, механические испытания, центральное сжатие, физико-механические характеристики бетона, характер разрушения, несущая способность.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF MULTIFACETED COMPOSITE STRUCTURES BASED ON SELF-COMPACTING CONCRETE UNDER AXIAL COMPRESSION

Igor Garanzha¹, Anton Tanasoglo², Anatoliy Yagmur³,
Serafim Fomenko⁴, Anatoliy Orzhekhovskiy⁵

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiyivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.*

*E-mail: ¹garigo@mail.ru, ²a.v.tan@mail.ru, ³aayagmur@mail.ru,
⁴fomenko_sa@mail.ru, ⁵oan@mail.ru*

Received 14 April 2015; accepted 26 June 2015.

Abstract. The paper describes the principle of mechanical tests aimed at determining the physical and mechanical properties of self-compacting concrete B20 и B30 (according to Spanish methodologies). Bearing capacity and a character of destruction 6 and 12-sides composite (concrete-filled tubes) elements under axial compression has been experimentally found out. The order of destruction of materials and specific types of destruction the multifaceted composite elements, such as the development of plastic deformations of the steel pipe, and the severance of longitudinal welds have been given. The comparison of results of determining of the bearing capacity of concrete-filled poles, indicating to its overestimation by the analytical and the finite element calculation to 30 % has been carried out.

Keywords: multifaceted composite poles, self-compacting concrete, mechanical tests, axial compression, physic and mechanical characteristics of concrete, nature of destruction, bearing capacity.

Введение

Создание надежных, долговечных и экономичных конструкций, а также конструкций, отвечающих требованиям эстетики и обладающих низким землеотводом, является главной целью проектирования зданий и сооружений. Не исключением в данном направлении являются и трубобетонные конструкции, которые в ближайшей перспективе будут использоваться в качестве несущих элементов сооружений городской инфраструктуры, таких как опоры распределительных электрических сетей (напряжением до 110 кВ), башни мобильной связи, осветительные опоры, стойки под контактную сеть горэлектротранспорта и т. д. [1–9].

Одной из основных предпосылок для качественного проектирования строительных конструкций, и композитных в частности, есть степень изученности их действительной работы под нагрузкой, особенностей напряженно-деформированного состояния, уровня несущей способности, характера разрушения. На сегодняшний день как отечественными, так и зарубежными учеными проведен достаточно широкий спектр экспериментальных исследований, в процессе которых исследовались как трубобетонные конструк-

ции в натуральную величину, так и лабораторные модели, созданные по принципу геометрического масштабирования относительно натуральных конструкций [10–22].

В данной работе в два этапа выполнены экспериментальные исследования, направленные на определение основных физико-механических характеристик предложенных составов самоуплотняющегося бетона (СУБ) с последующим исследованием несущей способности композитных конструкций на основе стальных многогранных труб, заполненных СУБ при осевом сжатии.

Экспериментальное определение физико-механических характеристик самоуплотняющегося бетона

На первом этапе проведены механические испытания цилиндрических образцов из самоуплотняющегося бетона (классов B20 и B30) при центральном сжатии с целью экспериментально определить реальные значения их физико-механических характеристик для предложенного самоуплотняющегося бетона марки B20 и B30 – призмочная прочность бетона R_b (МПа) и его модуль упругости E (МПа). Для исследования при-

нята экспериментальная рецептура СУБ с использованием компонентов, добытых на территории провинции Аликанте (Испания), таких как песок, цемент, вода и щебень, свойства которых по региональным признакам отличны от отечественных аналогов.

Впоследствии полученные параметры можно использовать при расчете конструкций с использованием самоуплотняющегося бетона (в частности и трубобетонных) как по аналитическим методикам, так и при моделировании в системах конечно-элементного анализа (ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, Lira и т. д.).

Механические испытания бетонных образцов выполнены в соответствии со следующими нормативными документами:

- для определения прочности при сжатии → UNE-EN 12390-3:2001 (1) [23];
- для определения модуля упругости → UNE 83316:1996 (2) [24].

В качестве испытываемых были приняты цилиндрические образцы, изготовленные из самоуплотняющегося бетона (дозировки компонентов которого приведены в табл. 1), диаметром $d = 150$ мм и высотой $H = 2d = 300$ мм. Вышеупомянутые геометрические характеристики образцов приняты таким образом, чтобы выполнялось условие $2 \leq H/d \leq 4$.

При определении прочности бетона на сжатие согласно [23] испытываются три образца под прессом, при линейно возрастающей нагрузке со скоростью в пределах 0,2...1,0 МПа/с до их разрушения. Конечный результат R_b получается путем нахождения среднего значения прочностей, полученных по трём образцам.

В процессе экспериментального определения модуля упругости бетона согласно [24] происходит в 2 этапа, каждый из которых включает в себя 4 одноименных цикла, а именно:

- нагружение образца от начального напряжения $\sigma_1 = 5$ кПа/см² до 1/3 его призматической (цилиндрической) прочности σ_{np} ;
- выдерживание образца в нагруженном состоянии (при 1/3 σ_{np}) в течение 30 секунд;
- разгрузка до значения напряжения в образце σ_1 ;
- выдерживание образца при напряжении σ_1 в течение 30 секунд.

Вышеупомянутый набор циклов повторяется дважды. После повторного выдерживания образца при напряжении σ_0 выполняется последний цикл нагружения образца, по окончании которого с помощью тензометрического устройства и датчиков соответственно фиксируются значения напряжения σ_1 (в начале цикла) и σ_2 (в конце цикла), а также соответствующие им деформации ε_1 и ε_2 .

Схема выполнения испытания (процесс «нагрузки–разгрузки») при определении модуля упругости бетона в соответствии с нормативным документом [24] представлена в виде графического алгоритма на рис. 1. Используя формулу (1), определяется модуль упругости бетона E .

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (1),$$

где σ_1 и σ_2 – напряжения в теле бетонного образца, принимаемые в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 1;

ε_1 и ε_2 – деформации, полученные при снятии показаний с тензометрических датчиков типа LY1x (являющиеся продукцией фирмы «НВО», США) через индикатор внутренних деформаций материала «РЗ» (рис. 2). Ввиду того, что максимальный принятый размер фракции крупного заполнителя 10 мм, в работе использованы тензодатчики с базой 30 мм, чтобы обеспечить корректное снятие показаний.

Таблица 1. Экспериментальная рецептура самоуплотняющегося бетона классов прочности В20 и В30

Класс бетона	Цемент 32,5 (М400), кг	Щебень (фр. 5...10), кг	Песок, кг	Пластификатор Viscocrete 5720		Вода, л	$\frac{B}{C}$	Текущность бетона, D_6 , мм
				кг	%			
В20	200	600	900	3,8	1,9	100	0,5	540
В30	250	600	900	4,4	1,75	110	0,44	560

Результаты экспериментального определения вышеупомянутых физико-механических характеристик приведены в табл. 2.

Согласно отечественным методикам, изложенным в [25–27], суть определения призмной прочности и модуля упругости бетона состоит в испытании путем постепенного нагружения (ступенями) образцов-призм или образцов-цилиндров стандартных размеров осевой сжимающей нагрузкой. В первом случае, до разрушения, при определении призмной прочности

и во втором случае до уровня 30 % разрушительного нагружения N_u с измерением в процессе нагрузки образцов их деформаций, при определении модуля упругости.

Призмная прочность и модуль упругости бетона вычисляется по определенным в процессе испытаний нагружениям N_u и $0,3 N_u$, продольным и поперечным относительным упругомгновенным деформациям ε_1 и ε_2 . Т. е. экспериментальное определение основных физико-механических характеристик бетона происходит без

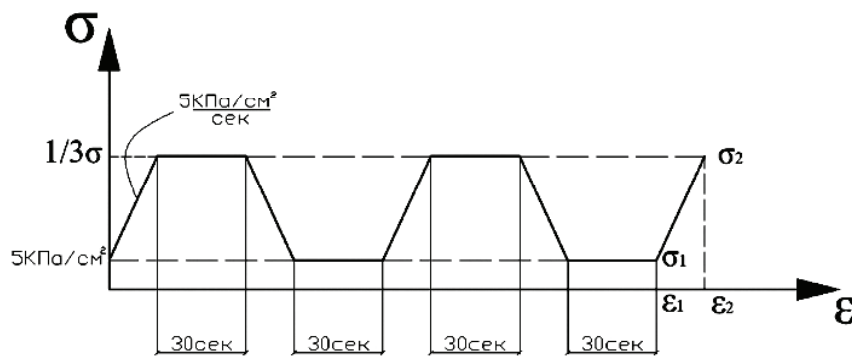


Рисунок 1. Графический алгоритм определения модуля упругости бетона.



Рисунок 2. Экспериментальное определение модуля упругости самоуплотняющегося бетона.

Таблица 2. Экспериментальные физико-механические характеристики самоуплотняющегося бетона при сжатии

Класс бетона	Призмная прочность R_b , МПа	Модуль упругости E , МПа
B20	10,5	45411,7
B30	15,9	49238,1

разгрузки образцов в процессе испытаний, что является принципиальным отличием отечественных и европейских методик.

Экспериментальное изучение несущей способности многогранного трубобетона

На втором этапе работы выполнены экспериментальные исследования несущей способности многогранных трубобетонных элементов с применением самоуплотняющегося бетона при центральном сжатии. Для проведения исследований изготовлены образцы высотой $H = 500$ мм и диаметром описанной окружности $D = 200$ мм с количеством граней $n = 6$ и 12 из стали марки С235 толщиной стенки $t = 3$ мм. В качестве заполнителя использовался самоуплотняющийся бетон предложенных составов для классов В20 и В30. Нагружалась бетонная часть образцов линейно возрастающей нагрузкой и конструк-

ция доводилась до разрушения. Количество моделей – 8. В результате были определены:

- разрушающая нагрузка $N_{пред}$ (несущая способность элементов);
- характер разрушения образцов (рис. 3).

Анализ результатов испытания трубобетонных многогранников показал очередность разрушения материалов в составе композитной конструкции, при которой предельное состояние наступает первым для стальной трубы. Характерными видами разрушения явились развитие пластических деформаций и разрыв продольных сварных швов.

Экспериментальные результаты о несущей способности многогранных трубобетонных элементов (с количеством граней $n = 6$ и 12), а также их сравнение с результатами, полученные по «универсальной» аналитической методике [10] и в системе конечно-элементного анализа ANSYS, приведены на рис. 4 и в табл. 3 соответственно.

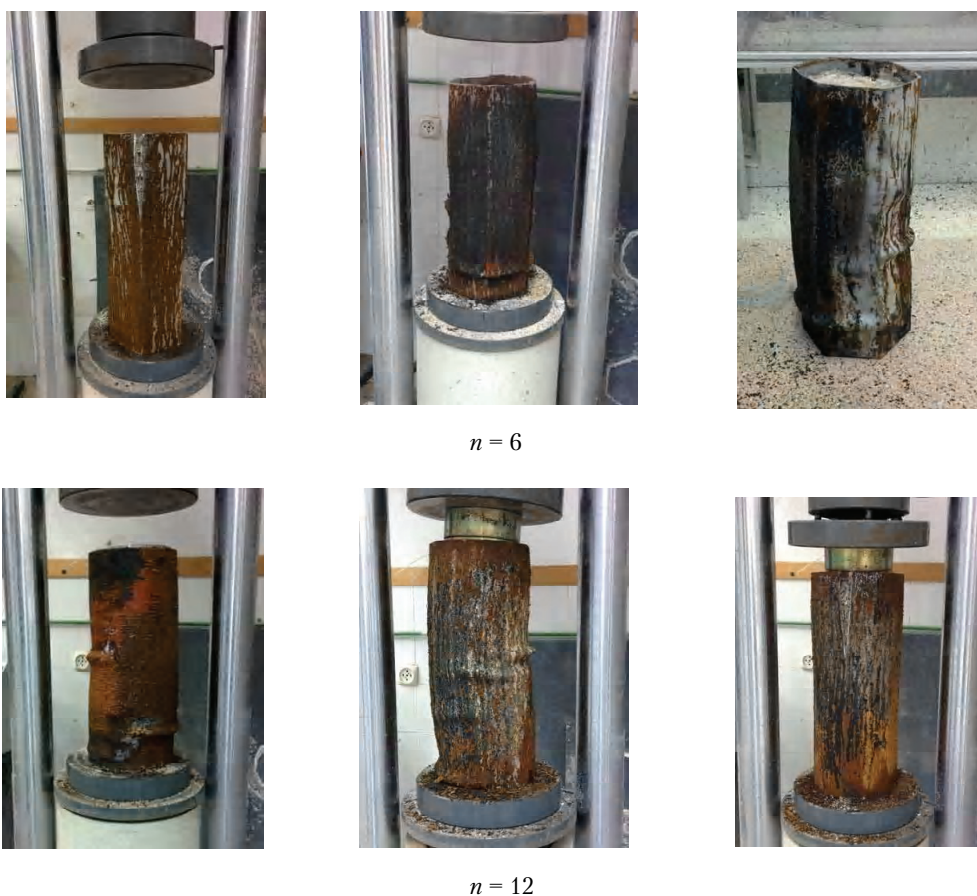


Рисунок 3. Характер разрушения трубобетонных образцов с количеством граней n .

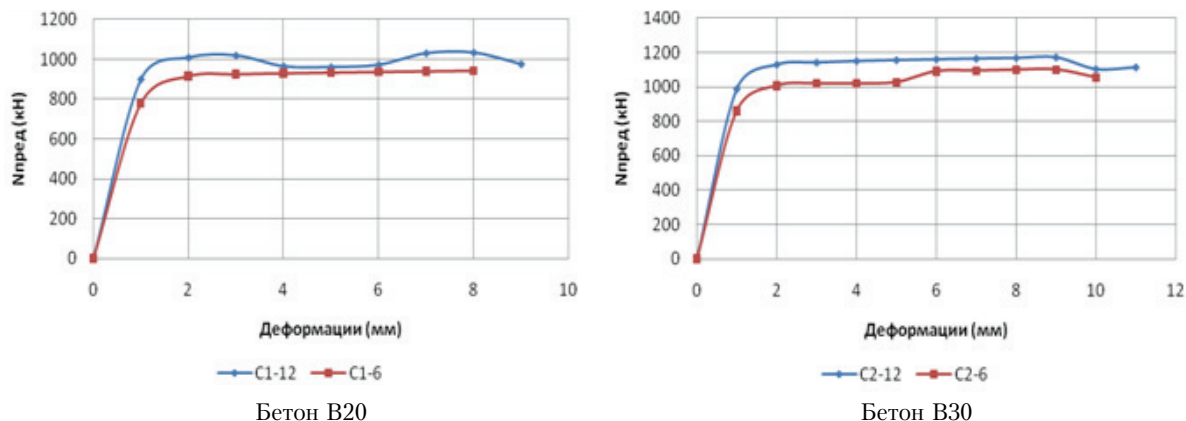


Рисунок 4. Графическое представление экспериментальных результатов определения несущей способности многогранного трубобетона.

Таблица 3. Сравнение аналитических, экспериментальных и численных результатов определения несущей способности многогранных трубобетонных образцов

Код образца*	$N_{\text{эксперимент}}$ кН	Вид разрушения	$N_{\text{аналитич.}}$ кН	$\frac{N_{\text{эксперимент}}}{N_{\text{аналитич.}}}$	$\frac{N_{\text{эксперимент}}}{N_{\text{ANSYS}}}$	N (ANSYS), кН
C1-6-1	662	Пластика	788,7	0,840	0,703	942
C1-6-2	690	Сварной шов	788,7	0,875	0,733	
C1-12-1	840	Пластика	910,9	0,922	0,813	1033,7
C1-12-2	858	Пластика	910,9	0,945	0,830	
C2-6-1	790	Пластика	844,4	0,936	0,718	1100,2
C2-6-2	804	Сварной шов	844,4	0,952	0,731	
C2-12-1	836	Пластика	975,7	0,857	0,714	1170,6
C2-12-2	884	Сварной шов	975,7	0,806	0,755	

* в качестве кодировки вида XX-Y-Z для испытательных образцов использованы следующие обозначения:

- XX → C1, C2 – бетон классов В20 и В30 соответственно;
- Y = 6, 12 – количество граней стальной трубы;
- Z = 1, 2 – порядковый номер образца.

При создании моделей исследуемых объектов в ANSYS использованы следующие особенности конечно-элементного моделирования данного вычислительного комплекса [28–44]:

- для возможности учета нелинейных свойств материалов, составляющих композитной конструкции, использованы специальные объемные конечные элементы Solid 65 для бетона и Solid 85 для стали;

- КЭ сетка расчетной модели создана как «упорядоченная», основанная на элементах шестигранной призматической формы;
- учтен контакт между сталью и бетоном при их совместной работе (когда трубобетонная конструкция воспринимает объемное напряженное состояние) путем использования специальных конечных элементов CONTA174 (контактирующий элемент) и TARGET 173

(элемент проникновения), а также введения коэффициента трения μ между материалами.

Выводы

1. Экспериментально определена призматическая прочность R_b самоуплотняющегося бетона классов В20 и В30 при осевом сжатии и его модуль упругости E путем механических испытаний образцов согласно испанским нормам. Значения R_b ниже аналогичного нормативного показателя на $\approx 5...7\%$, модуль E превысил среднестатистическое значение (30 000 МПа для тяжелого бетона) приблизительно на 50...60%.
2. По результатам экспериментальных исследований многогранных трубобетонных образцов определена разрушающая нагрузка, которую

следует принимать как несущую способность конструкций при центральном сжатии.

3. Определен характер разрушения рассматриваемых конструкций при сжатии, что подтверждает предпосылки численных исследований о виде и очередности разрушения составляющих многогранного трубобетона.
4. Анализ результатов показал, что в сравнении с экспериментальными результатами данные, полученные по аналитической «универсальной» методике, превышают несущую способность многогранных трубобетонных элементов на $\approx 6...17\%$, что указывает на достаточный уровень сходимости, а данные расчета в ANSYS – приблизительно на 17...30%, что говорит о необходимости дополнительной корректировки конечно-элементной расчетной модели.

Литература

1. Перспективные направления исследований 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.
2. Гаранжа, И. М. Модифицированные опоры воздушных линий электропередачи на основе металлических многогранных стоек [Текст] / И. М. Гаранжа // Воздушные линии. 2013. № 3(12). С. 15–20.
3. Гаранжа, И. М. Эффективные электросетевые конструкции на основе многогранных трубобетонных стоек [Текст] / И. М. Гаранжа // Современные строительные конструкции из металла и древесины: Сборник научных трудов. Одесса, 2013. № 17. С. 45–50.
4. 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.
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 Steel Tube Confined Concrete Structures [Текст] / S. H. Cai. – Beijing: China Communication Press Co., 2003. – 358 p.
8. Стороженко, Л. И. Сталежелезобетонные конструкции [Текст] / Л. И. Стороженко, А. В. Семко, В. Ф. Пенц. – Полтава: ПолНТУ, 2005. – 182 с.

References

1. 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, Number 2, pp. 67–80. (in Russian)
2. Garanzha, I. M. Modified overhead power transmission line support based on steel many-sided bars. In: *Overhead lines*, 2013, No. 3(12), pp. 15–20. (in Russian)
3. 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)
4. 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.
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 Steel Tube Confined Concrete Structures. Beijing: China Communication Press Co., 2003. 358 p.
8. Storozhenko, L. I.; Semko, A. V.; Pents, V. F. Steel reinforced concrete constructions. Poltava: PolNTU, 2005. 182 p. (in Russian)
9. Garanzha, Igor. About approaches to the calculation of composite tubes in Ukraine and abroad. In: *Metal Constructions*, 2014, Volume 20, Number 1, pp. 45–53.

9. Garanzha, Igor. About approaches to the calculation of composite tubes in Ukraine and abroad [Текст] / Igor Garanzha // Metal Constructions. 2014. Volume 20, Number 1. P. 45–53.
10. A unified formulation for circle and polygon concrete-filled steel tube columns under axial compression [Текст] / Min Yu, Xiaoxiong Zha, Jianqiao Ye, Yuting Li // Engineering Structures. 2013. 49. P. 1–10.
11. 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. 32. P. 1046–1053.
12. 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.
13. Johansson, M. Mechanical behavior of circular steel-concrete composite stub columns [Текст] / M. Johansson, K. Gylltoft // Engineering Structures. 2002. № 128(8). P. 1073–1081.
14. Experimental behavior of thin-walled steel tube confined concrete column to RC beam joints under cyclic loading [Текст] / Lin-Hai Han, Hui Qu, Zhong Tao, Zai-Feng Wang // Thin-Walled Structures. 2009. № 47. P. 847–857.
15. Труль, В. А. Экспериментальные исследования несущей способности внецентренно-сжатых металлических труб, заполненных бетоном [Текст] / В. А. Труль, Р. С. Санжаровский // Изв. вузов «Строительство и архитектура». 1968. № 3. С. 27–30.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Высокоэффективные технологии и комплексные конструкции в строительстве [Текст] : монография / А. Г. Онищенко, С. Ф. Пичугин, В. А. Онищенко [и др.]. – Полтава : ЧФ «Формика», 2009. – 404 с.
21. Стороженко, Л. І. Трубобетонні конструкції промислових будівель [Текст] : Монографія / Л. І. Стороженко, В. Ф. Пенц, С. Г. Коршун. – Полтава : ПолНТУ, 2008. – 202 с.
22. Ермоленко, Д. А. Об'ємний напружено-деформований стан трубобетонних елементів [Текст] : монографія / Д. А. Ермоленко. – Полтава : Видавець Р. В. Шевченко, 2012. – 316 с.
23. UNE-EN 12390-3:2001. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas / Norma española. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación, 2001. 19 p.
24. UNE 83316:1996. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión / Norma española. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación, 1996. 16 p.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Johansson, M.; Gylltoft, K. Mechanical behavior of circular steel-concrete composite stub columns. In: *Engineering Structures*, 2002, No. 128(8), pp. 1073–1081.
14. Han, Lin-Hai; Qu, Hui; Tao, Zhong; Wang, Zai-Feng. 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.
15. Trull, V.; Sanzharovsky, R. Experimental researches of load capacity of steel concrete-filled tube. In: *News of Higher Educational Institutions «Buildings & Architecture»*, 1968, No. 3, pp. 27–30. (in Russian)
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Onishchenko, A. G.; Pichugin, S. F.; Onishchenko, V. A.; Semko, A. V.; Storozhenko, L. I.; Emelianova, I. A.; Landar, A. M. High efficiency technologies and complex structures in the constructions: Monograph. Poltava: ChF «Formika», 2009. 404 p. (in Russian)
21. Storozhenko, L.; Pents, F.; Korshun, S. Concrete-filled structures of industrial buildings: Monograph. Poltava: PolNTU, 2008. 202 p. (in Ukrainian)
22. Ermolenko, D. A. Three-dimensional stress-strain state of concrete-filled tubes' elements: Monograph. Poltava: Publisher R. V. Shevchenko, 2012. 316 p. (in Ukrainian)

23. UNE-EN 12390-3:2001. Ensayos de hormigón endurecido [Текст]. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas / Norma española. – Madrid : Asociación Española de Normalización y Certificación, 2001. – 19 p.
24. UNE 83316:1996. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión [Текст] / Norma española. – Madrid : Asociación Española de Normalización y Certificación, 1996. – 16 p.
25. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона [Текст]. – Введ. 01.01.1982. – М. : Стандартиформ, 2005. – 13 с.
26. ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення призмочної міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона [Текст]. – Уведено вперше (зі скасуванням в Україні ГОСТ 24452-80); чинні з 1 вересня 2010 року. – К. : Мінеріонбуд України, 2010. – 16 с.
27. Лецинский, М. Ю. Испытание прочности бетона [Текст] / М. Ю. Лецинский, Б. Г. Скрамтаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1973. – 272 с.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. Johansson, M. Mechanical behavior of circular steel-concrete composite stub columns [Текст] / M. Johansson, K. Gylltoft // *Engineering Structures*. 2002. № 128(8). P. 1073–1081.
36. Stolarsky, T. Engineering analysis with ANSYS software [Текст] / T. Stolarsky, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. – Bodmin : MPG Books Ltd., 2006. – 473 p.
25. GOST 24452-80. Concretes. Methods of prismatic compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio determination. Moscow: Standartinform, 2005. 13 p. (in Russian)
26. DSTU B V.2.7-217:2009. Building materials. Concrete. Methods of prismatic compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio determination. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 16 p. (in Ukrainian)
27. Leshchinsky, M. Yu.; Skramtaev, B. G. Tests of the concrete strength. Moscow: Stroiizdat, 1973. 272 p. (in Russian)
28. 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.
29. 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.
30. Tao, Z.; Uy, B.; Liao, F. Y.; Han, L. H. Nonlinear analysis of concrete-filled square stainless steel stub columns under axial compression. In: *Construction Steel Researches*, 2011, No. 67(11), pp. 1719–1732.
31. 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.
32. Georgios, G.; Lam, D. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, Vol. 60, pp. 1049–1068.
33. 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.
34. 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.
35. Johansson, M.; Gylltoft, K. Mechanical behavior of circular steel-concrete composite stub columns. In: *Engineering Structures*, 2002, No. 128(8), pp. 1073–1081.
36. Stolarsky, T.; Nakasone, Y.; Yoshimoto, S. Engineering analysis with ANSYS software. Bodmin: MPG Books Ltd., 2006. 473 p.
37. Basov, K. A. ANSYS: User reference. Moscow: DMK Press, 2005. 640 p. (in Russian)
38. Kaplun, A. B.; Morozov, E. M.; Olfereva, M. A. ANSYS at engineers: Practical guidance. Moscow: Editorial URSS, 2003. 272 p. (in Russian)
39. Koniuhov, A. V. Principles of structural analysis in ANSYS. Kazan: KSU, 2001. 102 p. (in Russian)
40. Chigarev, A. V.; Kravchuk, A. S.; Smaliuk, A. F. ANSYS for engineers: Reference book. Moscow: Mechanical Engineering, 2004. 510 p. (in Russian)
41. Morozov, E. M. ANSYS at engineer. Fracture mechanics. Moscow: LENAND, 2010. 456 p. (in Russian)
42. Basov, K. A.; Edited by Kraskovskii, D. G. ANSYS in case studies and problems. Moscow: Computer Press, 2002. 224 p. (in Russian)

37. Басов, К. А. ANSYS [Текст] : справочник пользователя [Текст] / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
38. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера [Текст] : Практическое руководство / А.Б.Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
39. Конохов, А. В. Основы анализа конструкций в ANSYS [Текст] / А. В. Конохов. – Казань : КГУ, 2001. – 102 с.
40. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров [Текст] : Справочное пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М. : Машиностроение, 2004. – 510 с.
41. Морозов, Е. М. ANSYS в руках инженера [Текст]. Механика разрушения / Е. М. Морозов. – М. : ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
42. Басов, К. А. ANSYS в примерах и задачах [Текст] / К. А. Басов ; Под общ. ред. Д. Г. Красковского. – М. : Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
43. Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды [Текст]. Практическое руководство / Под редакцией проф. А. К. Любимова. – Нижний Новгород : изд-во Нижегородского госуниверситета, 2006. – 277 с.
44. Лукьянова, А. Н. Моделирование контактной задачи с помощью программы ANSYS [Текст] / А. Н. Лукьянова. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 52 с.
43. Liubimov, A. K. (Ed.) Application of the ANSYS system to the problem solving of continuum mechanics. Practical guidance. Nizhny Novgorod: Publishing House of the Nizhny Novgorod State University, 2006. 277 p. (in Russian)
44. Lukianova, A. N. Simulation analysis of contact problem by the way of ANSYS program. Samara: Samara State Technical University, 2010. 52 p. (in Russian)

Гаранжа Ігор Михайлович – к. т. н., доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: вивчення дійсної роботи металевих ґратчастих, багатограних листових і трубобетонних опор повітряних ліній електропередавання, створення нових конструктивних рішень опор ПЛ із застосуванням прогресивних технологій і матеріалів.

Танасогло Антон Володимирович – к. т. н., доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність та оптимальне проектування конструкцій повітряних ліній електропередавання і антенних опор, вивчення дійсної роботи металевих ґратчастих конструкцій баштового типу.

Ягмур Анатолій Андрійович – доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: оптимальне проектування металевих конструкцій.

Фоменко Серафим Олександрович – магістр будівництва, асистент кафедри теоретичної та прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розвиток загальної методики динамічних розрахунків елементів будівельних конструкцій і пошук раціональних способів гасіння коливань.

Оржеховский Анатолій Миколайович – аспірант, асистент кафедри теоретичної та прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: дослідження дійсної роботи і показників надійності сталевих стаціонарних рамноконсольних покриттів над трибунами стадіонів.

Гаранжа Игорь Михайлович – к. т. н., 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 – к. т. н., 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.

Ягмур Анатолий Андреевич – доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: оптимальное проектирование металлических конструкций.

Фоменко Серафим Александрович – магистр строительства, ассистент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: развитие общей методики динамических расчетов элементов строительных конструкций и поиск рациональных способов гашения колебаний.

Оржеховский Анатолий Николаевич – аспирант, ассистент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: исследование действительной работы и показателей надежности стальных стационарных рамноконсольных покрытий над трибунами стадионов.

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.

Yagmur Anatoliy – Associate Professor; Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: optimal design of building structures.

Fomenko Serafim – Master in Engineering, teaching fellow; assistant, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: development of the general dynamic design technique of building structure elements and search for the rational ways of vibration damping.

Orzhekhovskiy Anatoliy – post-graduate student; Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: research of the real work and indicators of reliability of stationary steel frame-cantilever coverings over the stands of stadiums.