

УДК 624.016:69.059

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.172.2017.116728>

**ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРУБОБЕТОННИХ КОЛОН ІЗ РОЗНІМНИМИ
СТИКАМИ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Асп. П. О. Семко (ПНТУ ім. Юрія Кондратюка)

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРУБОБЕТОННЫХ КОЛОН С РАЗЪЕМНЫМИ
СТЫКАМИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Асп. П. О. Семко (ПНТУ им. Юрия Кондратюка)

**NUMERICAL MODELING OF CONCRETE FILLED TUBULAR COLUMNS WITH
SEPARABLE JOINTS BY FINITE ELEMENT METHOD**

Postgraduate P. O. Semko

У статті подано результати числового моделювання трубобетонних зразків з рознімним фланцевим стиком, із рознімним стиком, виконаним за допомогою поздовжніх ребер та сталеві муфти, а також зразків без стиків. Для всіх досліджуваних зразків, які були попередньо випробувані експериментально, були створені ідентичні реальним математичні моделі, для яких, за допомогою чисельного моделювання у програмному комплексі Фетар, був досліджений напружено-деформований стан та подано графічні зображення головних напружень.

Ключові слова: трубобетон, рознімні стики, числове моделювання.

В статье представлены результаты численного моделирования трубобетонных образцов с разъемным фланцевым стыком, с разъемным стыком, выполненным с помощью продольных ребер и стальной муфты, а также образцов без стыков. Для всех исследуемых образцов, которые были предварительно испытаны экспериментально, были созданы идентичные реальным математические модели, для которых с помощью численного моделирования в программном комплексе Фетар, было исследовано напряженно-деформированное состояние и представлены графические изображения главных напряжений.

Ключевые слова: трубобетон, разъемные стыки, численное моделирование.

This paper deals with results of numerical modeling of concrete filled tubular samples with separable flange joint, with separable joints made with the help of longitudinal ribs and steel couplings as well as samples without joints. For all investigated samples that were previously tested experimentally, identical real mathematical models were created for which with the help of numerical simulation in the software complex Femap, the stress-strain state was investigated and graphic representations of the main stresses were presented.

The stresses in the compressed and stretched zone of the concrete filled tubular element were compared in accordance with the experimental data and, consequently, the results of numerical simulation. The mean square deviation and the coefficient of variation of the data obtained varied within the range of 5-7%, which is admissible and suggests that the modeling results correspond to the experiment.

Keywords: concrete filled tubular structure, separable joints, numerical modeling.

Вступ. За останні два десятиріччя з значним розвитком доступності і можливостей комп'ютерів перед дослідниками відкрилися майже необмежені перспективи для розрахунку і моделювання конструкцій за допомогою САПР (Систем автоматизованого проектування). За кордоном зазвичай використовуються терміни CAD/CAE/CAM, де CAD (*computer-aided design*) – використання комп'ютерних технологій для проектування, CAM (*computer-aided manufacturing*) – під цим терміном розуміють як власне процес комп'ютеризованої підготовки виробництва, так і програмні комплекси, які при цьому використовуються, а також CAE (*computer-aided engineering*) – загальна назва програмних комплексів, створених для вирішення різноманітних інженерних завдань: розрахунку, аналізу та моделювання фізичних процесів, найбільш відомі серед них ABAQUS, ANSYS, ESAComp, Femap, CAE Fidesys, HyperWorks, Moldex3D, NX Nastran та багато інших.

Аналіз останніх досліджень. Трубобетонні конструкції особливо активно досліджуються у всьому світі останні 30-40 років, що відображено у роботах Л. І. Стороженка [1], А. Е. Лопатто [2], К. Тан [4], Yamersi [5], Х. Л. Zhao, T. Wilkinson, G. Hancock [6] та зокрема у нормах Eurocode [3].

За кордоном сталеві трубчасті конструкції та власне трубобетонні почали досліджувати і застосовувати в КНР, США та

Європі починаючи з 1950-х років [6-11]. Особливостям числового моделювання взагалі та стиків трубобетонних конструкцій зокрема присвячені праці С. П. Ричкова [8] та J. J. Cao and A. J. Bell [7].

Визначення мети та задачі дослідження. Метою цієї роботи було порівняння даних, отриманих числовим методом, із результатами експериментальних досліджень трубобетонних елементів із різними стиками.

Основна частина дослідження. Було виконано числове моделювання 13 зразків, зокрема труби без бетонного заповнення, трубобетонних зразків без стику, трубобетонних зразків із рознімним фланцевим стиком, із стиком, виконаним за допомогою поздовжніх ребер, та стиком, виконаним за допомогою сталеві муфти. Розглядалися випадки центрального стиску та позacentрового з ексцентриситетами прикладення навантаження, рівними 0,25 та 0,5 від діаметра зразка.

Числове моделювання трубобетонних зразків серій Т та ТБ

Зразки серій Т та ТБ являли собою сталеву трубу з товщиною стінки 4 мм, висотою 800 мм та діаметром 108 мм, без стиків. Зразок Т випробовувався для отримання результатів несучої здатності виключно сталеві труби-оболонки не заповненої бетоном. Зразок досліджувався на центральний стиск. Зразки ТБ 1-3 це заповнені бетоном труби з аналогічними розмірами, без стиків, що були досліджені

на центральний та позacentровий стиск із ексцентриситетами 0,25 та 0,5 від діаметра труби-оболонки.

Моделювання зразків методом скінченних елементів підтвердило характерний випадок руйнування, як можна побачити з рис. 1, де зображені головні напруження, отримані за допомогою числового моделювання. Для зразків із випадковим (центральним) прикладенням навантаження значення напружень були рівномірними майже для всього

досліджуваного елемента, із зростанням поблизу оголовків, що призвело до утворення гофр, які спостерігалися під час експериментальних випробувань.

Для позacentрово стиснутих трубобетонних елементів ТБ-2 та ТБ-3, як можна помітити з рис. 1, характерне нерівномірне розподілення напружень, з поступовим зростанням при наближенні до верхнього сталевго оголовка, що підтверджується експериментальними даними.

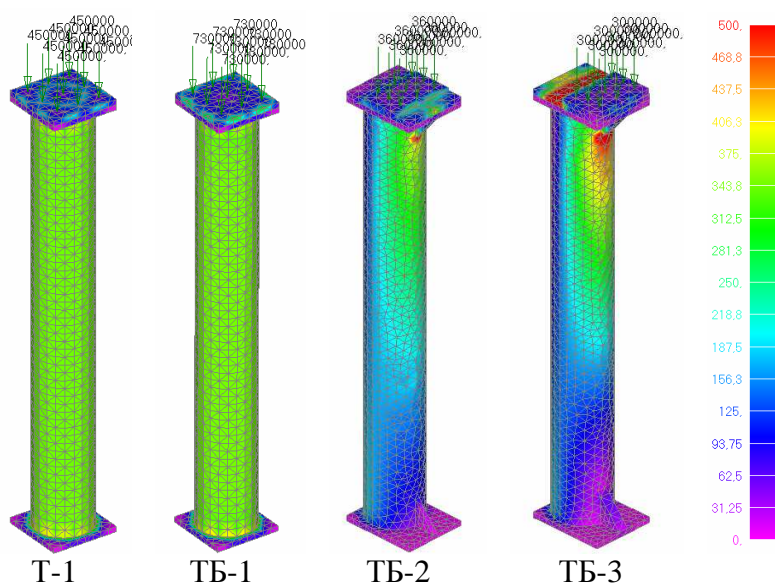


Рис. 1. Графічне зображення головних напружень при числовому моделюванні для досліджуваних зразків серій Т та ТБ

Числове моделювання трубобетонних зразків серії ТБР

Зразки серії ТБР являли собою сталеву трубу з товщиною стінки 4 мм, висотою 800 мм та діаметром 108 мм, заповнену бетоном, із рознімним стиком, виконаним за допомогою чотирьох пар сталевих поздовжніх ребер, кожне з яких приварене до верхньої або нижньої частини конструкції та з'єднаних попарно чотирма болтами (рис. 2).

Трубобетонні елементи досліджувалися на центральний та позacentровий стиск. При центральному стиску фактично

відбувалося випробування двох, жорстко з'єднаних за допомогою поздовжніх ребер, трубобетонних елементів, аналогічних зразку ТБ-1, унаслідок чого спостерігалося рівномірне розподілення напружень, із підвищенням біля верхнього сталевго оголовка, що призвело до утворення у цьому місці гофри. Проте область з'єднання зразків по факту була підсилена ребрами, що привело до зменшення напружень у цій області. Це підтверджується як математичним моделюванням, так і характером деформацій, зафіксованим при експерименті.

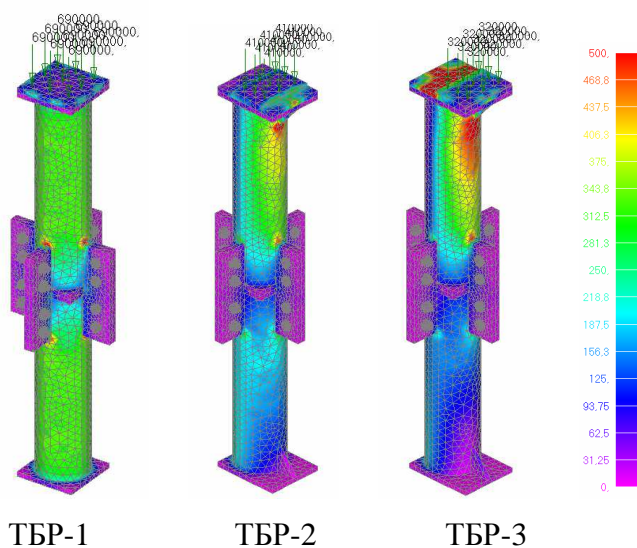


Рис. 2. Графічне зображення головних напружень при числовому моделюванні для досліджуваних зразків серії ТБР

Для позacentрово стиснутих зразків ТБР-2 та ТБР-3, окрім характерного для всіх трубобетонних елементів із аналогічним способом прикладення навантаження значного зростання напружень поблизу верхньої сталеві косинки, привертало увагу зменшення напружень у нижньому трубобетонному елементі при збільшенні ексцентриситету. Також для всіх зразків цієї серії спільним є те, що не відбулося ні зрізу болтів, ні деформування сталевих поздовжніх фланців, доказом чого є як математичне моделювання, так і експериментальні дані.

У місцях з'єднання поздовжніх ребер із трубобетонними елементами спостерігалися місця концентрації напружень.

На рис. 3 більш детально зображено місце стику трубобетонних елементів. Слід відзначити, що при центральному стиску напруження в стику були більшими, ніж при позacentровому, що свідчить про те, що для цієї конструкції вплив розміру навантаження, яке діяло на зразок, мало більший вплив, ніж ексцентриситет прикладення навантаження. Це відповідає експериментальним даним, згідно з якими деформації ребер при центральному стиску були вищими, ніж при позacentровому.

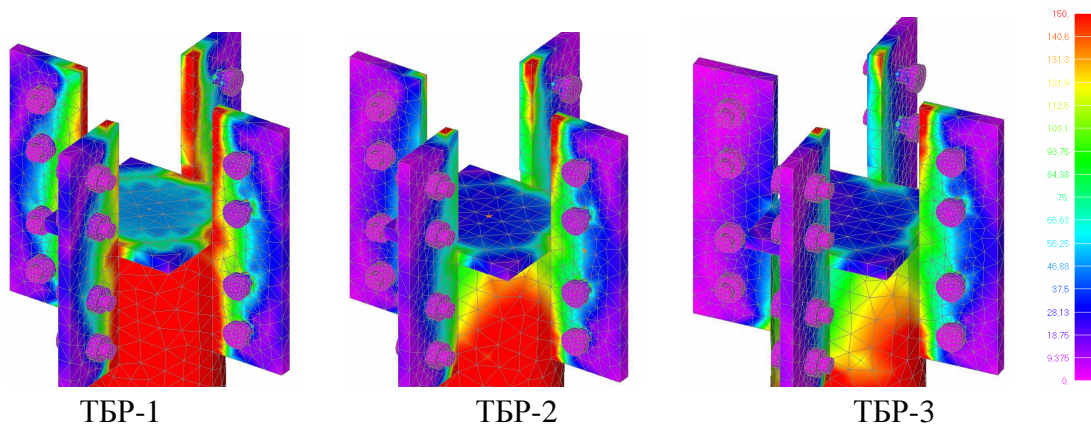


Рис. 3. Графічне зображення головних напружень у нижній частині стику з поздовжніми ребрами

Також можна звернути увагу на те, що при позacentровому стиску напруження більші у стиснутих поздовжніх ребрах, проте при згині руйнування зразків відбувалося внаслідок зрізання болтів у розтягнених ребрах.

Числове моделювання трубобетонних зразків серії ТБФ

Зразки серії ТБФ (рис. 4) мали аналогічну з іншими дослідними зразками конструкцію трубобетонного елемента та

відрізнялися методом виконання рознімного з'єднання. Цей стик виконувався за допомогою сталевих круглих фланців з фрезерованою поверхнею, приварених до верхнього або нижнього трубобетонного елемента та з'єднаних болтами. Навантаження прикладалося центрально та з ексцентриситетами, рівними 0,25 та 0,5 від діаметра труби. За граничні умови були прийняті закріплення, аналогічні тим, що були при проведенні експерименту.

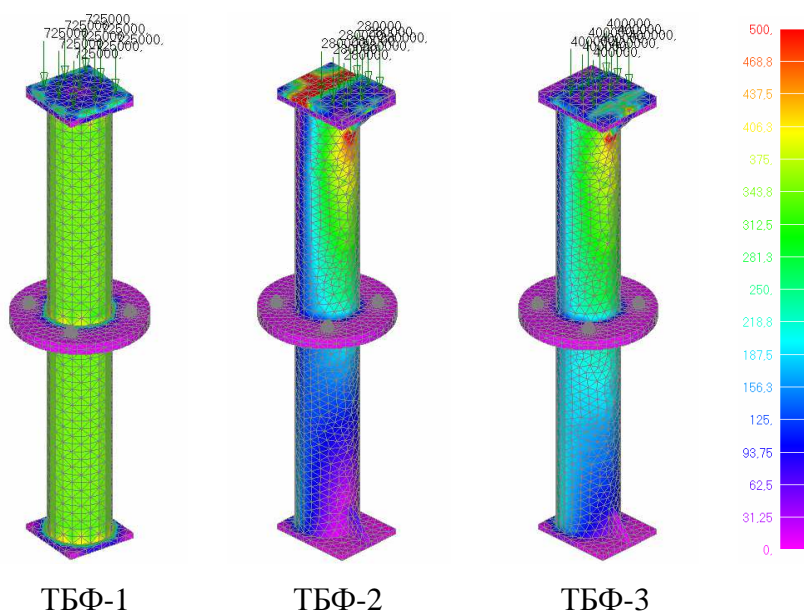


Рис. 4. Графічне зображення головних напружень при числовому моделюванні для досліджуваних зразків серії ТБФ

При математичному моделюванні було підтверджено той факт, що наявність стику при центральному стиску практично не мала впливу на несучу здатність конструкції, настання N_1 при моделюванні відбулося при навантаженні, аналогічному експериментальному, що свідчить про достовірність числового моделювання.

Особливістю позacentрово стиснутих зразків є те, що напруження у сталевих фланцях порівняно із напруженнями у власне трубобетонних елементах є дуже незначними навіть при зростанні ексцентриситету навантаження. Також характерним є те, що напруження та

відповідно деформації у верхніх трубобетонних елементах були значно вищими, ніж у нижніх, що свідчить про те, що наявний стик виступає фактично підсиленням усієї конструкції. Так, при проведенні експерименту всі зразки із стику при прикладенні навантаження з ексцентриситетом 0,5 від діаметра мали несучу здатність вищу, ніж суцільний зразок, більш ніж на 30 %.

Аналізуючи напружено-деформований стан сталевих фланців, можна сказати, що у всіх випадках прикладення навантаження напруження були незначними порівняно із напруженнями у

трубобетонному елементі, що привело до того, що фланці під час проведення експерименту залишилися фактично неушкодженими, а втрата несучої здатності відбувалася внаслідок руйнування трубобетонного елемента або болтів.

Числове моделювання трубобетонних зразків серій ТБМ

Для виготовлення зразків серії ТБМ (рис. 5), окрім стандартної для всього

експерименту труби висотою 800 мм, діаметром 100 мм та товщиною стінки 4 мм, була використана додаткова труба (муфта) з товщиною стінки 2,5 мм та з внутрішнім і зовнішнім діаметром 108 та 113 мм відповідно. Вона була приварена до нижнього трубобетонного елемента та з'єднана з верхніми болтами. Навантаження та граничні умови були аналогічними зі зразками інших серій.

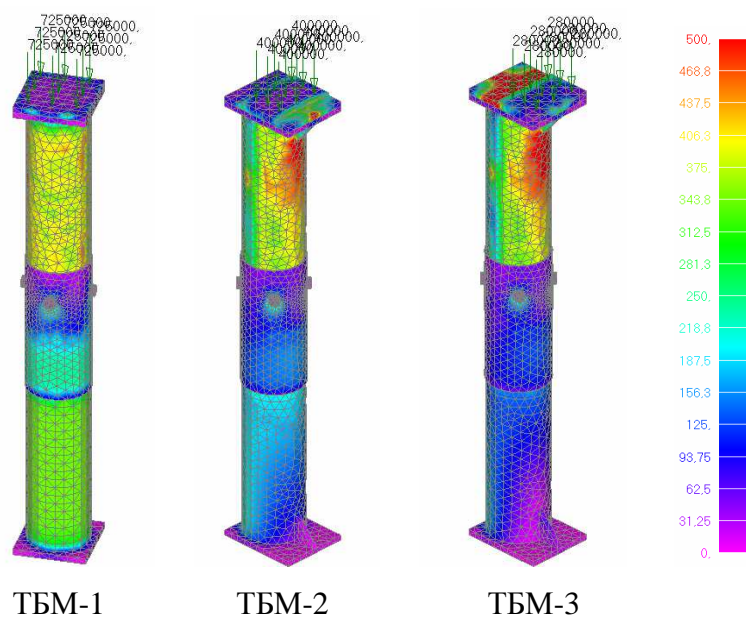


Рис. 5. Графічне зображення головних напружень при числовому моделюванні для досліджуваних зразків серії ТБМ

Розглядаючи випадок центрального стиску зразка ТБМ-1, заслуговує уваги те, що зважаючи на дещо більше навантаження порівняно з іншими зразками, напруження у верхньому трубобетонному елементі були на 10-15 % вищими, ніж у нижньому, що є нехарактерним для центрально завантажених зразків інших серій у цьому експерименті та пояснюється впливом сталеві муфти. Також дуже цікавим є те, що найбільші напруження були у сталевій муфті саме при центральному стиску, оскільки в інших випадках трубобетонний елемент втрачав несучу здатність у верхній частині при значно менших навантаженнях.

Позацентрово стиснуті зразки, окрім вищої несучої здатності, не мали значних відмінностей від аналогічних зразків інших серій, демонструючи зростання напружень поблизу з'єднання косинки з верхнім елементом, що зі збільшенням навантаження призвело до зростання деформацій у цьому місці та втрати несучої здатності внаслідок цього. Також спільним є зменшення напружень у нижньому трубобетонному елементі.

Аналізуючи напружено-деформований стан сталеві муфти, слід відзначити появу незначних концентраторів напружень поблизу отворів для болтів. Аналогічно стику

із поздовжніми ребрами напруження були дещо більшими при центральному стиску, особливо в нижній частині муфти (рис. 6).

У таблиці подано порівняння результатів, отриманих під час проведення експериментальних досліджень трубобетонних елементів та числового моделювання. Порівнювалися напруження у стиснутій та розтягнутій зоні досліджуваного зразка при досягненні N_1 . Експериментальні напруження були обчислені завдяки відомим деформаціям згідно з законом Гука. Значення теоретичних напружень отримані із

програмного комплексу Femap. Середньоквадратичне відхилення напружень у стиснутій зоні становило 6,7 %, коефіцієнт варіації – 6,8 %; у розтягнутій зоні середньоквадратичне відхилення – 4,96 %, коефіцієнт варіації – 5,02 %. Спираючись на вищенаведені значення, можна сказати, що розбіжність результатів є незначною та коливається у межах мінливості матеріалів, що підтверджує об'єктивність та реалістичність математичного моделювання стиснутих трубобетонних зразків у програмному комплексі Femap.

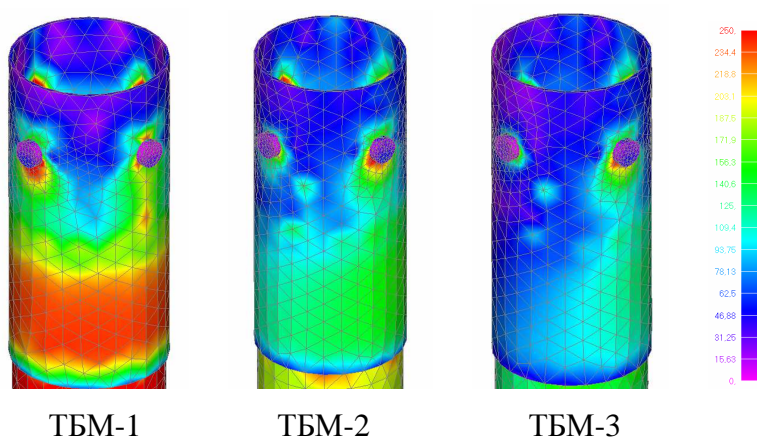


Рис. 6. Графічне зображення головних напружень у нижній частині рознімного стику зі сталеву муфтою

Таблиця

Порівняння експериментальних та теоретичних напружень

Шифр зразка	Ексц. е, мм	Нес. здат. N_1 , кН	$\sigma_{\text{екс.ст}}$ МПа	$\sigma_{\text{мод.ст}}$ МПа	σ_i ст.	$\sigma_{\text{std ст.}}$	$\sigma_{\text{екс.роз}}$ МПа	$\sigma_{\text{мод.роз}}$ МПа	σ_i роз.	$\sigma_{\text{std роз.}}$
Т-1	0	450	327	343	0,9534	0,00166	327	343	0,9534	0,00123
ТБ-1	0	730	336	345	0,9739	0,00040	336	345	0,9739	0,00021
ТБ-2	27	360	273	253	1,0791	0,00723	147	142	1,0352	0,00219
ТБ-3	54	300	332	293	1,1331	0,01934	72	78	0,9231	0,00427
ТБР-1	0	690	368	334	1,1018	0,01161	368	334	1,1018	0,01285
ТБР-2	27	410	340	347	0,9798	0,00020	42	40	1,0500	0,00379
ТБР-3	54	320	316	341	0,9267	0,00454	120	122	0,9836	0,00002
ТБФ-1	0	700	310	334	0,9281	0,00434	310	334	0,9281	0,00363
ТБФ-2	27	400	331	340	0,9735	0,00042	48	51	0,9412	0,00223
ТБФ-3	54	280	326	345	0,9449	0,00241	119	117	1,0171	0,00082
ТБМ-1	0	725	331	334	0,9910	0,00001	331	334	0,9910	0,00001
ТБМ-2	27	400	349	342	1,0205	0,00070	76	79	0,9620	0,00070
ТБМ-3	54	280	330	360	0,9167	0,00599	183	185	0,9892	0,00000

Висновки з дослідження. Після виконання числового моделювання трубобетонних елементів із розніжними стиками методом скінченних елементів можна зробити такі висновки.

Для всіх досліджуваних зразків, які були випробувані експериментально, були створені ідентичні реальним математичні моделі, для яких за допомогою числового моделювання у програмному комплексі Femap був досліджений напружено-деформований стан та подано графічні зображення головних напружень, що дають змогу оцінити напруження у будь-якій

точці зразка, місця концентрації напружень тощо. Були порівняні напруження у стиснутій та розтягненій зоні трубобетонного елемента, визначені згідно з експериментальними даними та відповідно до результатів числового моделювання. Середньоквадратичне відхилення та коефіцієнт варіації отриманих даних коливались у межах 5-7 %, що є допустимим та свідчить про те, що результати моделювання відповідають експерименту та в подальшому з метою часткової заміни натурних випробувань може застосовуватися числове моделювання.

Список використаних джерел

1. Стороженко, Л. И. Трубобетонные конструкции [Текст] / Л. И. Стороженко. – К.: Будівельник, 1978. – 82 с.
2. Лопатто, А. Э. О свойствах бетона, твердеющего в замкнутой обойме и жесткости трубобетонных элементов [Текст] / А. Э. Лопатто // Строительные конструкции. – К.: Будівельник, 1973. – Вып. 11. – С. 232-234.
3. Eurocode 4: EN 1994-1-1: 2004 Design of composite steel and concrete structures. Part 1.1. Brussels, 2004. – 127 p.
4. Mechanical Properties of High Strength Concrete Filled Steel Tubular Columns [Text] / Ke Feng Tan, Lai Bao Liu // Advanced Materials Research Vols. 472-475 (2012) – P. 1119-1125.
5. Thai H.T., Uy B., Yamersi, Aslani F. Behavior of bolted endplate composite joints to square and circular CFST columns [Text] // Journal of constructional Steel Research. – 2017. – Vol. 131. – P.68-82.
6. Zhao X.L., Wilkinson T., Hancock G.J. (2005), Cold-Formed Tubular Members and Connections [Text] // Elsevier Science Pty Ltd, Oxford, UK. – 2005. – 241 P.
7. Cao J.J. and Bell A.J. Finite element analysis of circular flange joints under tension forces [Text] // Proceedings of the 9th UK ABAQUS User Group Conference. – Exeter College, Oxford, U.K. – 1994.
8. Рычков, С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran [Текст] / С. П. Рычков. – М.: ДМК Прес, 2013. – 784 с.: ил.

Семко Павло Олександрович, аспірант кафедри конструкцій з металу, дерева та пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел.(050) 203-80-40. E-mail: syomka7@gmail.com.

Semko Pavlo, Postgraduate of the Department of Structures from metal wood and plastics Poltava National Technical Yuri Kondatyuk University. E-mail: syomka7@gmail.com.

Стаття прийнята 30.10.2017 р.