

ОЦІНКА ПРАКТИЧНОЇ ЗБІЖНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ АНАЛІЗУ ПЛАСТИНЧАСТИХ МОДЕЛЕЙ В МЕТОДІ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В практиці розрахунку будівельних конструкцій методом скінчених елементів із застосуванням пластинчастих моделей для коригування результатів в особливих зонах останнім часом використовується Hot-Spot-Stress процедура. Для уточнення технології її застосування автором проведені спеціальні дослідження на тестових моделях та моделях реальних конструкцій. В роботі наведені результати оцінки збіжності напружень в особливих зонах для пластинчастих моделей будівельних конструкцій, що розраховувалися із використанням методу скінчених елементів на базі ПОК SCAD for Windows. Їх аналіз свідчить про те, що використання пластинчастих скінченно-елементних моделей при врахуванні статичних навантажень є досить некоректним, та навіть заявлена процедура HSS виявляється недостатньою для отримання практично прийнятного рівня напружень. Тому пошук більш коректного підходу або процедури апроксимації має бути продовжений для різних випадків співвідношень жорсткісних характеристик розраховуваних елементів.

Ключові слова: метод скінчених елементів, пластинчаста модель, збіжність напружень, сингулярність.

В практике расчетов строительных конструкций методом конечных элементов с применением пластинчатых моделей для корректировки результатов в особых зонах в последнее время применяется Hot-Spot-Stress процедура. Для уточнения технологии ее использования автором проведены специальные исследования на тестовых моделях и моделях реальных конструкций. В работе приведены результаты оценки сходимости

напряжений в особых зонах для пластинчатых моделей строительных конструкций, которые рассчитывались с использованием метода конечных элементов на базе ПК SCAD for Windows. Их анализ свидетельствует про то, что применение пластинчатых конечно-элементных моделей при учете статических нагрузок является достаточно некорректным, и даже заявленная процедура HSS оказывается недостаточной для получения практически приемлемого уровня напряжений. Поэтому поиск более корректного подхода или процедуры аппроксимации должен быть продолжен для различных случаев соотношений жесткостных характеристик рассчитываемых элементов.

Ключевые слова: метод конечных элементов, пластинчатая модель, сходимости напряжений, сингулярность.

In practical calculations of engineering structures by means of Finite Element Method with application of plate models for adjustments in special areas recently Hot-Spot Stress procedure are applied. To clarify the technology of its use, the author conducted a special research on test models and models of real structures. The paper presents the results of the estimation of convergence of the stresses in special areas for plate models of building structures, which were calculated using the Finite Element Method on the basis of complex SCAD for Windows. Their analysis shows about the fact that the application of plate finite element models considering static loads is quite incorrect, and even stated the procedure for HSS is not sufficient for obtaining practically acceptable level of stresses. Therefore, the search for a more correct approach or approximation procedure should be continued for the different cases of ratio of the stiffness characteristics of the calculated elements.

Key words: finite element method, plate model, convergence of the stress singularity.

Актуальність проблеми. В останні десятиріччя в галузі проектування будівельних конструкцій, так само як і машин та механізмів, практично

безальтернативним методом розрахунку став один з чисельних методів будівельної механіки – метод скінчених елементів (МСЕ). Він був теоретично розроблений завдяки роботам О. Зенкевича [1], Г. Стренга [2] й ін. та введений у вітчизняну практику проектування різноманітних конструкцій на основі досліджень Л.О. Розіна [3], К.П. Горбачьова [4] та багатьох інших фахівців.

Метод має багато переваг, таких як наочна простота, придатність для формалізації у вигляді комп'ютерних програм, можливість аналізу складних систем та рішення динамічних задач, тощо. Ці переваги досить докладно та добре описані в спеціалізованій літературі та багаторазово підтверджені фахівцями при рішенні практичних задач [5, 6].

Одним з класів таких задач є побудова та аналіз на різноманітні статичні навантаження й впливи моделей несучих елементів будівельних конструкцій з використанням пластинчастих скінчених елементів. При цьому в різних програмних продуктах (таких як COSMOS-M, NASTRAN, FeMap, SCAD, Lira, ROBOT і т.д.) перевагу надають різним типам плоских скінчених елементів, які відрізняються як за геометричною формою, так і за математичною моделлю. Проте в усіх випадках використовується принцип знаходження зусиль, а далі напружень в досліджуваній області, через апроксимацію вузлових переміщень, які обчислюються точно.

На практиці це призводить до одного не досить приємного ефекту, який може бути названий як сингулярність за напруженнями. Цей ефект почав відмічатися фахівцями по мірі того, як підвищувалась потужність комп'ютерів, що надавало можливість створювати скінчено-елементні сітки з все більш дрібними елементами. Сутність ефекту полягає у відсутності збіжності (навіть наявності необмеженого росту рівня напружень) в місцях зміни геометрії досліджуваної області. Так, наприклад, за даними розробників програмного комплексу ANSYS, максимальний кут зміни геометрії простору має не перевищувати 5° , хоча практичні результати з цього приводу не наводяться.

Така ситуація викликає суттєві складнощі при аналізі результатів розрахунку пластинчастих моделей в зонах стиковки окремих елементів між

собою, наприклад, місцях приєднання ребер жорсткості або з'єднання стінок і полок елементів. Фактично, в цих зонах унеможлиблюється отримання коректних результатів і призначення необхідних жорсткісних характеристик елементам конструкцій.

Аналіз останніх досліджень. Намагаючись вирішити дану проблему в останні роки розробляються різні підходи, одним з яких є так званий Hot-Spot-Stress метод (HSS). Його ідея полягає у виключенні області сингулярності з аналізу та лінійній екстраполяції отримуваних результатів в сусідніх областях простору на цю область. При цьому в якості границі некоректної області вказується відстань в пів-товщини елемента від її центру [7 – 11].

Автор даної публікації на протязі досить тривалого періоду часу займався практичними розрахунками різноманітних конструкцій МСЕ [12, 13], тому проблема збіжності результатів розрахунків та їх практичної оцінки його цікавила в повній мірі. Були проведені практичні дослідження стосовно застосування HSS-підходу для тестових моделей [14, 15], результати яких свідчили про можливість отримання стійкої збіжності результатів розрахунків, в першу чергу напружень, з однієї сторони та занадто високого їх рівня, порівняно з очікуваними даними, з іншої сторони. Таким чином, однозначних рекомендацій стосовно процедури використання HSS-підходу отримати не вдалося.

Мета досліджень. Новий цикл досліджень з метою уточнення технології застосування HSS-підходу був проведений на моделях реальних конструкцій.

Сутність досліджень. Всі моделі були побудовані в ПОК SCAD for Windows з використанням пластинчастих ізопараметричних елементів трикутної та прямокутної форми зі стандартної бібліотеки комплексу. В якості досліджуваних моделей розглядались скінченно-елементні моделі (СЕМ) покрівлі павільйону літнього кафе в м. Судак (рис. 1), бункеру агломерату комбінату «Криворіжсталь» (рис. 2) та силосу для зберігання пшениці одного з підприємств Черкаської області (рис. 3).

В усіх випадках прикладались реальні значення статичних навантажень, визначені за діючими нормами або за заданими характеристиками відповідного технологічного процесу. Динамічні навантаження і впливи не розглядались. Розрахунки проводились в геометрично лінійній постановці з урахуванням пружної роботи матеріалу – сталь.

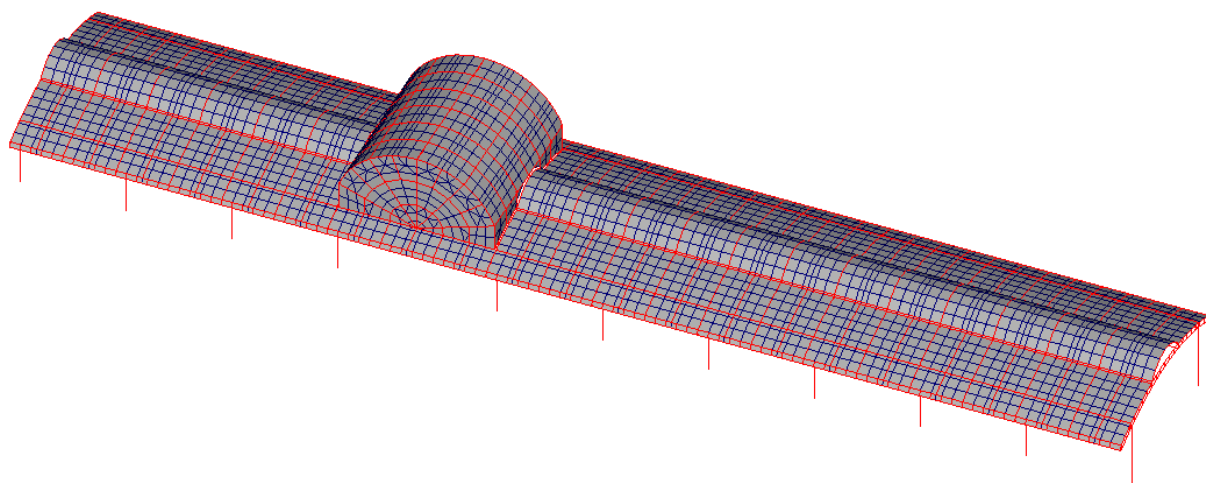


Рис. 1. СЕМ літнього кафе в м. Судак.

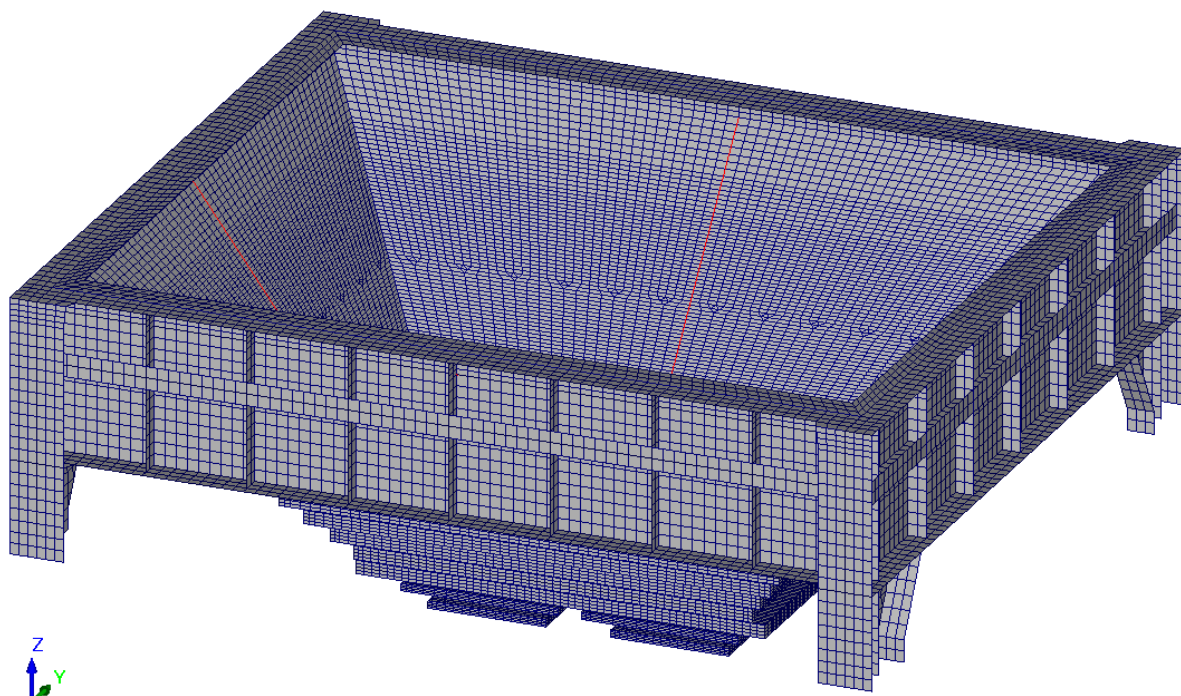


Рис. 2. СЕМ бункеру агломерату комбінату «Криворіжсталь».

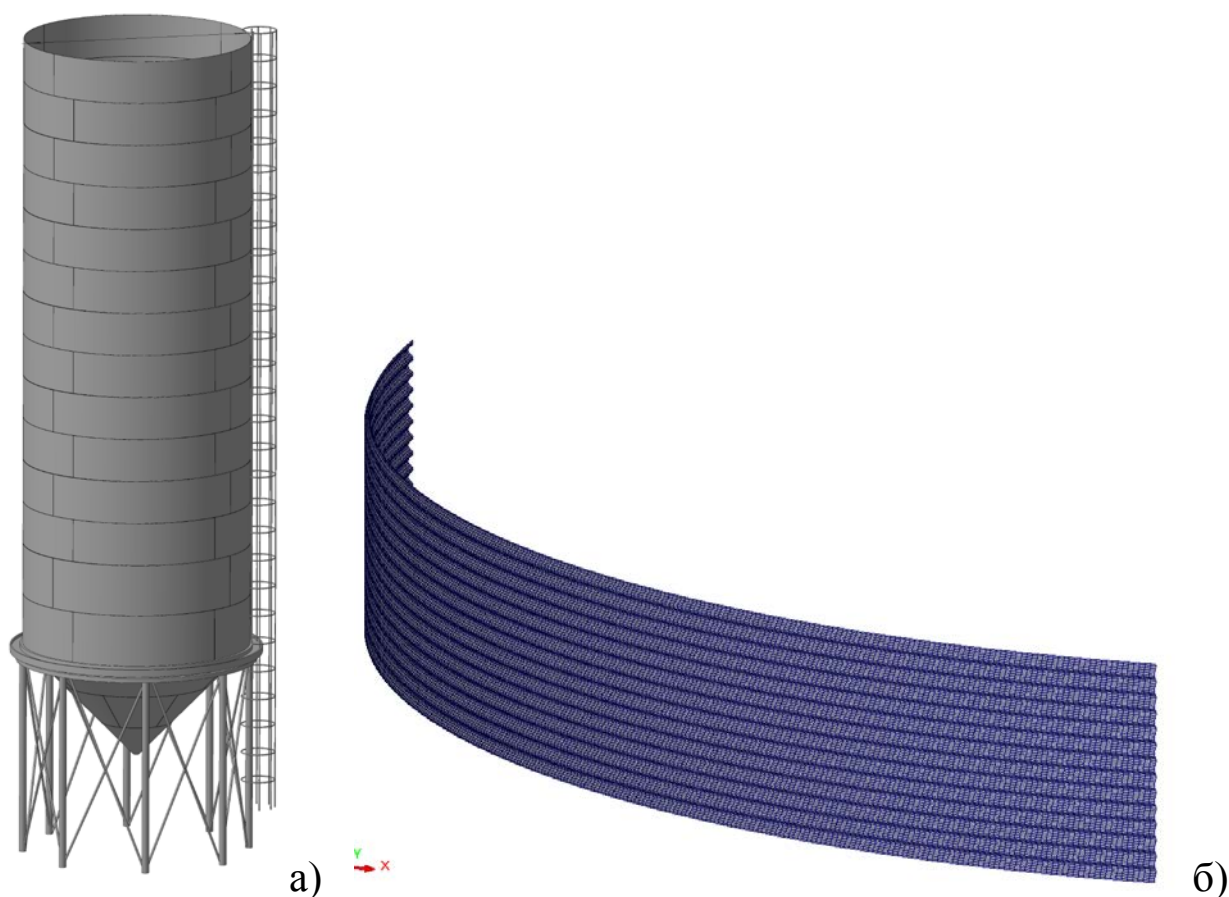


Рис. 3. Конструктивна схема (а) та фрагмент СЕМ (б)
силосу для зберігання пшениці.

За результатами аналізу для кожної моделі було встановлено наявність особливих зон концентрації напружень. Вони спостерігались в місцях з'єднання різних елементів конструкцій, особливо де кут спряжіння наближався до 90° (приклад на рис. 4 виділено більш темним кольором). При цьому зі зменшенням густини скінченно-елементної сітки спостерігався необмежений зріст напружень, що в повній мірі характеризує сингулярність отриманого рішення (ряд 1 на рис. 5).

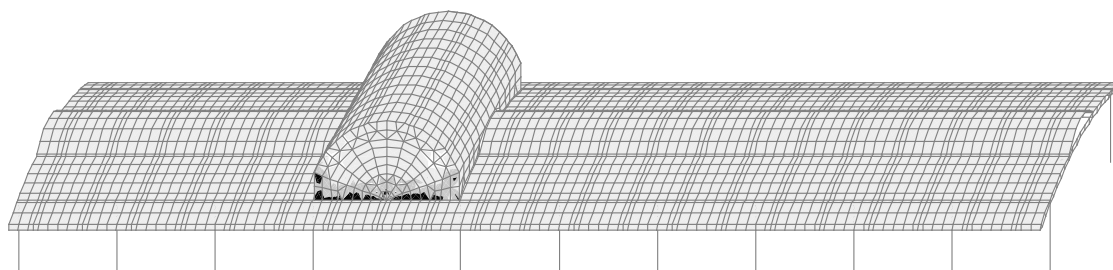


Рис. 4. Зона концентрації напружень в СЕМ літнього кафе в м. Судак.

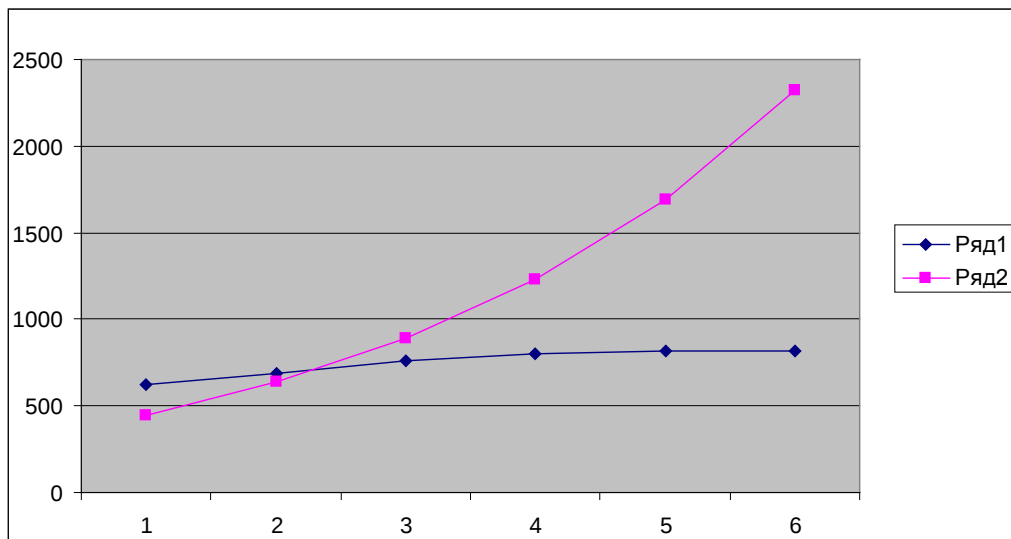


Рис. 5. Зміна рівня напружень (МПа) в особливих зонах СЕМ моделей.

Надалі для коригування результатів була використана процедура HSS, в результаті чого напруження стабілізувались (ряд 2 на рис. 5) проте залишились на досить високому рівні. В практиці ж виникнення таких напружень призвело б неминучої аварії конструкцій, чого в дійсності не спостерігається.

Висновки. В цілому, як показують результати аналізу, виконані особисто автором, застосування процедури HSS виявляється недостатньо для отримання практично прийнятного рівня напружень, оскільки такий підхід в кінцевому результаті призводить до зменшення рівня напружень на 10-15 % порівняно з результатами на не коригованій сітці MCE. Збільшення границі некоректної області в багатьох випадках призводить до неможливості проведення апроксимації за процедурою HSS, особливо для елементів будівельних конструкцій великої товщини (для залізобетонних та кам'яних конструкцій).

Таким чином, використання пластинчастих скінченно-елементних моделей при аналізі на дію статичних навантажень, на думку автора, є досить некоректним та потребує, як мінімум використання спеціальної додаткової процедури HSS, а як максимум унеможлиблює використання отриманих результатів розрахунків в частині напружень. Також дослідження в цьому напрямку мають бути продовжені з метою напрацювання більш чітких рекомендацій стосовно процедури HSS для різних випадків співвідношень жорсткісних характеристик розраховуваних елементів.

Література:

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
2. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 350 с.
3. Розин Л.А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам. – М.: Стройиздат, 1977. – 129 с.
4. Горбачев К.П. Метод конечных элементов в расчетах прочности. – Л.: Судостроение, 1985. – 156 с.
5. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – Киев: ВПП «Компас», 2001. – 448 с.
6. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / А.С. Городецкий, В.И. Зоворицкий, А.И. Лантух-Лященко, А.О. Рассказов. – М.: Транспорт, 1981. – 143 с.
7. Fricke W. Evaluation of Hot Spot Stresses in Complex Welded Structures // Ship Structural Design and Analysis: TU Hamburg-Harburg, 2000, pp. 91 – 102.
8. Fatigue Assessment of Aluminum Ship Details by Hot-Spot Stress Approach / Bård W. T., Xiaozhi W. Stig B. // ABS TECHNICAL PAPERS 2007, pp. 255 – 271.
9. Maddox S. J. Hot-Spot Stress Design Curves for Fatigue Assessment of Welded Structures // International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2003, Vol. 12, No. 2, pp. 143 – 151.
10. Finite element methods for structural hot spot stress determination: a comparison of procedures / Poutiainen I., Tanskanen P., Marquis G. // International journal of fatigue, 2004, Vol. 26, No. 11, pp. 1147 – 1157.
11. Конструктивные приемы снижения концентрации напряжений в сталеразливочных стендах МНЛЗ / Л.В. Буланов, И.Ф. Волегов, В.С. Горлицын, Т.Г. Химич, М.В. Масаев // Неделя металлов в Москве: сб. трудов конференций и семинаров. – М.: ВНИИметмаш : Металлургиздат, 2007. – с. 228 – 234.

12. Банников Д.О., Казакевич М.И. Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов. – Д.: Наука и образование, 2003. – 150 с.
13. Качуренко В.В., Банников Д.О. Конструктивные решения стальных емкостей для сыпучих материалов. – Д.: Новая идеология, 2016. – 168 с.
14. Банников Д.О., Гуслистая А.Э. Оценка сходимости напряжений в сложных металлоконструкциях методом конечных элементов / Металлургическая и горнорудная промышленность, 2011. – № 4. – с. 93 – 96.
15. Банников Д.О., Гуслистая А.Э. Корректировка результатов расчета напряжений по МКЭ методом HSS / Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ, 2011. – Вип. 38. – с. 134 – 141.

Література для розширеної анотації:

1. Zenkevitch O. (1975). Finite Element method in technique. Moscow, USSR: Mir, 542.
2. Streng, G., Fiks, Jn. (1977). Theory of finite element method. Moscow, USSR: Mir, 350.
3. Rozin, L.A. (1977). Finite element method in application to linear systems. Moscow, USSR: Strojizdat, 129.
4. Gorbachev, K.P. (1985). Finite element method in strength calculations. Leningrad, USSR: Sudostoenie, 156.
5. Perelmuter, A.V., Slivker, V.I. (2001). Estimated models of structures and possibility of their analysis. Kiev, Ukraine: Kompas, 448.
6. Gorodetsky, A.S., Zovoritsky, V.I., Lantuh-Lashenko, A.I., Rasskazov A.O. (1981). Finite element method in designing of transport structures. Moscow, USSR: Transport, 143.
7. Fricke, W. (2000). Evaluation of Hot Spot Stresses in Complex Welded Structures // Ship Structural Design and Analysis: TU Hamburg-Harburg, 91 – 102.
8. Bård, W. T., Xiaozhi, W., Stig, B. (2007). Fatigue Assessment of Aluminum Ship Details by Hot-Spot Stress Approach // ABS TECHNICAL PAPERS, 255 – 271.
9. Maddox, S. J. (2003). Hot-Spot Stress Design Curves for Fatigue Assessment of Welded Structures // International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 12, No. 2, 143 – 151.
10. Poutiainen, I., Tanskanen, P., Marquis, G. (2004). Finite element methods for structural hot spot stress determination: a comparison of procedures // International journal of fatigue, Vol. 26, No. 11, 1147 – 1157.
11. Bulanov, L.V., Volegov, I.F., Gorlitsin, V.S., Himitch, T.G., Masaev, M.V. (2007). Design techniques of decrease of stress concentration in steel teeming

- stand of MNLZ // Week of metals in Moscow. Proceeding of conference and seminar materials (pp. 228 – 234). Moscow, USSR: Metallurgizdat.
12. Bannikov, D.O., Kazakevitch, M.I. (2003). Calculation of pyramidal-prismatic bunker by means of finite element method. Dnepropetrovsk: Nauka i obrazovanie, 150.
 13. Kachurenko, V.V., Bannikov, D.O. (2016). Constructive solutions of steel capacities for bulk materials. Dnepropetrovsk: Novaja ideologia, 168.
 14. Bannikov, D.O., Guslistaja, A.E. (2011). Estimation of convergence of stresses in complex structures by finite element method // Mine and metallurgical industry, Vol. 4, 93 – 96.
 15. Bannikov, D.O., Guslistaja, A.E. (2011). Adjustment of calculated results for stress analysis in FEM by method HSS // Visnik DNUZT, Vol. 38, 134 – 141.