



ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
METAL CONSTRUCTIONS

2018, ТОМ 24, НОМЕР 2, 73–80
УДК 624.954:620.193.2

(18)-0377-1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТАЛЬНОГО БУНКЕРА ЗДАНИЯ КОКСОСОРТИРОВКИ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

А. Н. Миронов¹, Ю. О. Насонов²

*ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.*

E-mail: ¹andreyexp@mail.ru, ²nasonov-yurii@mail.ru

Получена 17 апреля 2018; принята 25 мая 2018.

Анотация. В статье представлены результаты анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) стального бункера для хранения кокса. Расчет произведен по инженерной методике, а также в программном комплексе ЛИРА САПР 2013. Главной целью работы было определение НДС в элементах бункера с учетом эксплуатационных повреждений. Для этого была построена базовая пространственная модель стального бункера (модель в идеальном состоянии), а также модель, которая учитывает повреждения, полученные при эксплуатации. Полученные результаты позволили детально проанализировать распределения нормальных напряжений, а также спрогнозировать рост напряжений в зависимости от коррозионного износа конструкций в процессе эксплуатации. На основании полученных данных был выявлен остаточный ресурс объекта.

Ключевые слова: стальной бункер, бункерная балка, воронка бункера, эксплуатационные повреждения, коррозионный износ, напряжения, прочность, остаточный ресурс.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ СТАЛЕВОГО БУНКЕРА БУДІВЛІ КОКСОСОРТУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ КОРОЗІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ

А. М. Миронов¹, Ю. О. Насонов²

*ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.*

E-mail: ¹andreyexp@mail.ru, ²nasonov-yurii@mail.ru

Отримана 17 квітня 2018; прийнята 25 травня 2018.

Аннотація. У статті надано результати аналізу напружено-деформованого стану (НДС) сталевго бункера для зберігання коксу. Розрахунок проводився за інженерною методикою, а також у програмному комплексі ЛІРА САПР 2013. Головною метою роботи було визначення НДС в елементах бункера з урахуванням експлуатаційних пошкоджень. Для цього була побудована базова просторова модель сталевго бункера (модель в ідеальному стані), а також модель, яка ураховує пошкодження, отримані протягом експлуатації. Отримані результати дозволили детально проаналізувати розподіл нормальних напружень, а також спрогнозувати ріст напружень залежно від корозійного зносу конструкцій у процесі експлуатації. На підставі отриманих даних був визначений залишковий ресурс об'єкта.

Ключові слова: сталевий бункер, бункерна балка, воронка бункера, експлуатаційні пошкодження, корозійний знос, напруження, міцність, залишковий ресурс.

A DETERMINATION OF THE RESIDUAL LIFE OF STEEL BIN OF COKE-SCREENING STATION TAKING INTO ACCOUNT OPERATING CORROSIVE DAMAGES

Andrei Mironov¹, Yurii Nasonov²

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.*

E-mail: ¹andreyexp@mail.ru, ²nasonov-yurii@mail.ru

Received 17 April 2018; accepted 25 May 2018.

Abstract. The article presents the results of analysis of the tensely-deformed state of a steel bunker for storage of coke. The calculation is performed according to engineering procedure and using software complex LIRA-SAPR 2013. The main purpose of the work was to determine tensely-deformed state of bunker's elements considering operational damages. For this purpose, basic spational model of steel bunker was modeled (the model in the perfect shape), and model, which takes into account damages received during operation. The obtained results allowed us to analyze in detail the nature of the distribution of normal stresses, and to predict the increase of stresses depending on corrosive deterioration of constructions during operation. On the basis of the data obtained the residual life of object was identified.

Keywords: steel bunker, bunker beam, bunker hopper, operational damages, corrosive deterioration, stresses, strenght, residual life.

Цель публикации

В данной работе представлены теоретические расчеты, выполненные для определения изменения НДС в зависимости от коррозионной повреждаемости конструкций стального бункера.

Знание остаточного ресурса необходимо для рациональной и безопасной эксплуатации объекта, а также своевременного принятия мер по ремонту либо замене конструкций с целью предотвращения аварийных ситуаций либо нарушения технологического процесса.

Объект исследования

Стальной пирамидально-призматический бункер. Основные несущие конструкции бункера примыкают к железобетонным колоннам каркаса здания. По нижней грани бункера для крепления стальных конусов предусмотрены стальные двутавровые балки различного сечения. Стальные воронки выполнены с использованием листовой стали толщиной 10 мм. Пространственная жесткость и неизменяемость воронок обеспечена системой ребер жесткости. Схема объекта исследования приведена на рисунке 1.

Анализ проведенных исследований

Широкое распространение в конце XX века одного из современных численных методов строи-

тельной механики – метода конечных элементов (МКЭ) открыло новые возможности для исследователей работы емкостных сооружений.

Таким образом в работе [1] исследовалось действие температурных воздействий на бункерные сооружения.

Впервые был использован МКЭ для установления закономерностей пространственной работы стальных бункерных емкостей в работе [2] под действием сыпучей среды. Автором была разработана методика использования этого метода для конструкций такого типа, исследованы ее возможности, а также установлены определенные закономерности пространственной работы бункерных емкостей, указано на их основные конструктивные недостатки и приведены некоторые рекомендации по поводу возможности их устранения.

В трудах А. Х. Ягофарова [3, 4] достаточно четко прослеживается общая направленность на изучение работы конструкции как пространственной структуры и в связи с этим была обоснована идея учета в работе конструкции несущей способности хранимого сыпучего материала.

Анализ эксплуатационных повреждений конструкций бункера

В процессе эксплуатации конструкции бункера получили ряд повреждений, таких как:

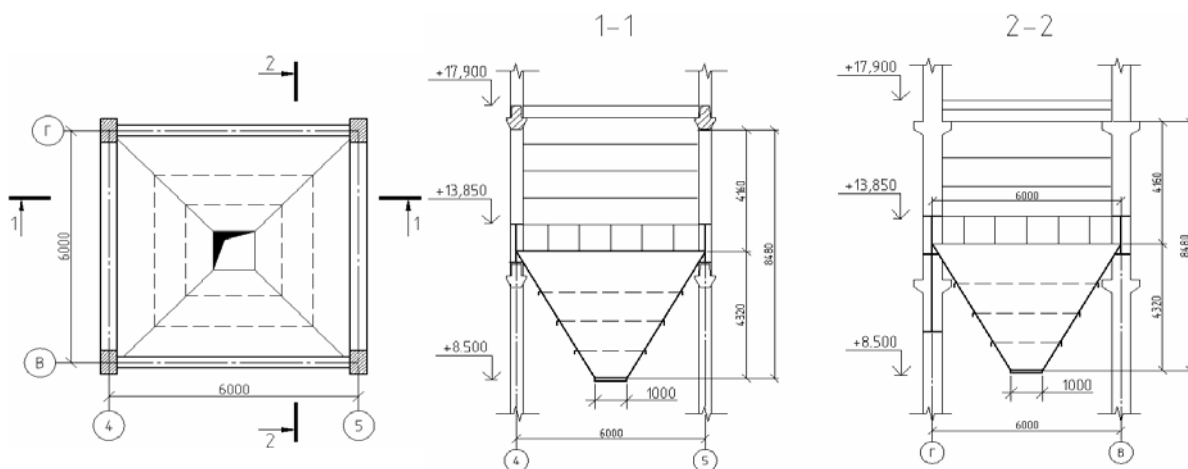


Рисунок 1. Схема бункера для хранения кокса.

- 1) полное разрушение ребер жесткости бункерных балок во внутренней части бункера;
- 2) сквозное коррозионное повреждение стенки бункерной балки;
- 3) коррозионный износ стенки бункерной балки до 90 % от проектного значения в области сквозного повреждения;
- 4) коррозионный износ полки бункерной балки с потерей поперечного сечения от 50 до 100 % от проектного значения;
- 5) коррозионный износ стенок бункера от 23 до 36 % от проектного значения;
- 6) коррозионный износ стенки бункерных балок до 20 % от проектного значения;
- 7) коррозионный износ ребер жесткости воронки до 15 % от проектного значения.

Расчет конструкций бункера по отечественным нормам проектирования

Расчет конструкций бункера осуществляется по методике разработанной Ленинградским Промстройпроектом Госстроя СССР [5].

Воронка была рассчитана на нагрузку от хранимого сыпучего, а также постоянную нагрузку в виде защитного футеровочного слоя. Напряжения в воронке бункера составили:

$$\sigma = \frac{S}{t} + \frac{6M}{t^2} \leq 0,8R_y,$$

где t – толщина воронки;

S – горизонтальный распор в воронке;

M – изгибающий момент на 1 см ширины воронки бункера.

$$\sigma = \frac{7,01}{1} + \frac{6 \cdot 0,122}{1^2} = 7,7 \text{ кН/см}^2 = 77 \text{ МПа} \leq 0,8 \cdot 240 = 192 \text{ МПа}.$$

Балки бункера были рассчитаны на вертикальные нагрузки от массы воронки с засыпкой и горизонтального распора засыпки. Результаты, полученные при расчете балок бункера, сведены в таблицу 1.

Расчет конструкций бункера на ЭВМ

Реализация метода конечных элементов (МКЭ) в программно-вычислительных комплексах позволяет достаточно точно описать распределение напряжений в конструкциях при совместной работе. В данной работе проводился конечно-элементный анализ пространственной модели стального бункера с использованием ПК ЛИРА САПР 2013.

Сетка конечных элементов была наложена таким образом, чтобы погрешность полученных результатов не превосходила 5 %. Таким образом характерный размер сетки был принят равным 0,25 × 0,25 м. Конструкция бункера модели-

Таблица 1. Результаты расчета бункерной балки

Элемент конструкции	Нормальные напряжения σ , МПа
Верхний пояс балки	89,5
Нижний пояс балки	70,5
Стенка балки	35,6

ровалась конечными элементами (41 – прямоугольный КЭ оболочки, 42 – треугольный КЭ оболочки, 44 – четырёхугольный КЭ) в виде оболочек прямоугольной и треугольной конфигурации для плоского напряженного состояния (рис. 2). Сопряжение всех элементов между собой – жесткое. На левом и правом концах балок, в узлах стенки балки запрещались линейные перемещения вдоль общей системы координат по направлениям X, Y, Z, которые моделируют шарнирно неподвижную опору.

Сходимость результатов по двум методикам не превысила 1,5 %, что говорит об адекватности полученных результатов.

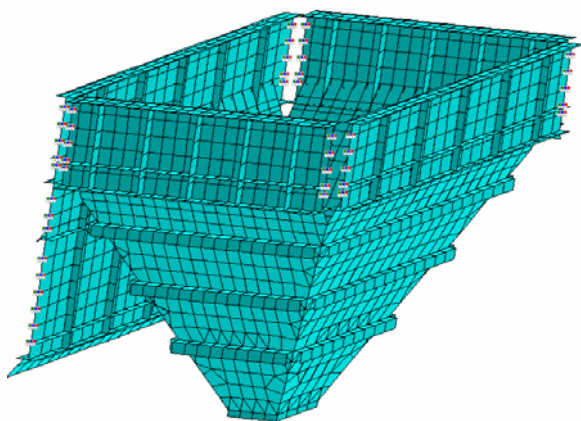


Рисунок 2. Базовая расчетная модель бункера. Количество узлов в расчетной модели – 3 545, количество элементов – 3 750.

Моделирование повреждений конструкций бункера

С целью определения текущих напряжений в конструкциях выполнялось моделирование эксплуатационных повреждений в информационной модели, а именно:

- 1) ребра жесткости балок бункера во внутренней части бункера были удалены из схемы ввиду их полного разрушения;
- 2) в местах сквозных повреждений балок бункера моделировались пустоты, повторяющие геометрию реальных повреждений;
- 3) на основании карты повреждений конструкций всем пластинам модели задавались новые значения толщин, в зависимости от коррозионного износа конструкций.

После моделирования повреждений новый вид информационной модели был повторно посчитан и проанализирован (рис. 3).

Сравнение напряжений базовой модели и модели учитывающей повреждения

Результаты расчетов двух типов модели были сведены в таблицу 2.

Полученные напряжения не превысили критического показателя, который для приведенных напряжений составляет $1,15 \cdot R_y = 1,15 \cdot 240 = 275$ МПа.

Для определения остаточного ресурса необходимо определить, при какой толщине воронки бункера будет достигнута отметка критических напряжений. Уменьшив существующие

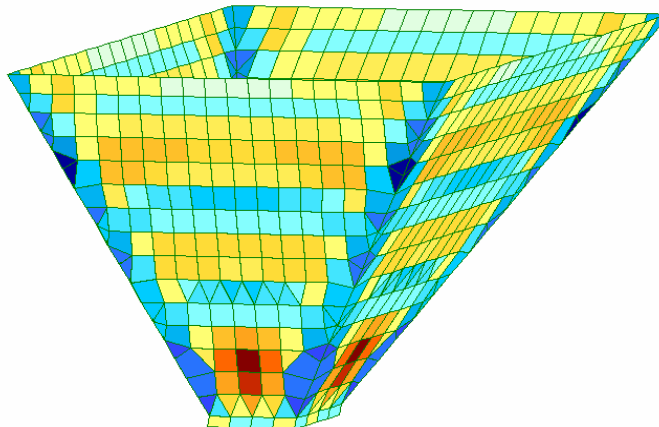
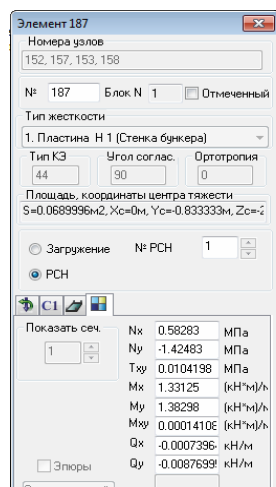


Рисунок 3. Результаты напряжений в наиболее нагруженной (нижней) части воронки.

толщины модели еще на 1,5 мм, были получены результаты, которые сведены в таблицу 3.

На основании полученных данных было установлено, что при потере 1,5 мм толщины стенки бункера критическая отметка приведенных напряжений будет достигнута и превышена.

Определение скорости распространения коррозии

Воронка бункера эксплуатируется с 2005 г. В 2017 г. было произведено техническое обследование с применением ультразвуковой толщинометрии. Данные о промежуточных обследованиях отсутствуют. Исходя из этих данных опреде-

ление скорости развития коррозии получим из графика, изображенного на рис. 4.

Скорость развития коррозии составила 0,3 мм/год.

Выводы

1. Скорость развития коррозии составила 0,3 мм/год.
2. Отметка критических приведенных напряжений воронки бункера (275 МПа) будет достигнута при потере 1,05 мм толщины (рис. 5).
3. Результаты расчета показали, что бункерная балка имеет двукратный запас прочности, однако повреждения, полученные балкой при

Таблица 2. Сравнение напряжений базовой модели и поврежденной модели воронки

Исследуемая конструкция	σ_x , МПа (кольцевые)		σ_y , МПа (меридианальные)		σ_{IV} , МПа (приведенные)	
	Базовая модель	Поврежденная модель	Базовая модель	Поврежденная модель	Базовая модель	Поврежденная модель
Стенка воронки в осях В–Г	83,2	175	78,2	153	80,8	165
Стенка воронки в осях 4–5	83,2	205	78,2	175	80,8	191
Стенка воронки в осях Г–В	83,2	148	78,2	130	80,8	140
Стенка воронки в осях 5–4	83,2	145	78,2	130	80,8	138

Таблица 3. Сравнение напряжений модели текущего состояния воронки и модели с уменьшением толщины на 1,5 мм

Исследуемая конструкция	σ_x , МПа (кольцевые)		σ_y , МПа (меридианальные)		σ_{IV} , МПа (приведенные)	
	Текущее состояние	Уменьшение толщины на 1,5 мм	Текущее состояние	Уменьшение толщины на 1,5 мм	Текущее состояние	Уменьшение толщины на 1,5 мм
Стенка воронки в осях В–Г	175	286	153	237	165	264
Стенка воронки в осях 4–5	205	351	175	286	191	323
Стенка воронки в осях Г–В	148	232	130	195	140	276
Стенка воронки в осях 5–4	145	225	130	192	138	210

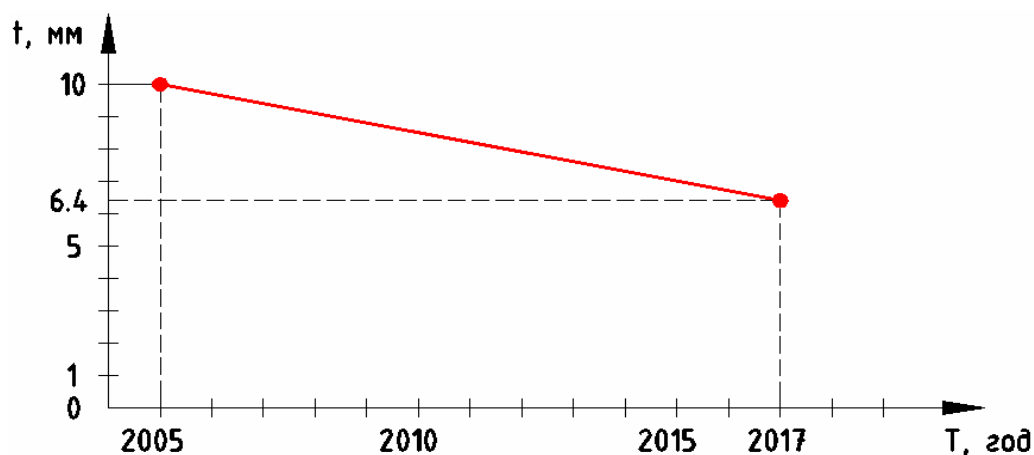


Рисунок 4. График изменения толщины стенки воронки вследствие коррозионного износа.

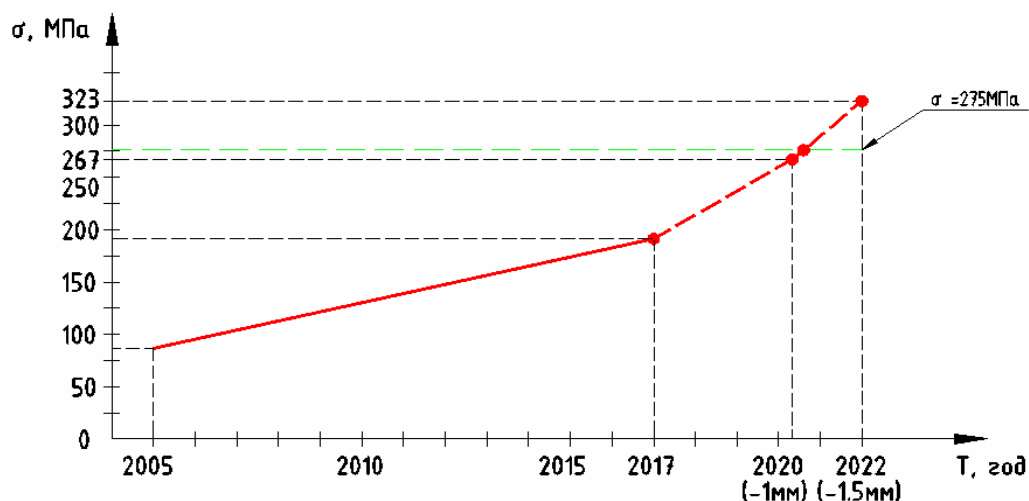


Рисунок 5. Прогнозирование напряжений в зависимости от потери толщины стенки воронки.

эксплуатации, могут привести к непрогнозируемым деформациям. Для обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации объекта рекомендуется принять меры по устранению текущих повреждений

4. Остаточный ресурс бункера (на момент 2017 года) составляет 3 года.

5. Эксплуатация объекта допускается до 2019 года включительно при условии выполнения рекомендаций по устранению и ремонту текущих повреждений.
6. В целях предотвращения аварийной ситуации рекомендуется выполнить замену бункерных конструкций к 2020 году.

Литература

1. Finite element model for calculating temperature stresses in the walls of / Q. E. A. Zhang, V. M. Purie, H. B. Manback, M. Cs. Uwoung // American Society of Agricultural Engineering, 1987. Vol. 30. № 6. P. 1797–1806.

References

1. Zhang, Q. E.; Purie, V. M.; Manback, H. B.; Uwoung, M. Cs. Finite element model for calculating temperature stresses in the walls of the hopper. In: *American Society of Agricultural Engineering*, 1987, Vol. 30, № 6, pp. 1797–1806.

2. Банников, Д. О. Исследование прочности пирамидально-призматических бункеров : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Д. О. Банников ; Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта. – Днепропетровск, 2000. – 140 с.
3. Ягофаров, А. Х. Совершенствование конструкции, уточнение расчета и оптимальные параметры стального круглого бункера : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.23.01 / А. Х. Ягофаров. – Екатеринбург, 2005. – 23 с.
4. Пат. 2219320 Российская Федерация, МПК⁷ E 04 H 7/30. Стальной круглый бункер для сыпучих и кусковых материалов / Ягофаров А. Х. ; заявитель и патентообладатель Уральск. госуд. ун-т путей сообщ. – № 2001135991/03; заявл. 28.12.01; опубл. 20.12.03, Бюл. № 35.
5. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М. : Стройиздат, 1983. – 200 с.
6. Лессиг, Е. И. Листовые металлические конструкции / Е. И. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М. : Стройиздат, 1970. – 488 с.
7. Wichtowski, B. Service life of steel coke binnon-destructive testing (NDT) / B. Wichtowski, W. Nazarko // Proc. of 6* Int. Conf. «Modern Building Materials, Structures and Techniques». – Vilnius, 1999. – P. 155–159.
8. Basis of design and actions on structures. Part 4: Actions in silos and tanks: prEN 1991-4. Eurocode 1. – CEN, 2002.
9. Справочник проектировщика. Металлические конструкции : в 3 т. Т. 2 : Стальные конструкции зданий и сооружений / под ред. В. В. Кузнецова. – М. : Изд-во АСВ, 1998. – 526 с
10. Structural Engineering Handbook / Edited by Edwin H. Gaylord, Jr., Charles N. Gaylord, James E. Stallmeyer. – [4ed]. – McGraw-Hill, 1997. – 624 p.
11. Execution of steel structures. Part 7: Tanks, silos and pipelines: prEN 1090-7. – CEN, 1998.
12. Расчёт стальных конструкций : справочное пособие / Я. М. Лихтарников, Д. В. Ладыженский, В. М. Клыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Будівельник, 1984. – 368 с.
13. Металлические конструкции. Общий курс : учебник для вузов / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Ведеников и др. ; под общ. ред. Е. И. Беленя. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1986. – 560 с.
14. ДБН В 1.2-14-2009. СНББ. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ / УКРНДІПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦІЯ ім. В. М. Шимановського. – Чинний з 01.10.2009. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с.
15. ДБН В.2.6-163:2010 Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу / УКРНДІПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦІЯ ім. В. М. Шимановського. – Чинні з 01.12.2011. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011.
2. Bannikov, D. O. A study of pyramidal-prismatic bins strength: Ph.D. thesis in Engineering Science: 05.23.01. Dnepropetrovsk State Technical University of Railway Transport. Dnepropetrovsk, 2000. 140 p.
3. Yagofarov, A. H. Improving the design, specification and calculation of optimal parameters of steel round hopper: abstract of Ph.D. thesis in Engineering Science: 05.23.01. Yekaterinburg, 2005. 23 p.
4. Patent 2219320 Russian Federation, IPC7 E 04 N7/30. Steel round bunker for bulk and lump materials. Yagofarov A. H.; applicant and patent holder Ural State University of Railway Transport. № 2001135991/03; declared 28.12.01; published 20.12.03, Bull. № 35.
5. Guideline for the calculation and design of reinforced concrete, steel and combined bunkers. Lenpromstroyproekt. Moscow: Stroyizdat, 1983. 200 p.
6. Lessig, E. I.; Lileev, A. F.; Sokolov, A. G. Sheet steel structures. Moscow: Stroyizdat, 1970. 488 p.
7. Wichtowski, B.; Nazarko, W. Service life of steel coke binnon-destructive testing (NDT) In: *Proc. of 6th Int. Conf. «Modern Building Materials, Structures and Techniques»*. Vilnius, 1999, pp. 155–159.
8. Basis of design and actions on structures. Part 4: Actions in silos and tanks: prEN 1991-4. Eurocode 1. CEN, 2002.
9. Design engineer reference book. Steel structures: in three volumes. The second volume: Steel constructions of buildings and structures. Ed. by V. V. Kuznetsov. Moscow: ASV, 1998. 526 p.
10. Structural Engineering Handbook. Edited by Edwin H. Gaylord, Jr., Charles N. Gaylord, James E. Stallmeyer. [4ed]. McGraw-Hill, 1997. 624 p.
11. Execution of steel structures. Part 7: Tanks, silos and pipelines: prEN 1090-7. CEN, 1998.
12. Likhtarnikov, J. M.; Ladyzhenskaya, D. V.; Klykov, V. M. Calculation of steel structures: a Handbook. The 2nd ed. Kiyiv: Budivelnik, 1984. 368 p.
13. Belinia, E. I.; Baldin, V. A.; Vedernikov, G. S. and others. Steel construction. General course: textbook for Universities. Under the General editorship of E. I. Belinia. The 6th ed. Moscow: Stroyizdat, 1986. 560 p.
14. DBN V 1.2-14-2009. SNBB. General principles of reliability and constructive safety of buildings, constructions, building structures and foundations. Kiyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009. 37 p.
15. DBN 2.6-163:2010 Steel structures. Design, manufacturing and installation standards. Kiyiv: Ministry Of Regional Development Of Ukraine, 2011.

Миронов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: усталостная прочность металлических конструкций, концентрация напряжений в узлах ферм с применением широкополочных двутавров и гнutosварных замкнутых профилей, напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных конструкций, в том числе трубобетонных конструкций.

Насонов Юрий Олегович – магистрант кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: стальные бункеры, остаточный ресурс конструкций.

Миронов Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій та споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: втомлена міцність металевих конструкцій, концентрація напружень в вузлах ферм із застосуванням широко полчкових двотаврів та гнуто-зварних замкнених профілів, напружено-деформований стан сталезалізобетонних конструкцій, у тому числі трубобетонних конструкцій.

Насонов Юрій Олегович – магістрант кафедри металевих конструкцій та споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: сталеві бункери, залишковий ресурс конструкцій.

Mironov Andrei – Ph.D. (Engineering), Associate Professor; Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: fatigue strength of metal structures, concentration of stresses in the nodes of trusses with the use of wide-frangles I-beams and roll-welded closed profiles, stress-strain state of composite structures including pipe-concrete structures.

Nasonov Yurii – Master's degree student, Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: steel bunkers, residual life of constructions.