



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

2011, ТОМ 17, НОМЕР 3, 167–175

УДК 624.072.002.2

(11)-0242-1

## **МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИКОНАНОГО ОБСТЕЖЕННЯ**

**О. І. Голоднов, А. П. Іванов, В. В. Псюк**

*Донбаський державний технічний університет,  
пр. Леніна, 16, м. Алчевськ, Луганська область, Україна, 94204.  
E-mail: golodnow@ukr.net*

*Отримана 6 червня 2011; прийнята 24 червня 2011.*

**Анотація.** Викладена доцільність використання комплексного методу оцінки напружено-деформованого стану експлуатованих сталевих конструкцій із застосуванням методів математичного моделювання. Метод пройшов широку апробацію при вирішенні питань, пов'язаних із визначенням технічного стану конструкцій сталевих бункерів і продовженням терміну їхньої експлуатації. Показана можливість використання методу для оцінки напружено-деформованого стану і розробки проекту підсилення конструкцій.

**Ключові слова:** сталеві конструкції, обстеження, напружено-деформований стан, моделювання.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВЫПОЛНЕННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ**

**А. И. Голоднов, А. П. Иванов, В. В. Псюк**

*Донбасский государственный технический университет,  
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, Луганская область, Украина, 94204.  
E-mail: golodnow@ukr.net*

*Получена 6 июня 2011; принята 24 июня 2011.*

**Аннотация.** Изложена целесообразность использования комплексного метода оценки напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых стальных конструкций с применением методов математического моделирования. Метод прошел широкую апробацию при решении вопросов, связанных с определением технического состояния конструкций стальных бункеров и продлением срока их эксплуатации. Показана возможность использования метода для оценки напряженно-деформированного состояния и разработки проекта усиления конструкций.

**Ключевые слова:** стальные конструкции, обследование, напряженно-деформированное состояние, моделирование.

## SIMULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF STEEL STRUCTURES DUE TO THE RESULTS OF THE SURVEY

**Golodnov Oleksandr, Ivanov Anatoliy, Psyuk Victor**

*Donbas State Technical University,*

*16, Boulevard of Lenin, Alchevsk, Lugansk Region, Ukraine, 94204.*

*E-mail: golodnow@ukr.net*

*Received 6 June 2011; accepted 24 June 2011.*

**Abstract.** The feasibility of using an integrated method for estimating the stress-strain state of operated steel structures using methods of mathematical modeling is given. The method has been widely tested in matters relating to the technical condition of construction steel bins and extending their operation. The possibility of using the method for evaluating stress-strain state and the project of strengthening of structures is proved.

**Keywords:** steel structures, inspection, deformation, modeling.

### **Введение. Постановка проблемы**

Наряду с новым строительством все чаще возникает необходимость в проведении работ по восстановлению эксплуатационной пригодности строительных конструкций зданий и сооружений. При этом необходимо решать вопросы, связанные с определением их напряженно-деформированного состояния (НДС) и выполнением работ по продлению срока эксплуатации.

Указанные работы необходимо решать в комплексе, т. е. прогнозу возможного продления срока эксплуатации должны предшествовать работы по оценке технического состояния. Эти работы выполняются в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [1, 2, 3 и др.].

Оценка технического состояния выполняется на основании результатов визуального и инструментального обследования, поверочных расчетов и т. п. Поверочные расчеты выполняются, как правило, с применением упрощенных расчетных схем без учета фактического состояния конструкций и прогноза деградации свойств материалов. Такой подход не позволяет моделировать изменение НДС сооружений в динамике развития процессов деградации и не дает возможности принять правильное решение о составе мероприятий, обеспечивающих последующую надежную эксплуатацию.

Работа является одним из этапов исследований, выполняющихся в ДонГТУ по пробле-

ме продления срока эксплуатации стальных конструкций. Данная тематика отвечает основным направлениям исследований в области оценки технического состояния строительных конструкций в соответствии с Постановлением Кабинета Министров Украины № 409 от 5 мая 1997 г. «Об обеспечении надежности и безопасной эксплуатации зданий, сооружений и инженерных сетей».

**Цель работы** – усовершенствование методов оценки технического состояния стальных конструкций на основе результатов обследования и математического моделирования напряженно-деформированного состояния с применением современных ВК типа ЛИРА, SCAD и т. п.

### **Основная часть**

Для определения технического состояния и принятия решения о возможности продления срока эксплуатации конструкций выполняется их обследование.

Основной задачей оценки технического состояния конструкций является определение возможности их дальнейшей эксплуатации при реализованных режимах и условиях. Оценка производится путем определения технического состояния элементов, конструкций и сооружения в целом на основе анализа технической документации за период проектирования, строительства и эксплуатации, а также результатов технических освидетельствований и выполнения

поверочных расчетов (если это вызвано необходимостью).

Оценка технического состояния конструкции (сооружения) осуществляется в такой последовательности [1–5 и др.]:

- анализ технической документации;
- визуальное обследование состояния конструкций;
- инструментальное обследование состояния конструкций;
- анализ результатов визуального и инструментального обследования;
- выполнение поверочных расчетов (при необходимости);
- оценка технического состояния;
- выводы о возможности дальнейшей эксплуатации и рекомендации по приведению конструкций в пригодное для эксплуатации состояние.

Для оценки технического состояния конструкций используются:

- критерий соответствия конструкции (сооружения) рабочей документации (размеры, принятые профили, конструктивные особенности);
- критерий соответствия конструкции (сооружения) определяющим параметрам технического состояния (наличие или отсутствие недопустимых дефектов, соответствие примененных материалов требованиям проекта и т. п.) и удовлетворения требованиям расчета по предельным состояниям I и II групп.

При отсутствии или незначительных дефектах, обнаруженных при визуальном обследовании, а также соответствии конструкции (построенного сооружения) технической документации может быть сделана окончательная оценка технического состояния.

По результатам визуального обследования при обнаружении существенных дефектов, влияющих на несущую способность и долговечность конструкций, выполняется инструментальное обследование.

При инструментальном обследовании уточняют:

- физико-механические характеристики материалов;
- в поврежденных конструкциях – геометрические размеры элементов, состояние узлов сопряжения элементов;
- прогибы и перемещения;

- трещины в основном металле и сварных швах;
- коррозию металла, степень абразивного износа и т. п.

По результатам анализа технической документации, визуального и инструментального обследований технического состояния конструкций принимается решение о необходимости выполнения поверочного расчета.

Критериями для принятия решения о необходимости выполнения поверочных расчетов конструкций и сооружений в целом являются:

- дефекты, влияющие на снижение несущей способности конструкций;
- снижение прочностных характеристик материалов в сравнении с проектными (устанавливаются путем проведения обследования конструкций методами разрушающего и неразрушающего контроля);
- уменьшение площади рабочего сечения элемента;
- превышение параметрами фактических эксплуатационных нагрузок их проектных значений;
- технологические воздействия, не предусмотренные проектом;
- развитие неравномерных деформаций основания.

В ходе выполнения поверочных расчетов предусматривается:

- математическое моделирование конструкций МКЭ с учетом установленного деформированного состояния;
- расчет конструкций и определение усилий и деформаций в элементах расчетной схемы;
- сравнение характера деформирования реального объекта и математической модели и уточнение, в случае необходимости, жесткостных характеристик материалов элементов модели;
- расчет уточненной модели, определение усилий и перемещений;
- проверка соблюдения условий, обеспечивающих несущую способность и деформативность строительных конструкций зданий и сооружений, оценка их технического состояния;
- корректировка расчетной схемы сооружения с учетом установки элементов усиления и расчет новой модели;
- проектирование усиления.

Оценка технического состояния конструкции (сооружения) производится сопоставлением контролируемых параметров, определенных в ходе проведения визуального и инструментального обследований, с соответствующими проектными параметрами, а также по результатам поверочных расчетов.

По результатам оценки готовится заключение о техническом состоянии строительных конструкций и сооружения в целом и делается вывод о возможности дальнейшей эксплуатации либо о необходимости выполнения работ по приведению конструкции в состояние, обеспечивающее эксплуатационную пригодность на время продления срока эксплуатации.

В качестве примера рассмотрим порядок выполнения работ по оценке технического состояния на примере бункера СБ–2 РОФ–1 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Такие бункера предназначены для хранения несвязных (не имеющих сцепления, не слеживающихся) сыпучих материалов (щебень, галька и другие материалы с крупностью зерен более 2 мм, а также песка с крупностью зерен до 2 мм и влажностью до 2 %).

Для бункеров типа СБ–2 принята негидравлическая форма выпуска материала, при которой движется только центральная часть над выпускным отверстием, а остальной материал неподвижен.

Разгрузка бункера проводится самотеком на транспортер с дальнейшей транспортировкой к шаровым мельницам, расположенным в мельничном пролете.

Для защиты конструкций бункера от абразивного износа первоначально была применена футеровка из стальных элементов.

Для численного определения НДС, возникающего в строительных конструкциях бункера во время эксплуатации, были выбраны программные средства, разработаны методика расчета и компьютерная модель. Расчет бункера выполнен с использованием программного комплекса «LIRA–WINDOWS», в основу которого положен метод конечных элементов (МКЭ) в перемещениях. Конечно-элементная модель (КЭМ) разработана в линейной постановке. Стальные элементы смоделированы плоскими оболочковыми КЭ типа 41 «четырехугольный элемент оболочки» соответству-

ющей толщины (по проекту 15 мм, но расчеты выполнялись и для других толщин – 12, 10, 8 и 6 мм). Уменьшение толщины обшивок было вызвано абразивным износом металла футеровок и стенок бункера. Нагрузки на элементы бункера определялись по известным методикам (см., например, [6]). Общий вид КЭМ бункера приведен на рис. 1.

В задачи расчета входило определение НДС конструкций при различных толщинах стальных элементов. На рис. 2 приведены результаты определения перемещений узлов оболочки бункера в направлении оси Y при проектной толщине обшивки 15 мм, а на рис. 3 – при уменьшенной толщине 6 мм (по результатам обследования вследствие абразивного износа толщина обшивки местами доходила до 6 мм). Как видно из этих рис., при толщине обшивки  $t = 15$  мм максимальные перемещения узлов КЭМ составили 60,73 мм, а при толщине обшивки  $t = 8$  мм – 561,3 мм.

В соответствии с п. 1.3 действующего ДСТУ Б В.1.2–3:2006 [3], прогибы и перемещения строительных конструкций, отличающихся от традиционных, следует определять по специальным техническим условиям и нормам, которые дополняют и уточняют положения ДСТУ Б В.1.2–3:2006 [3].

В соответствии с требованиями относительно конструирования элементов стальных бункеров (стр. 348–355 [6]), прогиб листа обшивки бункера не может быть большим, чем  $1/50$  пролета пластины (в нашем случае это 48 мм, поскольку меньший пролет пластины составляет 2 420 мм).

Таким образом, по результатам расчетов установлено, что прогиб обшивки бункера даже при проектной толщине превышает предельную величину.

Повышенную деформативность обшивки бункера можно объяснить недостаточным количеством вертикальных и горизонтальных ребер. Следует отметить, что перемещения реальных обшивок бункера за время эксплуатации были столь значительными, что бункер приобрел бочкообразную форму. Это обстоятельство позволило оценить техническое состояние бункера как непригодное к эксплуатации. Дальнейшая надежная и безопасная эксплуатация возможна при условиях установки (привар-

ки) дополнительных ребер, которые уменьшили бы расчетные пролеты пластин и ужесточили бы конструкцию бункера в целом. Расстояние между дополнительными ребрами необходимо установить по результатам расчетов при минимальном значении толщины пластины 6 мм, установленной по результатам обследования.

Следует также отметить, что на рисунках с изополями перемещений приведены проекции перемещений обшивки на глобальную ось OY.

Для нахождения фактического максимального перемещения стенки следует учесть угол наклона стенки. На рис. 4 приведен график зависимости максимального прогиба от толщины обшивки с учетом угла наклона.

Изополю напряжений  $N_1$ , которые возникают в конструкциях бункера при минимальной толщине обшивки  $t = 6$  мм, приведены на рис. 5.

На основании полученных результатов расчета установлено наиболее неблагоприятное

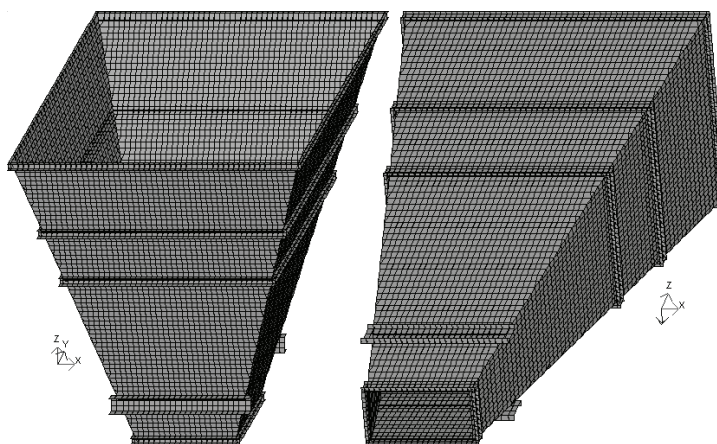


Рисунок 1. Общий вид КЭМ бункера.

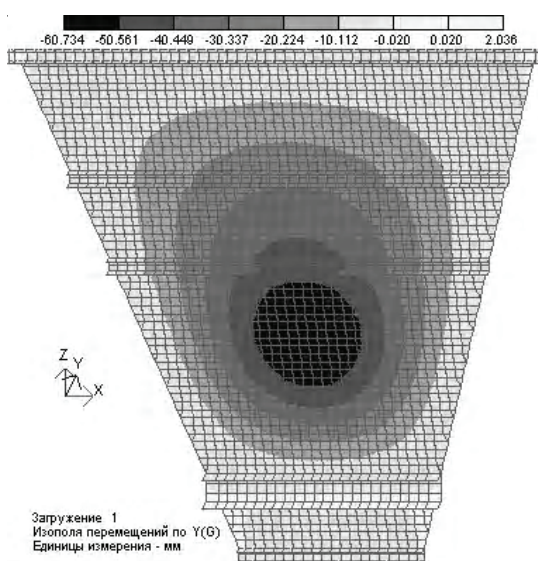


Рисунок 2. Перемещения узлов КЭМ в направлении оси Y ( $t = 15$  мм).

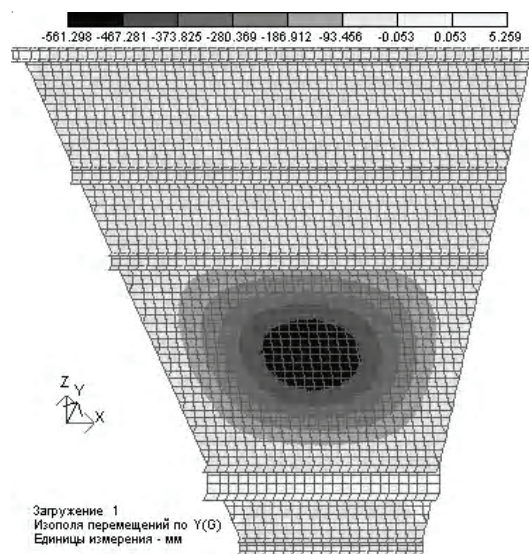


Рисунок 3. Перемещения узлов КЭМ в направлении оси Y ( $t = 6$  мм).

НДС элементов в обшивке. Максимальные растягивающие напряжения в срединной плоскости при толщине обшивки 6 мм составляют  $91\,354,3\text{ т/м}^2$  (913,5 МПа) и превышают расчетное сопротивление стали (245 МПа) почти в 3,5 раза. Они возникают в угловых зонах обшивки в местах примыкания к центральному горизонтальному ребру (рис. 5).

На рис. 6 приведен вид боковых стенок бункера после усиления. Некоторые результаты расчетов конструкций после усиления приведены на рис. 7, 8.

Как видно из рис. 7, прогибы в оболочке бункера составляют 4,24 мм и не превышают предельную величину, равную 12 мм для пролета 600 мм. Наибольшие напряжения в обшивке (рис. 8) со-

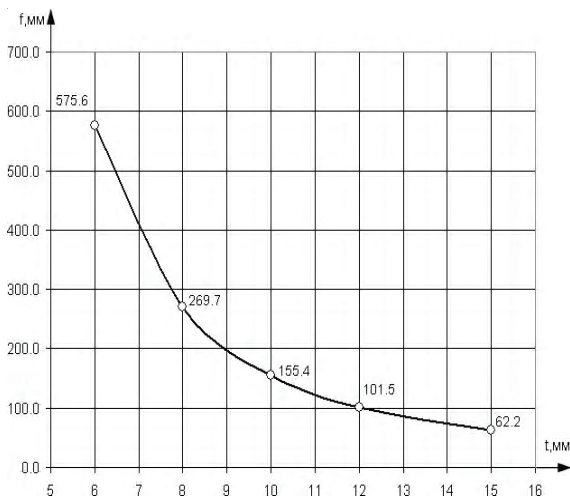


Рисунок 4. График зависимости прогиба обшивки от толщины.

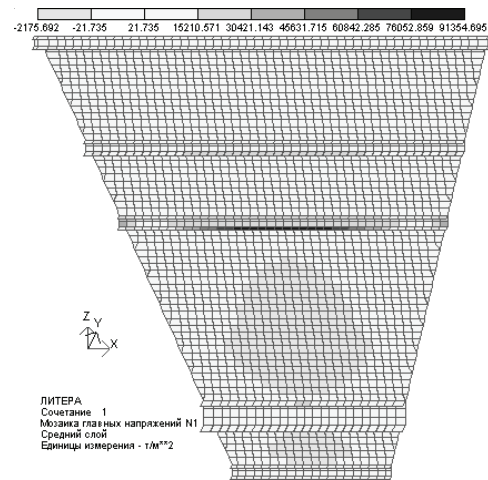


Рисунок 5. Изополю напряжений  $N_1$  при толщине обшивки бункера 6 мм.

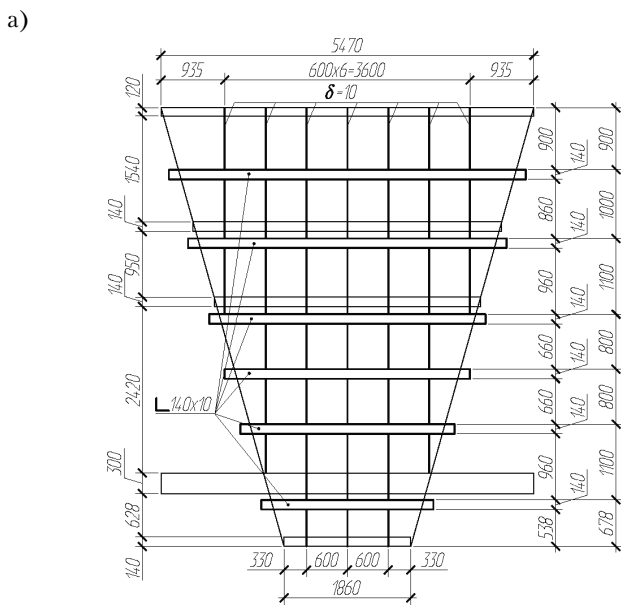


Рисунок 6. Схема расположения усиливающих ребер на большей (а) и меньшей (б) гранях.

ставляют 92,958 МПа и не превышают расчетного сопротивления стали (245 МПа). Не стоит забывать, что напряжения были определены для срединной плоскости обшивок бункера.

Таким образом, дальнейшая безопасная эксплуатация конструкций бункера возможна при условии усиления путем установки дополнительных вертикальных и горизонтальных ребер.

Учитывая наличие существенного выгиба из плоскости, можно предположить, что в реальных элементах обшивки возникает весьма сложное НДС, определение которого в настоящее время известными методами строительной механики затруднительно. Все вышесказанное позволяет сделать вывод о необходимости продолжения исследований в этом направлении. Кроме этого, приварка вертикальных и горизонтальных ребер будет способствовать появлению весьма сложного остаточного напряженного состояния, которое также будет влиять на работу конструкций.

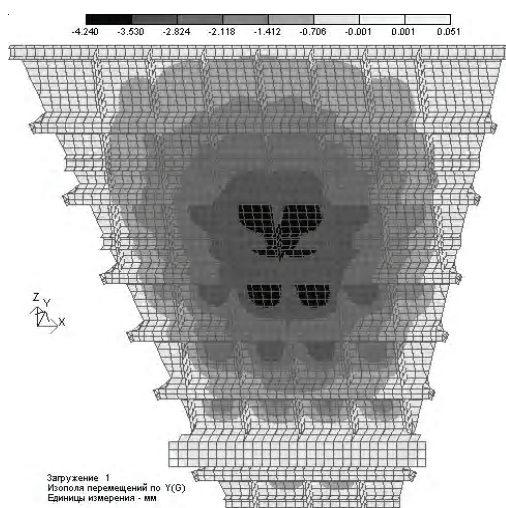
**Выводы**

На основании анализа технической документации, результатов обследования и выполненных расчетов сделаны выводы.

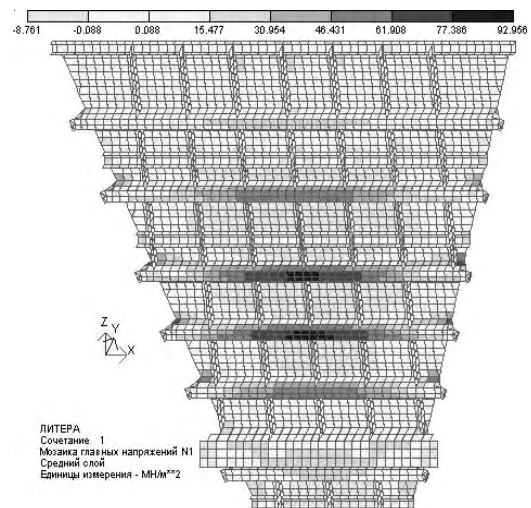
1. Предложена методика оценки НДС и его моделирования с применением МКЭ. Методика позволяет на основе полученных в ходе прове-

дения обследований данных провести моделирование НДС сооружения МКЭ и выполнить прогнозные расчеты с учетом возможной деградации и износа материала. Выполнение расчетов с использованием предложенной методики позволяет осуществить комплекс мероприятий для последующей безопасной эксплуатации после продления срока эксплуатации.

2. Причинами появления повреждений в конструкциях бункера являются длительный срок эксплуатации в условиях абразивного износа и неудачная конструкция (отсутствуют вертикальные и горизонтальные ребра, которые способствовали бы ужесточению конструкции в целом, уменьшению пролетов обшивок и, соответственно, уменьшению усилий и деформаций).
3. Для определения НДС конструкций бункера разработана компьютерная модель. Это позволило с использованием современных средств моделирования конструкций получить напряжения и деформации в элементах, которые с помощью ручных средств расчета получить невозможно.
4. По результатам выполненных расчетов предложена схема усиления конструкций. Данную конструкцию бункера необходимо усилить путем установки горизонтальных и вертикальных ребер.



**Рисунок 7.** Перемещения узлов КЭМ в направлении оси Y после установки дополнительных ребер при t = 6 мм.



**Рисунок 8.** Изополя напряжений N<sub>1</sub> после установки дополнительных ребер при t = 6 мм.

**Литература**

1. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації : ДБН 362-92. – Введ. 1992-07-01. – К. : Укрархбудінформ, 1995. – 46 с.
2. Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд. – К. : Держбуд України, 1999. – 152 с.
3. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування : ДСТУ Б В.1.2–3:2006. – Введено вперше (із скасуванням в Україні розділу 10 СНиП 2.01.07–85); введ. 2007–01–01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 10 с.
4. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин : Зб. наукових статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. / Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України ; Наук. керівник – академік Б. Є. Патон. – К. : ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – 589 с.
5. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин : Зб. наукових статей за результатами, отриманими в 2007–2009 рр. / Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України ; Наук. керівник – акад. Б. Є. Патон. – К. : ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. – 709 с.
6. Справочник проектировщика инженерных сооружений / А. П. Величкин, В. Ш. Козлов, И. Г. Харитонов [и др.] ; Под ред. А. П. Величина. – К. : Будівельник, 1973. – 552 с.

**References**

1. Building Norms and regulations. Evaluation of the technical state of steel structures of industrial buildings and facilities in operation: DBN 362–92. Kyiv: Ukrarhbuildinform, 1995. 46 p. (in Ukrainian).
2. Normative acts of research, giving passport, safe and reliable operation of industrial buildings and structures. Kyiv: Derzhbud of Ukraine, 1999. 152 p. (in Ukrainian).
3. System of providing safety and reliability of construction objects. Runs and movements. Design requirements: DSTU B B.1.2–3:2006. Kyiv: Minbud of Ukraine, 2006. 10 p. (in Ukrainian).
4. Resource and safety of operation of structures, buildings and machines: Scientific articles due to the results of 2004–2006. Supervisor – academician B. Ye. Paton. Kyiv: IYeZ im. Ye. O. Patona NAN of Ukraine, 2006. 589 p. (in Ukrainian).
5. Resource and safety of operation of structures, buildings and machines: Scientific articles due to the results of 2007–2009. Supervisor – academician B. Ye. Paton. Kyiv: IYeZ im. Ye. O. Patona NAN of Ukraine, 2009. 709 p. (in Ukrainian).
6. Velichkin, A. P.; Kozlov, V. Sh.; Haritonov, I. G. et al.; Ed. A. P. Velichkin. Enquiry of a designer of engineering structures. Kyiv: Budivelnik, 1973. 552 p. (in Russian).

**Голоднов Олександр Іванович** – доктор технічних наук, професор кафедри будівельних конструкцій Донбаського державного технічного університету, дійсний член Академії будівництва України. Наукові інтереси: нелінійна будівельна механіка стрижнів і пластин, залишкові напруження та їхній вплив на стійкість сталевих конструкцій, надійність будівельних конструкцій при силових, деформаційних і високотемпературних впливах.

**Іванов Анатолій Порфирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Донбаського державного технічного університету. Наукові інтереси: надійність будівельних конструкцій при силових, деформаційних і високотемпературних впливах.

**Псюк Віктор Васильович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Донбаського державного технічного університету. Наукові інтереси: надійність будівельних конструкцій при силових, деформаційних і високотемпературних впливах.



**Голоднов Александр Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций Донбасского государственного технического университета, действительный член Академии строительства Украины. Научные интересы: нелинейная строительная механика стержней и пластин, остаточные напряжения и их влияние на устойчивость стальных конструкций, надежность строительных конструкций при силовых, деформационных и высокотемпературных воздействиях.

**Иванов Анатолий Порфирьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Донбасского государственного технического университета. Научные интересы: надежность строительных конструкций при силовых, деформационных и высокотемпературных воздействиях.

**Псюк Виктор Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Донбасского государственного технического университета. Научные интересы: надежность строительных конструкций при силовых, деформационных и высокотемпературных воздействиях.

**Golodnov Oleksandr** – D.Sc., professor of the department of Building Structures of Donbas State Technical University, member of Ukrainian Academy of Construction. Scientific interests: nonlinear structural mechanics of rods and plates, residual stresses and their influence on the stability of steel structures, safety of building structures in force, deformation and high temperature effects.

**Ivanov Anatoliy** – Ph.D. (Eng.), an Associate Professor of the building constructions of the Donbass State Technical University. Scientific interests: safety of building structures in force, deformation and high temperature effects.

**Psyuk Victor** – Ph.D. (Eng.), an Associate Professor of the building constructions of the Donbass State Technical University. Scientific interests: safety of building structures in force, deformation and high temperature effects.