



УДК 624.074.043



**РЕЗНИК П. А.**

Канд. технічних наук, ст. викл.,  
Харківський національний  
університет міського  
господарства ім. О.М. Бекетова,  
м. Харків, Україна,  
e-mail: Petro.Reznik@kname.edu.ua,  
тел. +38 (050) 615-86-38,  
ORCID: 0000-0003-3937-6833



**КОРЕНЄВ Р.В.**

Аспірант, Харківський  
національний університет  
міського господарства  
ім. О.М. Бекетова,  
м. Харків, Україна,  
e-mail: r.v.korot@gmail.com,  
тел. +38 (098) 358-99-07,  
ORCID: 0000-0001-9662-0762

## РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ БЕЗКАРКАСНИХ АРКОВИХ СИСТЕМ, ВИКОНАНИХ ІЗ ТОНКОСТІННИХ ХОЛОДНОДЕФОРМОВАНИХ ПРОФІЛІВ

### АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто конструкції покриттів та споруд, у вигляді бескаркасних аркових систем, виконаних із тонкостінних холоднодеформованих профілів. Проведено уточнення геометричних характеристик основного несучого елемента цих систем. Здійснено чисельне моделювання та аналіз напружено-деформованого стану зазначених споруд від різних навантажень та їх поєднань. Дослідження проведено на базі створеної скінченно-елементної моделі, що верифікована натурним експериментом, та відображає конструктивну ортотропію тришарової оболонки спеціального призначення. Фізико-механічні характеристики ортотропії визначено за спеціально розробленим алгоритмом. На підставі виконаних розрахунків та їх аналізу визначено критичні сили втрати стійкості рівноваги (згинально-крутильна форма) і критичні навантаження втрати стійкості плоскої форми вигину, а також критерії міцності конструкції з урахуванням послідовності її зведення, тобто за умови роботи конструкції як одно- так і тришарової системи. Запропоновано алгоритм оцінювання напружено-деформованого стану великопрольотних бескаркасних аркових споруд.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** бескаркасні покриття, аркові системи, тришарова оболонка, експериментальна верифікація.

### РАСЧЕТ И АНАЛИЗ БЕСКАРКАСНЫХ АРОЧНЫХ СИСТЕМ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ

**РЕЗНИК П.А.** Канд. технических наук, ст. преп., Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, г. Харьков, Украина, e-mail: Petro.Reznik@kname.edu.ua,

тел. +38 (050) 615-86-38,  
ORCID: 0000-0003-3937-6833

**КОРЕНЕВ Р.В.** Аспирант, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, г. Харьков, Украина, e-mail: r.v.korot@gmail.com, тел. +38 (098) 358-99-07, ORCID: 0000-0001-9662-0762

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены конструкции покрытий и сооружений в виде бескаркасных арочных систем, выполненных из тонкостенных холоднодеформированных профилей. Проведено уточнение геометрических характеристик основного несущего элемента указанных систем. Осуществлено численное моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния рассматриваемых сооружений от различных нагрузок и их сочетаний. Исследование проведено на базе составленной конечно-элементной модели, верифицированной натурным экспериментом и отображающей конструктивную ортотропию трехслойной оболочки специального назначения. Физико-механические характеристики ортотропии определены по специально составленному алгоритму. На основании выполненных расчетов и анализа определены критические силы потери устойчивости равновесия (изгибно-крутильная форма) и критические нагрузки потери устойчивости плоской формы изгиба, а также, критерии прочности конструкции с учетом последовательности ее возведения, т.е. при условии работы конструкции как одно- так и трехслойной системы. Кроме перечисленного, предложена методика по оценке напряженно-деформированного состояния большепролетных бескаркасных арочных сооружений.



**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** бескаркасные покрытия, арочные системы, трехслойная оболочка, экспериментальная верификация.

## **CALCULATION AND ANALYSIS OF FRAMELESS ARCHED SYSTEMS MADE OF THIN-WALLED COLD-DEFORMED PROFILES**

**REZNIK P.A.** PhD, senior lecturer, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkov, Ukraine,  
e-mail: Petro.Reznik@kname.edu.ua,  
tel. +38 (050) 615-86-38,  
ORCID: 0000-0003-3937-6833

**KORENIEV R.V.** PG student, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkov, Ukraine,  
e-mail: r.v.korr@gmail.com,  
tel. +38 (098) 358-99-07,  
ORCID: 0000-0001-9662-0762

### **ABSTRACT**

The article is devoted to the roofing and structures, in the form of frameless arched systems made of thin-walled cold-deformed profiles. The geometric characteristics of the main supporting element of the discussing systems are refined. Also, numerical modeling and analysis of the stress-strain state of the considered structures, under various loads and their combinations, has been carried out. The research was conducted on the basis of a finite element model verified by the full-scale experiment and which implements the constructive-orthotropy of a three-layer special-purpose shell. Physico-mechanical characteristics of orthotropy are determined by a special designed method. On the basis of the calculations and analysis, the critical forces of stability loss of equilibrium (flexural-torsion form) and critical loads of stability loss of a flat bending shape are determined, and also the criteria for the strength of the structure, taking into account the sequence of its erection, that is, under the condition that the designed structure works as the single- and as the three-layer system. In addition to the above, a technique for assessing the stress-strain state of large-span frameless arched structures is proposed.

**KEY WORDS:** frameless roofing, arched systems, three-layer shell, experimental verification.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В настоящее время в Украине широко используются бескаркасные покрытия арочного типа из тонкостенных холодногнутых профилей (рис.1). Данные конструкции могут применяться как в качестве покрытия зданий и сооружений, так и в качестве остова бескаркасных сооружений. Существенный интерес к рассматриваемым конструкциям обусловлен их низкой стоимостью, возможностью быстрого возведения и изготовления в условиях строительной площадки. Научный инте-

рес вызывает напряженно-деформированное состояние указанных конструкций. Несмотря на широкое применение, в действующих нормативных документах Украины четкие рекомендации для расчета подобного рода сооружений отсутствуют.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Схема работы прокатного стана для формования арочных конструктивных элементов из рулонной оцинкованной стали в условиях строительной площадки, а также описание технологии и последовательности строительных работ рассмотрены в статье [1]. В работе [2] определены особенности работы поперечных сечений холоднодеформированных трапециевидных арочных профилей системы типа «МІС» в составе арочного покрытия. В работе [3] рассмотрены причины обрушения конструкций бескаркасного арочного здания пролетом 30 м, изготовленного из рулонной оцинкованной стали на месте строительства. Виртуальность начальных несовершенств, при изготовлении элементов конструкции и недостаточная изученность вопроса, предопределяют необходимость проведения численных и экспериментальных исследований рассматриваемых конструкций и разработку алгоритмов их расчета. Подтверждением сказанному служит информация об определенном количестве аварий указанных систем [3].

### **ФОРМУЛИРОВАНИЕ ЦЕЛЕЙ СТАТЬИ**

**Объектом исследования** является фрагмент конструктивно-ортотропной трехслойной специальной оболочки, основным несущим элементом которой является холоднодеформированный арочный тонкостенный профиль.

**Предметом исследования** является напряженно-деформированное состояние (НДС) объекта исследования при действии постоянных и временных нагрузок и их различных сочетаний.

**Цель исследования** заключается в построении конечно-элементной (КЭ) модели фрагмента конструктивно-ортотропной трехслойной специальной оболочки и верификация ее, исходя из данных натурного эксперимента, уточнении на базе КЭ-модели существующих алгоритмов расчета рассматриваемых конструкций; определение оптимальной толщины основного конструктивно-го элемента, удовлетворяющей требованиям прочности и устойчивости; определение максимальных перемещений объекта исследования, в соответствии с действующими нормативными документами Украины.

### **ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

Исследуемой конструкцией является бескаркасный арочный ангар (рис. 1), в качестве расчетного принят пролет 22 м. Рассматриваются различные высоты и радиусы данной конструкции, соот-



ветствующие указанному пролету. ( $\{R=11 \text{ м}, H=11.27 \text{ м}\}$ ;  $\{R=11.135 \text{ м}, H=9.82 \text{ м}\}$ ;  $\{R=11.585 \text{ м}, H=8.37 \text{ м}\}$ ). Марка стали, согласно [4] принята к расчету DX51D+Z140.

Основными гипотезами настоящего исследования являются принятие положения о совместном деформировании конструктивной системы «обшивка – Z-прогоны – обшивка», а также классическая теория оболочек, основанная на гипотезах Кирхгофа-Лява [5]. Конструктивная система состоит из следующих элементов:

- арочный холоднодеформированный профиль «лоткообразного» сечения;
- Z-прогоны, между которыми размещают утеплитель;
- профилированный лист ПС-20.

### ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОЛОЧКИ

Необходимость рассмотрения арочного профиля «лоткообразного» сечения обусловлена его широким использованием в утепляемых трехслойных конструкциях в связи с удобством укладки утеплителя. Исходные данные, а также уточняемые характеристики сечений конструктивных элементов приняты на основе [4]. Ширина профиля составляет 305 мм, следовательно, нагрузка собирается на ширине 0.305 м (рис. 2).

С целью уточнения геометрических характеристик профиля были проведены испытания в лаборатории кафедры строительных конструкций ХНУГХ им. А.Н. Бекетова.

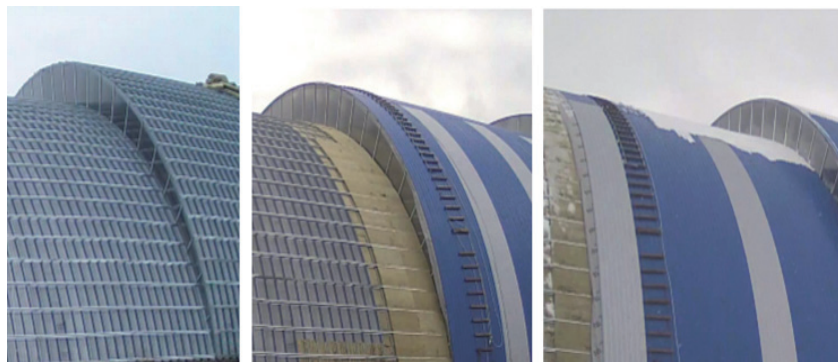
Исследовали одиночный арочный профиль по [4] - 305 А, с толщиной исходного металла  $t=1.2 \text{ мм}$ , для определения момента инерции относительно горизонтальной оси.

Момент инерции сечения был определен по формуле:

$$I_x = \frac{PL^3}{48Ef}, \quad (1)$$

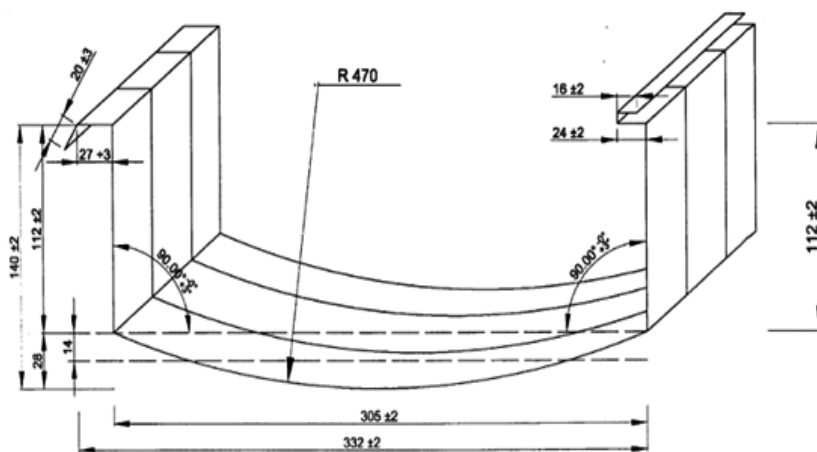
где  $P$  - нагрузка, кг;  $L$  - пролет, см;  $E$  - модуль упругости 1-го рода, кг/см<sup>2</sup>;  $f$  - перемещение, см.

На рис. 3 представлена расчетная схема проведения эксперимента. Расчетный пролет  $L=295 \text{ см}$ . Нагрузку прикладывали в середине пролета

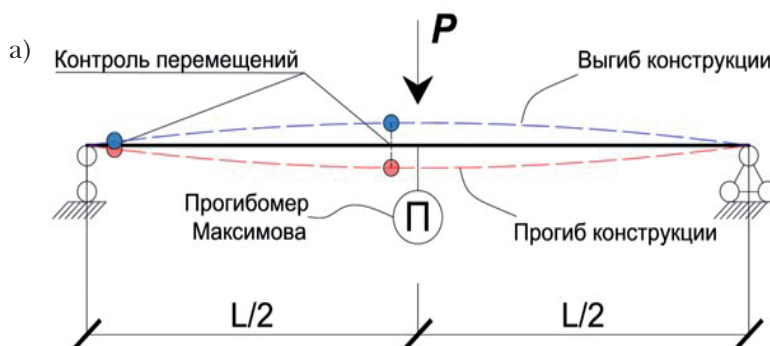


а) б) в)

**Рис. 1.** Бескаркасный арочный ангар на этапах возведения:  
- однослойная система с установленными Z-прогонами (а);  
- процесс утепления и монтажа верхней обшивки (б, в)



**Рис. 2.** Поперечное сечение расчетного арочного профиля [4]



**Рис. 3.** Расчетная схема эксперимента (а) и вид установки для испытаний (б)





предварительно тарированными бетонными грузами. После прекращения роста деформаций, на каждом шаге производили разгрузку образца и контроль остаточных деформаций. В связи с начальным выгибом (кривизной) объекта исследования, контролировали перемещения на опоре и в середине пролета с целью оценки обжатия на опоре и переходом выгиба в прогиб.

Результаты (рис. 4) показали, что в связи с частичным нарастанием остаточных деформаций при увеличении нагрузки, значение момента инерции падало. Тем не менее, среднее кубическое значение момента инерции было  $I_x = 118.7 \text{ см}^4$ , а значение момента инерции, полученное для данного профиля с использованием программного комплекса (ПК) «Лира-Сапр»  $I_x = 113 \text{ см}^4$ . Разница составила  $\sim 4.8\%$ , что является удовлетворительным.

Так как основным предметом исследования является НДС конструктивно-ортотропной трехслойной специальной оболочки, то в расчетной модели используются геометрические характеристики пакета «обшивка – Z-прогоны – обшивка», а именно «арочный профиль 305А – Z-прогоны – проф. лист ПС20» (рис. 5).

Геометрические характеристики пакета были подсчитаны в среде ПК «Лира-10», для арочных профилей толщиной 0.7 мм - 1.5 мм, включительно, с шагом 0.1 мм и профилированного листа ПС-20 толщиной 0.45 мм (табл. 1).

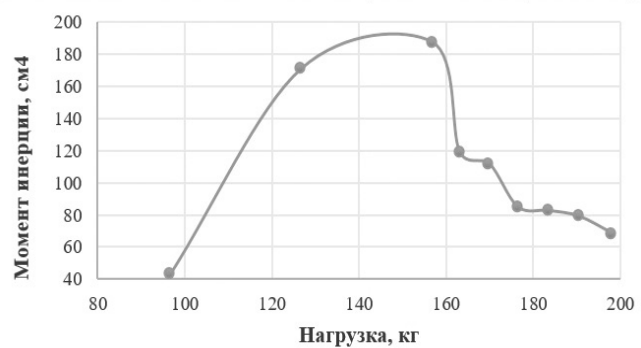


Рис. 4. Изменение момента инерции в зависимости от нагрузки

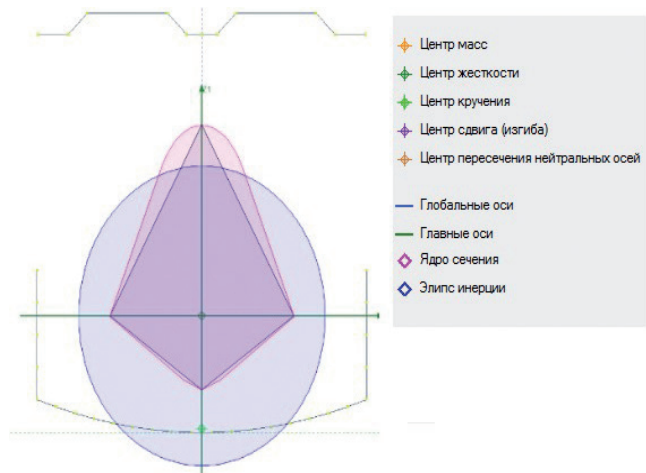


Рис. 5. Расчетное поперечное сечение пакета «обшивка – Z-прогоны – обшивка»

Таблица 1. Геометрические характеристики исследуемых пакетов.

Тип пакета	Момент инерции $I_x$ , см <sup>4</sup>	Момент инерции $I_y$ , см <sup>4</sup>	Площадь поперечного сечения $A$ , см <sup>2</sup>	Расстояние до центра тяжести $a_y$ , см	Секториальный момент инерции $I_w$ , см <sup>6</sup>	Момент инерции при свободном кручении $I_d$ , см <sup>4</sup>	Момент сопротивления $W_x$ , см <sup>3</sup>
305A 0.7мм+Z+ПС20	1093,32	653,46	5,26	9,67	144204	103,03	48,21
305A 0.8мм+Z +ПС20	1141,43	729,24	5,80	9,94	149254	103,27	48,57
305A 0.9мм+Z +ПС20	1183,14	805,02	6,33	9,61	153562	103,46	48,92
305A 1.0мм+Z +ПС20	1219,8	880,80	6,86	9,60	157319	103,61	49,26
305A 1.1мм+Z +ПС20	1252,53	956,58	7,39	9,53	160655	103,74	49,60
305A 1.2мм+Z +ПС20	1282,14	1032,36	7,92	9,49	163662	103,84	49,91
305A 1.3мм+Z +ПС20	1309,2	1108,14	8,45	9,45	166408	103,94	50,24
305A 1.4мм+Z +ПС20	1334,18	1183,92	8,98	9,42	168943	104,02	50,56
305A 1.5мм+Z +ПС20	1357,42	1259,71	9,52	9,38	171305	104,10	50,87



## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Моделирование и расчет производили в многофункциональном программном комплексе «Лира-Сапр» [6], применяемом для проектирования и расчета строительных конструкций, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Для решения плоской задачи (первое приближение), без учета пространственной работы и ортотропии конструкции, расчетная модель представляла собой арку диаметром 22 м, выполненную из универсальных пространственных стержневых элементов (КЭ 10). Расчет производили, исходя из следующих условий:

- арочный профиль и профлист работают как единое сечение;
- закрепление арки в зоне оголовка фундамента – неподвижный шарнир;
- элементы соединения арочных профилей между собой обеспечивают равнопрочные связи, что позволяет принять минимальные перемещения из плоскости;
- перемещения фундаментов по горизонтали не допустимы;
- неравномерные осадки фундаментов и их крен не должны превышать 30 мм и 0.002, соответственно;
- допустимый вертикальный прогиб составляет  $L/245$ , а горизонтальные предельные перемещения  $L/200$ .

Производили расчет трех моделей:  $L = \text{const} = 22$  м,  $\{R = 11$  м,  $H = 11.27$  м};  $\{R = 11.135$  м,  $H = 9.82$  м};  $\{R = 11.585$  м,  $H = 8.37$  м}.

## НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ

Расчет производили для Украины, снеговой район № 5, ветровой район № 2. Сбор нагрузок на конструкцию был проведен в соответствии с [7]. Арочные конструкции рассчитывали на постоянные (собственный вес, вес конструкции кровли и т.д.) и переменные (в данном случае, снег и ветер) нагрузки. Расчет проводили по двум предельным состояниям. Первая группа – расчет усилий и напряжений, вторая группа – расчет деформаций. Соответственно, определяли расчетные и эксплуатационные значения нагрузок ( $j_{fm}$  и  $j_{fe}$ ).

Нагрузки на арочный профиль составили:

- снеговая нагрузка  $S_r = 1600$  кПа = 163.1 кг/м<sup>2</sup> (2 вида – симметрично и несимметрично);
- ветровая нагрузка  $W_r = 43.8$  кг/м<sup>2</sup>.
- собственный вес металлического профиля, выполненного из стали, со средней плотностью 7800 кг/м<sup>3</sup>.

Схемы приложения снегового и ветрового нагружений, определенные по [7], представлены на рис. 6.

На основании этих нагружений было сформировано 6 расчетных сочетаний нагрузок и таблица расчетных сочетаний усилий. Анализ перемещений и действующих нагрузок на каждый конеч-

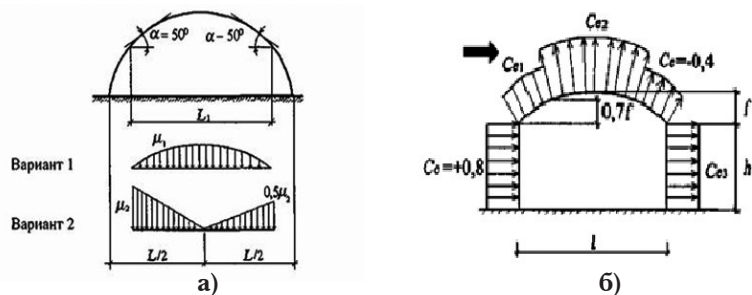


Рис. 6. Схемы приложения снеговой (а) и ветровой (б) нагрузок

ный элемент проводили на основании расчета по расчетным сочетаниям нагрузок, а проверка критерия прочности – по расчетным сочетаниям усилий.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

### Расчет по прочности и устойчивости

В соответствии с [8, 9] расчет элементов стальных конструкций на действие продольной силы и изгибающего момента проводили по формуле:

$$\frac{N j_n}{A_n R_y j_c} \pm \frac{M_x j_n}{I_{xn} R_y j_c} y \pm \frac{M_y j_n}{I_{yn} R_y j_c} x \leq 1, \quad (2)$$

где:

$N, M_x, M_y$  – абсолютные значения усилий;  $j_c = I; j_n = I$ ;  $R_y = 235$  МПа;  $y, x$  – расстояния от главных осей до рассматриваемой точки сечения.

По формуле (2) проведена проверка критерия прочности 737 сечений по результатам сформированных расчетных сочетаний усилий для каждой из трех моделей арок ( $H = 11.27$  м;  $H = 9.82$  м;  $H = 8.37$  м) и для каждого из пакетов с разной толщиной арочного профиля. Номера нагружений: 1 – постоянная; 2 – равномерно распределенная снеговая нагрузка; 3 – неравномерно распределенная снеговая нагрузка; 4 – ветер. Максимальные вертикальные и горизонтальные перемещения получены по анализу расчета по расчетным сочетаниям нагрузок стержней.

На рис. 7, 8 приведены эпюры усилий (продольной силы «N» и изгибающего момента «M») для арки высотой 11.27 м с профилем толщиной 1,2 мм для расчетных сочетаний нагрузок 1 и 2.

Критерии прочностей сечений, максимальные вертикальные и горизонтальные перемещения представлены в виде диаграммы на рис. 9.

### Устойчивость плоской формы изгиба

Устойчивость плоской формы изгиба определена по формуле (3) на основе решения профессора В.З. Власова [10]:

$$M = R P_x \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{r^2}{R^2} \frac{P_0}{P_x} + \frac{L^2}{\pi^2 R^2} - \frac{2\beta_x}{R} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{r^2}{R^2} \frac{P_0}{P_x} + \frac{L^2}{\pi^2 R^2} - \frac{2\beta_x}{R} \right)^2 + \frac{r^2}{R^2} \left( 1 - \frac{L^2}{\pi^2 R^2} \right) \frac{P_0}{P_x}} \right], \quad (3)$$

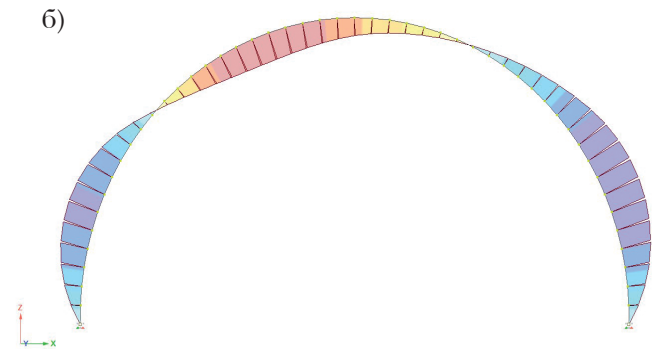
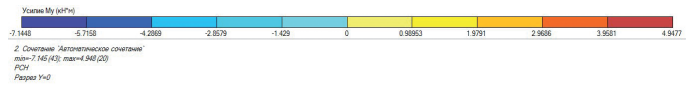
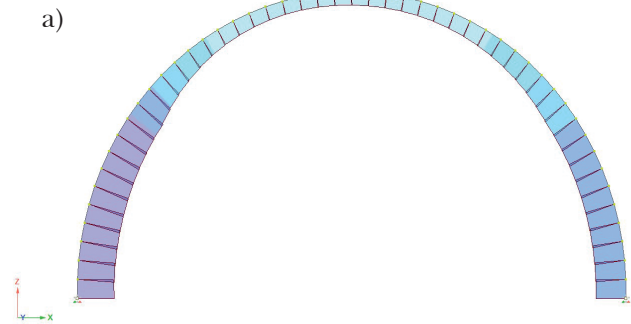
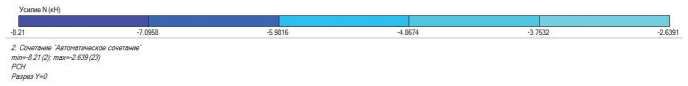
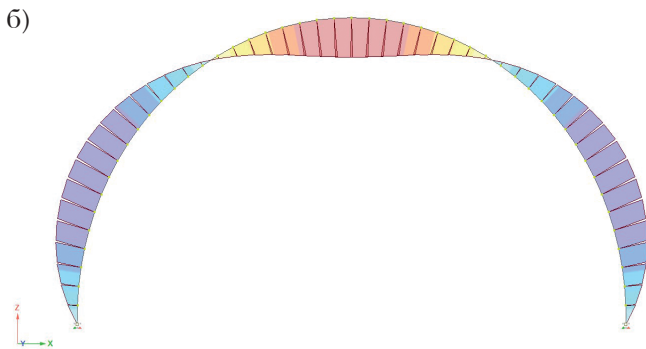
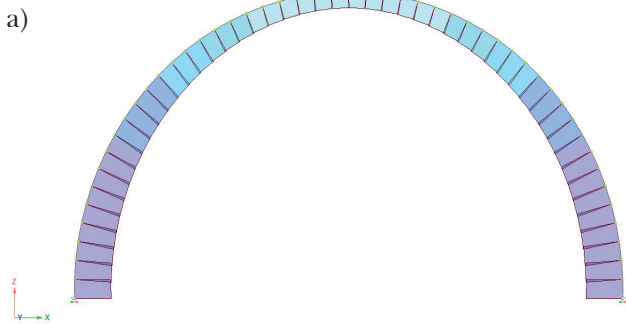
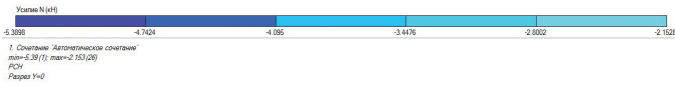


Рис. 7. Эпюры продольной силы N, кН (а) и изгибающего момента M, кН • м (б), для расчетного сочетания нагрузок № 1

Рис. 8. Эпюры продольной силы N, кН (а) и изгибающего момента M, кН • м (б), для расчетного сочетания нагрузок № 2

где:  
M – момент; R – радиус арки;

$$r^2 = \frac{I_x + I_y}{A} + a_y^2; \quad (4)$$

$$P_x = \frac{\pi^2 EI_x}{L^2}; \quad (5)$$

$$P_0 = \frac{1}{r^2} \left( \frac{\pi^2 EI_\omega}{L^2} + GI_d \right); \quad (6)$$

$$\beta_x = 0;$$

$I_x$ ,  $I_y$  – моменты инерции;  $A$  – площадь сечения;  $I_\omega$  – секториальный момент инерции;  $I_d$  – момент инерции при свободном кручении;  $E$  – модуль упругости первого рода;  $G$  – модуль упругости второго рода.

Результаты расчета для всех типов рассматриваемых сечений пакетов и радиусов арок представлены в табл. 2.

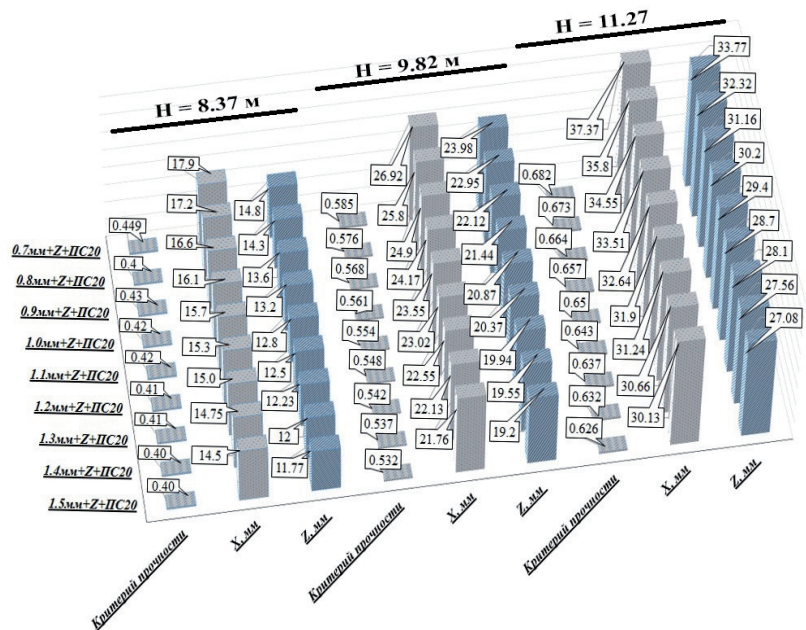


Рис. 9. Критерии прочностей сечений, максимальные вертикальные (Z, мм) и горизонтальные перемещения (X, мм), для высот H = 8.37 м; H = 9.82 м; H = 11.27 м





Таблица 2. Геометрические характеристики исследуемых пакетов.

Тип пакета	Критические изгибающие моменты $M_1, M_2$ (т · м) для радиусов систем, R (м)					
	R = 11,0		R = 11,135		R = 11,585	
	$M_1$	$M_2$	$M_1$	$M_2$	$M_1$	$M_2$
305A 0.7мм+Z +ПС20	22.2	-0.7875	22,0	-0.8091	21.2	-0.8795
305A 0.8мм+Z +ПС20	23.2	-0.7913	22.9	-0.8131	22.1	-0.8840
305A 0.9мм+Z +ПС20	24,0	-0.7945	23.7	-0.8163	22.9	-0.8876
305A 1.0мм+Z +ПС20	24.7	-0.7970	24.4	-0.8190	23.5	-0.8906
305A 1.1мм+Z +ПС20	25.3	-0.7992	25,0	-0.8213	24.1	-0.8932
305A 1.2мм+Z +ПС20	25.9	-0.8011	25.6	-0.8232	24.7	-0.8954
305A 1.3мм+Z +ПС20	26.4	-0.8027	26.1	-0.8249	25.2	-0.8973
305A 1.4мм+Z +ПС20	26.9	-0.8042	26.6	-0.8264	25.6	-0.8990
305A 1.5мм+Z +ПС20	27.3	-0.8055	27,0	-0.8278	26.1	-0.9006

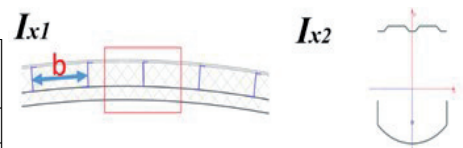


Рис. 11. Поперечные сечения трехслойной системы

$$d = \frac{36EI_xEI_yEI_\omega}{R^6} + \frac{9EI_xEI_yGI_d}{R^4} \cdot (11)$$

В формулах (7)-(11) обозначения аналогичны соответствующим обозначениям формулы (3). Результаты расчета устойчивости равновесия для всех типов сечений и высот арок представлены на рис. 10.

Для учета пространственной работы конструкции исследовали конечно-элементную модель, отображающую конструктивную ортотропию специальной трехслойной оболочки.

Для этого установлены моменты инерции для 1 м поперечного и продольного сечения трехслойной конструкции, состоящей из арочного профиля, z-образного профиля (высотой 200 мм) и профилированного листа ПС-20 (рис. 11).

Все данные для расчета ортотропии были найдены по формулам, из расчета линейной работы металла (12)-(16):

$$E_1 \cdot v_{21} = E_2 \cdot v_{12}; \quad (12)$$

$$\Rightarrow \vartheta_{21} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \vartheta_{12} \cdot (13)$$

$$E_2 = E_1 \cdot \alpha; \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{I_{x2} \cdot b}{100 \cdot I_{x1}}; \quad (15)$$

При этом

где:

### Устойчивость равновесия (изгибно-крутильная форма)

Критическая нагрузка потери устойчивости равновесия определена по формуле (7):

$$c = \frac{12EI_yEI_\omega}{R^3} + \frac{12EI_xEI_\omega}{R^3} + \frac{12EI_xEI_yr^2}{R^3} + \frac{3EI_yGI_d}{R} + \frac{3EI_xGI_d}{R}, \quad (7)$$

где:

$$a = R^3 (a_y^2 - r^2); \quad (8)$$

$$b = 4EI_\omega + 3EI_yr^2 + 4EI_xr^2 + GI_dR^2 - 4EI_xa_y^2; \quad (9)$$

$$c = \frac{12EI_yEI_\omega}{R^3} + \frac{12EI_xEI_\omega}{R^3} + \frac{12EI_xEI_yr^2}{R^3} + \frac{3EI_yGI_d}{R} + \frac{3EI_xGI_d}{R}; \quad (10)$$

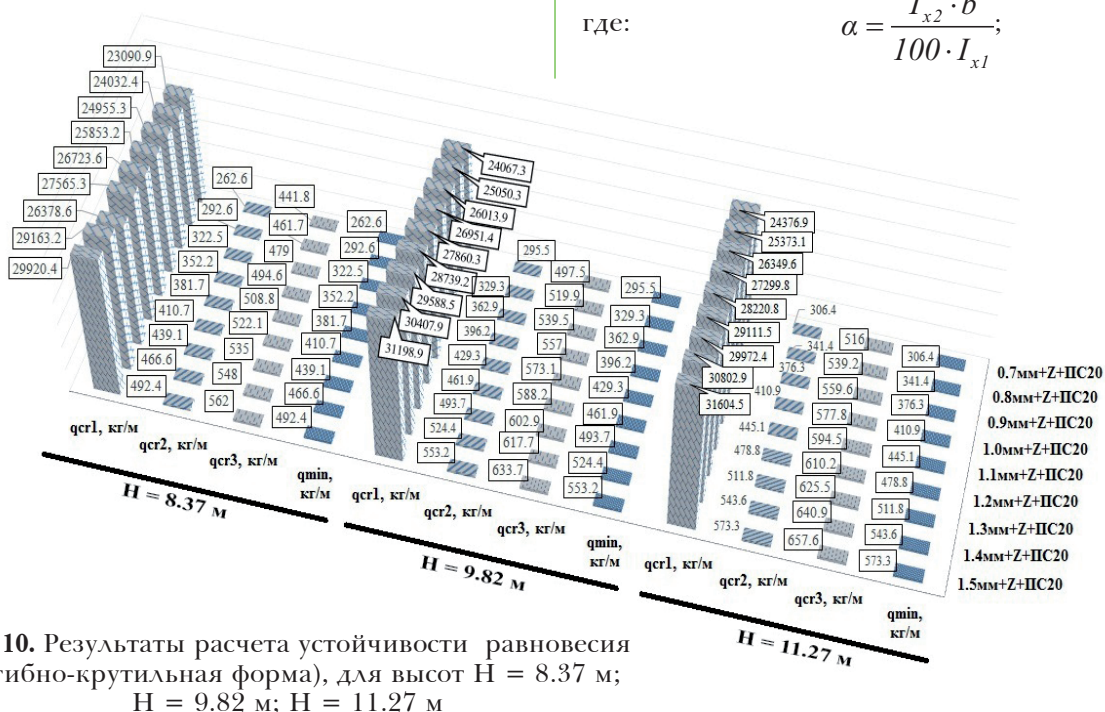


Рис. 10. Результаты расчета устойчивости равновесия (изгибно-крутильная форма), для высот H = 8.37 м; H = 9.82 м; H = 11.27 м



$$G = v \cdot 0.2 \cdot E v_1 (1 + a). \quad (16)$$

В свою очередь, приведенную толщину специальной оболочки определяли, исходя из условий:

$$\min \left( \frac{I_{x1}}{100}; \frac{I_{x2}}{100} \right) = \frac{h^3}{12}; \quad (17)$$

$$\Rightarrow h_{red} = \sqrt[3]{12 \cdot I}, \quad (18)$$

где:

$E_1, E_2$  – модули деформации по главным направлениям упругости;  $G$  – модуль сдвига;  $v_1, v_2$  – коэффициенты Пуассона;  $I_{x1}, I_{x2}$  – моменты инерции в указанных направлениях;  $h$  – оригинальная высота (толщина) пакета;  $h_{red}$  – приведенная толщина оболочки.

Описываемая модель была получена путем перемещения образующей и состоит из 3162 узлов и 3050 КЭ № 41. Было смоделировано три нагружения: собственный вес и два варианта снегового нагружения. Результаты расчета от расчетного сочетания нагрузок № 3 представлены в виде изополей главных напряжений  $\sigma^3$  (МПа) (рис. 12) и изополей перемещений по оси Z (мм) (рис. 13).

С целью верификации расчетной модели, проводили натурные испытания, предполагающие сопоставление расчетных прогибов с экспериментальными. Испытания проводили с учетом последовательности возведения конструкции, т. е. при условии работы конструкции как одно-, так и трехслойной системы.

В данной статье представлен первый этап указанного эксперимента. Реализованы испытания однослойной системы методом приложения сосредоточенной нагрузки  $F$  в середине пролета (рис. 14).

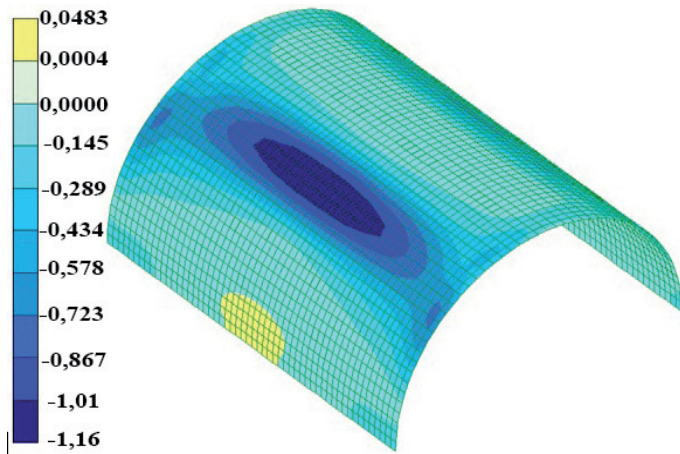


Рис. 12. Изополя главных напряжений  $\sigma^3$  (МПа) от расчетного сочетания нагрузок № 3

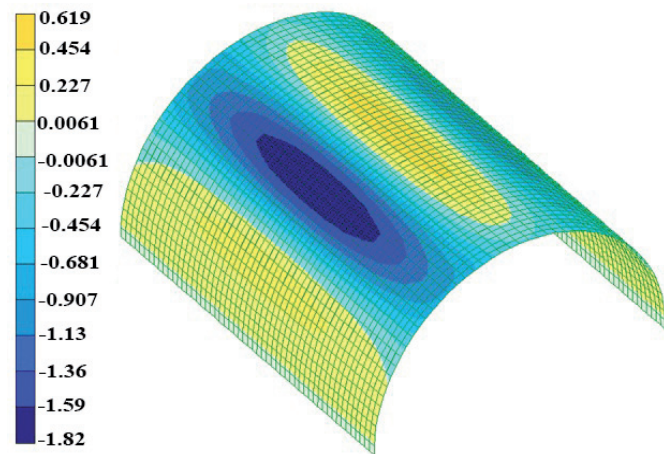


Рис. 13. Изополя перемещений по оси Z (мм) от расчетного сочетания нагрузок № 3

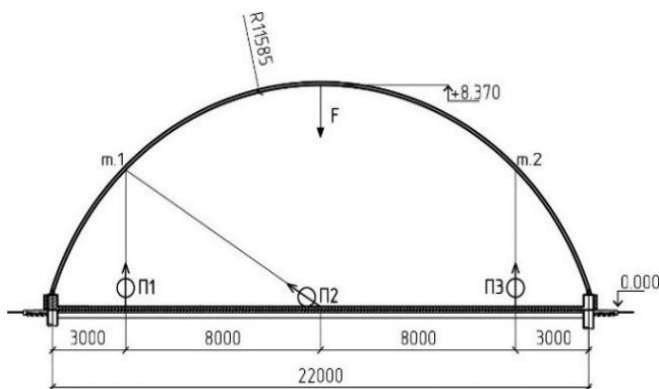


Рис. 14. Схема нагружения и расстановки измерительных приборов и фото фиксация процесса проведения эксперимента





Для сопоставления полученных экспериментальных результатов с теоретическими была исследована КЭ модель однослойной системы с нагрузками, аналогичными экспериментальным, и замерах перемещений в соответствующих точках. Нагрузку прикладывали поэтапно - по 20 кг, с временным интервалом 1 мин. Максимальная нагрузка составила 200 кг. Под максимальной нагрузкой конструкция находилась 10 мин, после чего поэтапно по 20 кг осуществляли разгрузку. После снятия нагрузки было выдержано 10 мин и сняты показания приборов без нагрузки для сопоставления с начальными показаниями и для получения данных об остаточных деформациях.

Сопоставление результатов эксперимента с расчетной моделью показало, что в целом эксперимент показал удовлетворительную для инженерных расчетов точность (~15%) вычисления прогибов однослойной системы. Это дает право использовать разработанную конечно-элементную модель и предопределяет необходимость проведения более детального изучения проблемы и использования более точных измерительных приборов, т.к. расхождение экспериментальных и расчетных значений следует отнести, в том числе, на накопленные неточности, связанные с погрешностями:

- сборки и установки грузов;
- координат установки грузов;
- геометрии конструкции в целом и др.

## ВЫВОДЫ

- В данном исследовании проведено численное моделирование конструктивно-ортотропной трехслойной специальной оболочки, с учетом последовательности ее возведения.
- Данные результаты получены при принятии положения о совместном деформировании конструктивной трехслойной системы и служат основой для проведения натурных испытаний конструкции.
- Показано, что в процессе возведения изменяется конструкция и характер работы оболочки, что нашло отражение в трансформации расчетной модели (переход от конечно-элементной изотропной оболочки нулевой гауссовой кривизны к ортотропной). При этом, физико-механические характеристики ортотропии определены по специально разработанному алгоритму.
- Проведено сопоставление критических сил потери устойчивости, определенных методом проф. В.З. Власова, с аналогичными характеристиками, определенными методом конечных элементов.

- Все исследованные арки (при решении плоской задачи) удовлетворяют:
  - критерию прочности при действии продольных сил и изгибающих моментов в соответствии с [5];
  - требованиям, предъявляемым к максимальным вертикальным ( $L/245 = 90$  мм) и горизонтальным ( $L/200 \Rightarrow 42, 49, 56$  мм для арок высотой 8.37, 9.82, 11.27 м соответственно) перемещениям в соответствии с [11].
- Максимальные действующие нагрузки и их расчетные сочетания на оболочку не превысили нагрузки потери устойчивости равновесия (изгибно-крутильная форма) и критической нагрузки потери устойчивости плоской формы изгиба.
- Предложен алгоритм оценивания напряженно-деформированного состояния большепролетных бескаркасных арочных сооружений, выполненных из тонкостенных холодногнутых профилей, который заключается в обязательном учете ортотропии конструкции и ее пространственной работы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зильберберг С.Д. Эффективные хранилища из легких арочных металлических конструкций / С.Д. Зильберберг, К.А. Огайка, В.П. Федорова // Пром. стр-во: Ежемесячный науч.-технический и произв. журн. – М. 1988. - Вып. 11. – С. 21-23.
2. Білик А.С. Визначення геометричних характеристик холодноформованих тонкостінних аркових профілів / А.С. Білик, М.В. Лапонов // 36. наукових пр. – Київ: Український ін-т сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського, 2012. – Вип. 9, – С. 193-203.
3. Кузнецов И.А. Причины обрушения бескаркасного арочного сооружения пролетом 30 м / И.А. Кузнецов, А.В. Исаев, Л.Р. Гимранов // Изв. КГАСУ: Ежемесячный науч.-технический журн. – Казань: ФГОУВО КГАСУ, 2011. – Вып. 4, – С. 166-171.
4. ТУ 527200-028-87168171-2012 «Бескаркасные арочные сооружения (конструкции) из прямых и арочных гнутых профилей 305А; 305П производимых на оборудовании «Радуга-Кровля» выше отметки 0.000». – г. Тамбов : ООО «Стальпроект», 2012. – 39 с.
5. Власов В.З. Избранные тр. Общая теория оболочек. Т. 1. / В.З. Власов. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962 г. - 528 с.



6. Городецкий А.С. Информационные технологии расчёта и проектирования строит. конструкций / А.С. Городецкий, В.С. Шмуклер, А.В. Бондарёв. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 889 с.
7. Навантаження і впливи: ДБН В.1.2-2:2006. - [Чинні від 2007-01-01]. – Київ :ДП "Укрархбудінформ", 2006. – 75с. - (Державні буд. норми).
8. Сталеві конструкції. Норми проектування : ДБН В.2.6-198:2014. - [Чинні від 2015-01-01]. – Київ: ДП "Укрархбудінформ", 2014. – 205 с. - (Державні буд. норми).
9. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14:2009. - [Чинні від 2012-12-01]. – Київ: ДП "Укрархбудінформ", 2009. – 29 с. - (Державні буд. норми).
10. Власов В.З. Избранные тр. Тонкостенные упругие стержни. Т. 2. / В.З. Власов. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1963 г. - 507 с.
11. Прогини і переміщення. Вимоги проектування: ДСТУ Б В.1.2-3:2006. - [Чинний від 2007-01-01]. – Київ: ДП "Укрархбудінформ", 2006. – 14 с. (Національний стандарт України).

## REFERENCES

1. Zilberberg, S.D., Ohajka, K.A., & Fedorova, V.P. (1988). Efficient storage facilities of light arched metal structures. *Promyshlennoie stroitelstvo: Scientific, technical and industrial monthly*, 11, 21-23.
2. Bilyk, A.S., & Laponov, M.V. (2012). Determination of geometric characteristics of cold-formed thin-walled arch profiles. *Collected papers of V. Shimanovsky Ukrainian Institute of Steel Constructions*, 9, 193-203.
3. Kuznetsov, I.L., Isaev, A.V., & Gimranov, L.R. (2011). The reasons for the collapse of a frameless arched structure with a span of 30 m. *News of KSUAE: Scientific and technical monthly*, 4, 166-171.
4. Frameless arched facilities (structures) of straight and arched bent profiles 305A and 305П produced using the "Raduha-Krovla" equipment above the 0.000 elevation: TU 527200-028-87168171-2012. (2012). Tambov: ООО "Stalproekt" (2012). – 39 с.
5. Vlasov, V.Z. (1962). General theory of shells. *Selected works (Vol. 1)*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR Press.

6. Horodetskyi, A.S., Shmukler, V.S., & Bondarev, A.V. (2003). *Informational technologies for buildings structures calculation and design*. Kharkov: NTU "KhPI".
7. *Loads and actions: DBN V.1.2-2:2006 (2007)*. Kyiv: SE "Ukrarkhbudinform".
8. *Steel structures. Design code: DBN V.2.6-198:2014. (2015)*. Kyiv: SE "Ukrarkhbudinform".
9. *General principles for reliability and constructive safety ensuring of buildings, facilities, civil structures and bases: DBN V.1.2-14:2009. (2012)*. Kyiv: SE "Ukrarkhbudinform".
10. Vlasov, V.Z. (1963). *Thin-walled elastic rods. Selected works (Vol. 2)*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR Press.
11. *Deflections and displacements. Design rules: DSTU B V.1.2-3:2006. (2007)*. Kyiv: BY "Ukrarkhbudinform".

Статья поступила в редакцию 15.08.2017 г.