

УДК 624.074.43

**ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СООРУЖЕНИЙ ОБОЛОЧЕЧНОГО ТИПА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Канд. техн. наук П. А. Резник, асп. Р. В. Коренев (ХНУГХ имени А. Н. Бекетова)

**ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ СПОРУД ОБОЛОНКОВОГО ТИПУ В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Канд. техн. наук П. А. Резник, асп. Р. В. Коренєв (ХНУМГ імені О. М. Бекетова)

**THE FEATURES OF DEFORMATION OF SHELL-TYPE STRUCTURES UNDER CONDITIONS OF DYNAMIC LOADING**

Phd. techn. sc. P. A. Reznik, pg R. V. Koreniev (O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv)

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.178.2018.138974>

---

*Проведен анализ напряженно-деформированного состояния сооружения оболочечного типа, в качестве остова в котором используются холоднодеформируемые тонкостенные профили, от динамического действия ветра. Исследование проведено на базе составленной конечно-элементной модели, отображающей свойства оболочки специального назначения. На основании выполненных расчетов и анализа получены частоты и формы собственных колебаний конструкции. Верификация расчетной модели проведена на основе натурного*

эксперимента. Перечисленное в совокупности предопределило внедрение системы через проектирование ряда возведенных объектов.

**Ключевые слова:** оболочечные системы, холоднодеформированные тонкостенные профили, динамическое действие ветра, устойчивость.

У статті розглянуто великопрогонові оболонкові конструкції, основним конструктивним елементом яких є тонколистовий холоднодеформований арковий металевий профіль, що виготовляється безпосередньо на будівельному майданчику. Проаналізовано особливості технології проведення будівельних робіт при монтажі зазначених конструкцій і розглянуто особливості та проблеми використання даних конструкцій на території України, США та країн Європейського Союзу.

Об'єктом дослідження є фрагмент зазначеної спеціальної оболонкової системи.

Мета дослідження полягає в побудові скінченноелементної моделі об'єкта дослідження, а також уточненні, на базі цієї моделі, існуючих методик розрахунку розглянутих конструкцій. Також метою дослідження є визначення частот власних та вимушених коливань об'єкта дослідження чисельним та експериментальним шляхом та верифікація скінченноелементної моделі за допомогою проведення натурного повномасштабного експерименту.

Розглянуто алгоритм скінченноелементного моделювання об'єкта дослідження та граничні умови розрахункової схеми.

Проведено аналіз напружено-деформованого стану споруди оболонкового типу від динамічної дії вітру, за остов в якій використовуються зазначені холоднодеформовані тонкостінні профілі. Дослідження проведено на базі складеної скінченно-елементної моделі, що відображає властивості оболонки спеціального призначення. На підставі виконаних розрахунків проведено аналіз напружено-деформованого стану та амплітудно-частотних (частоти і форми власних коливань) характеристик оболонкової конструкції. Верифікацію розрахункової моделі проведено на основі натурного експерименту, у ході якого до розглянутого повнорозмірного фрагмента оболонкової системи прикладали навантаження та проводили заміри амплітудно-частотних характеристик за допомогою двоканального віброаналізатора «ОНИКС». Перелічені в сукупності зумовило впровадження системи через проектування ряду зведених об'єктів.

**Ключові слова:** оболонкові системи, холоднодеформовані тонкостінні профілі, динамічна дія вітру, стійкість.

*The article is devoted to the large-velocity shell designs, the main supporting element of which is thin-walled cold-deformed arched metal profile, which is manufactured directly on the construction site. The peculiarities of the technology of carrying out construction works during the installation of these structures are analyzed, and features and problems of the use of these structures in the territory of Ukraine, USA and the European Union countries are considered.*

*The object of the research is a fragment of the specified special shell system.*

*The purpose of the research is to construct a finite-element model of the research object, as well as refine, on the basis of this model, the existing methods of calculating the considered structures. Also, the goal of the study is to determine the frequency of own and forced fluctuations of the object of research, numerically and experimentally, and verification of the finite-element model, by conducting a full-scale experiment.*

*The algorithm of finite-element modeling of the research object is considered, and the boundary conditions of the calculation scheme are considered.*

*The analysis of the strained-deformed state of the shell-type structure from the dynamic effect of the wind is carried out, as the core in which these cold-deformed thin-walled profiles are used. The research was carried out on the basis of a compiled finite element model that implements the properties of a special-purpose shell. On the basis of the performed calculations, the analysis of the stress-strain state and the amplitude-frequency (frequency and shape of the proper oscillations) of the characteristics of the shell structure have been carried out. The calculation model was verified on the basis of a full-scale experiment, during which a load was applied to the considered full-size fragment of the shell-type system and measurements of amplitude-frequency characteristics were made by two-channel vibration analyzer "ONIKS". The enumerated in the aggregate predetermined the introduction of the system through the design of a number of erected objects.*

**Key words:** shell-type systems, cold-deformed thin-walled profiles, dynamic wind action, stability.

**Введение.** Конструкции оболочечного типа (рис. 1) из холоднодеформированных тонколистовых металлических профилей обретают широкую популярность. Использование оболочечных конструкций данного типа в качестве остова и в качестве покрытия зданий и сооружений обуслов-

лено низкой стоимостью строительства, доступностью материалов, необходимых для производства, а также скоростью производства конструктивных элементов и монтажа. Изготовление конструктивных элементов, лежащих в основе данных систем, происходит на стройплощадке.



Рис. 1. Оболочечные конструкции из холоднодеформированных тонкостенных профилей

**Анализ последних исследований и публикаций.** Подробное описание технологии изготовления (в условиях строительной площадки) и производства работ по монтажу специальных оболочечных систем описывается в статье [1]. Особенность работы отдельных конструктивных элементов с трапециевидным поперечным сечением рассмотрены в работе [2]. Оценка работы поперечного сечения, с учетом редуционного фактора, обоснованного наличием поперечного гофрирования, вызванного особенностями

технологии производства конструктивного элемента, обозначены в работе [3]. В статьях [4], [5] приведена информация о сложностях эксплуатации, определенном числе аварий и их возможных причин для рассматриваемых систем.

Несмотря на возрастающую популярность описываемых конструкций в нормативных документах, действующих на территории Украины [6], [7], США и стран Европейского Союза, отсутствуют рекомендации и методики по их расчету и конструированию. Научный интерес

представляет напряженно-деформированное состояние указанных оболочечных систем.

Сказанное, в совокупности, предопределяет необходимость проведения численных и натурных экспериментальных исследований.

**Определение цели и задания исследования.** Цель исследования заключается в анализе напряженно-деформированного состояния указанных конструкций. Задачи исследования заключаются в построении конечно-элементной модели объекта исследования, а также в уточнении на ее

базе существующих методик расчета рассматриваемых конструкций и верификации ее, исходя из данных натурного эксперимента. Также к задачам исследования относится определение частот собственных и вынужденных колебаний объекта исследования численным и экспериментальным путем.

**Основная часть исследования.** Объектом исследования является фрагмент специальной оболочечной системы (рис. 2), основным несущим элементом которой является холоднодеформированный арочный тонкостенный профиль (рис. 3).



Рис. 2. Фрагмент специальной оболочечной системы

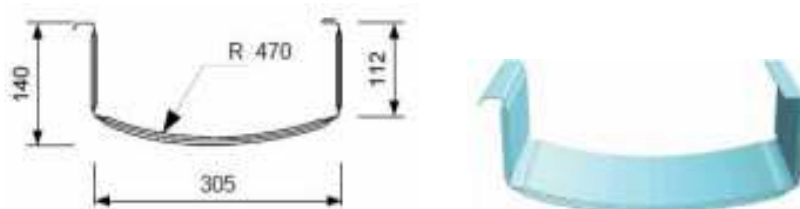


Рис. 3. Поперечное сечение арочного конструктивного элемента [8]

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние (НДС) объекта исследования при действии

статических и динамических нагрузок, частоты собственных и вынужденных колебаний объекта исследования.

Моделирование и расчет производили в среде многофункционального программного комплекса «Лира» [9], применяемом для проектирования и расчета строительных конструкций, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Применение именно МКЭ является наиболее оптимальным в такого рода задачах [10], [11].

Расчет производили исходя из следующих условий:

- справедливость гипотез Кирхгофа–Лява [12];
- закрепление систем в опорной зоне (в зоне оголовка фундамента) – неподвижный шарнир;
- элементы соединения арочных профилей между собой обеспечивают равнопрочные связи, что позволяет принять положение о совместном деформировании;

- влияние поперечных гофр арочного конструктивного элемента не учитывается;
- поперечное сечение (рис. 3), имеющее кривизну стенки, аппроксимировано поперечным сечением без кривизны, но с таким же моментом инерции;
- по торцам оболочечной системы принято закрепление, моделирующее наличие торцевых диафрагм, т. е. запрещены вертикальные и горизонтальные перемещения узлов, лежащих в плоскости торцевой диафрагмы.

Для решения поставленной задачи при моделировании применялся универсальный прямоугольный конечный элемент оболочки (КЭ 41). Данный КЭ предназначен для прочностного расчета тонких оболочек (плит, балок-стенок). На рис. 4 представлено схематическое изображение КЭ и последовательность нумерации его узлов.

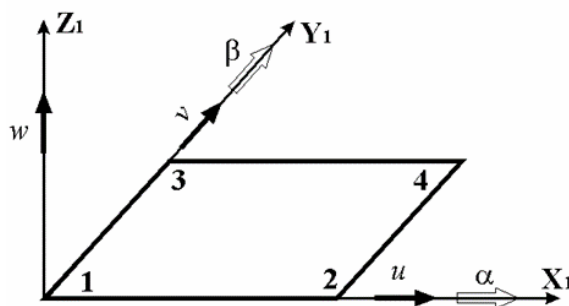


Рис. 4. Схематическое изображение КЭ 41

Исследуемая оболочечная система имеет следующие параметры:

- R – радиус оболочки, равный 11,63 м;
- H=R – стрела подъема;
- L=2R – длина оболочки;
- t=1.2 мм – толщина материала оболочки.

В качестве материала применялась сталь с физико-механическими характеристиками:

- объемный вес – 7.85 тс/м<sup>3</sup>;
- модуль упругости – 2,1×10<sup>5</sup> МПа;
- коэффициент Пуассона – 0,3.

Расчетная модель представляет собой ребристую оболочку (рис. 5), с указанными

габаритами и граничными условиями, состоящую из 18634 узлов и 18360 конечных элементов указанного типа. Толщина ребер (шпангоутов) принята как удвоенная толщина оболочки.

Результаты расчета, характеризующие напряженно-деформированное состояние рассматриваемых систем, представлены в виде изополей (рис. 6) главных напряжений.

Также определены 10 форм собственных колебаний, представленных в табл. 1, и соответствующие им амплитудно-частотные характеристики (табл. 2).

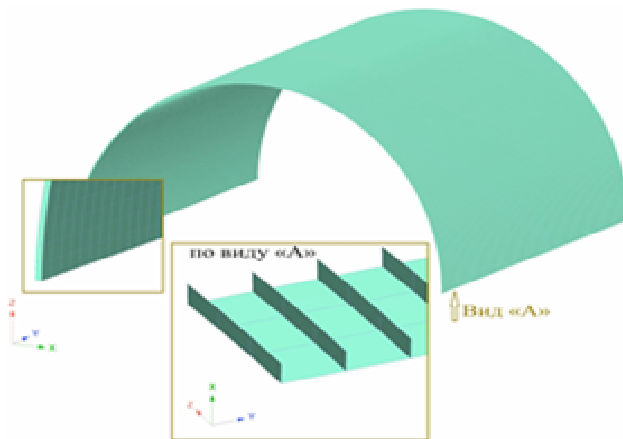


Рис. 5. Конечно-элементная модель исследуемой оболочечной системы

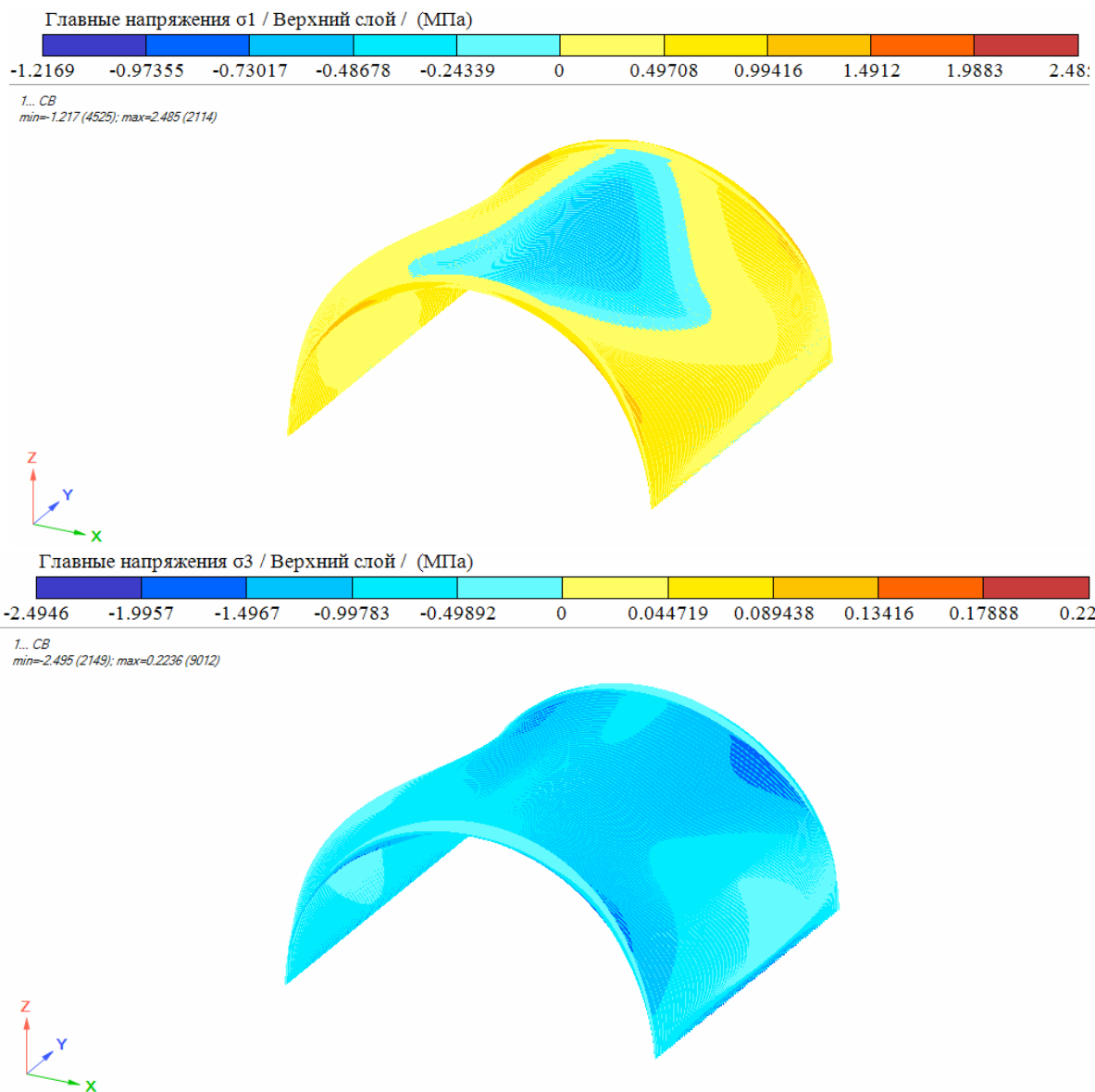
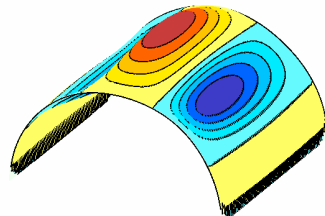
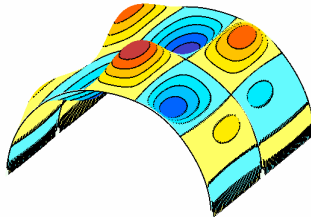
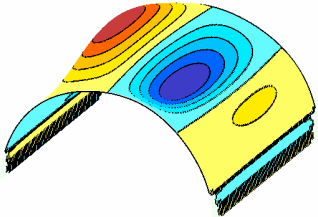
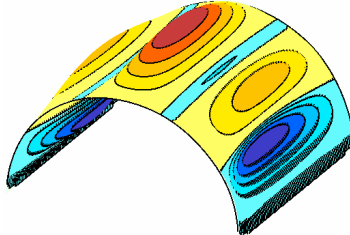
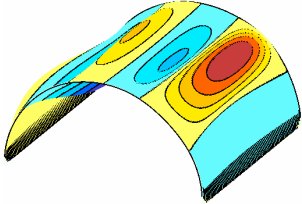
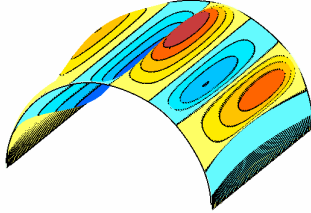
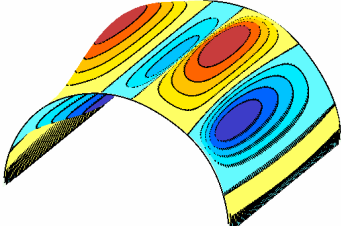
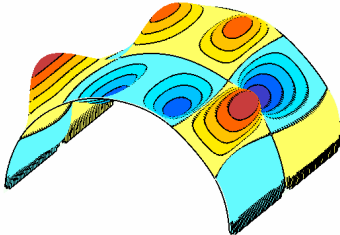
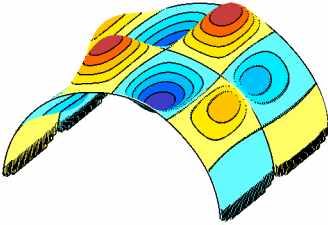
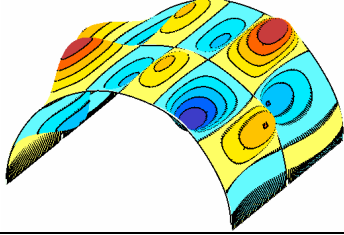


Рис. 6. Изополя главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , МПа

Таблиця 1

Визуалізація форм власних коливань

Форма	Візуалізація	Форма	Візуалізація
1		6	
2		7	
3		8	
4		9	
5		10	

С целью верификации описанной конечно-элементной модели проводили натурный эксперимент, предполагающий определение амплитудно-частотных характеристик рассматриваемой оболочечной системы и сопоставление их с полученными ранее расчетным путем.

Для создания возмущения по конструкции наносили удар резиновым

молотом с «приблизительно» одинаковой силой. Следующая итерация производилась только после полного прекращения колебаний конструкции от предыдущего нагружения.

Измерение амплитудно-частотных характеристик (рис. 7) проводили с помощью двухканального виброанализатора ОНИКС (рис. 8).

Таблиця 2

Амплитудно-частотные характеристики

Форма	Собственное значение	Частота, рад/с	Период, с	Коэффициент распределения	Модальная масса, %	Суммарная модальная масса, %
1	0.000305197	57.241	0.10977	-0.0592322	0.0155363	0.0155363
2	0.000282949	59.449	0.10569	0.0306276	0	0.020411
3	0.000155325	80.238	0.078307	0.0424732	0.0136741	0.0340851
4	0.000128959	88.059	0.071352	0.195334	0.277388	0.311473
5	9.43828E-05	102.93	0.061042	4.29946E-06	0	0.311473
6	9.29274E-05	103.74	0.060569	-2.29884E-05	0	0.311473
7	7.11866E-05	118.52	0.053013	0.835911	3.38754	3.69901
8	6.67174E-05	122.43	0.051322	0.182806	0.276098	3.97511
9	6.28316E-05	126.16	0.049805	-0.000313974	0	3.97511
10	6.19286E-05	127.07	0.049445	-0.000118098	0	3.97511

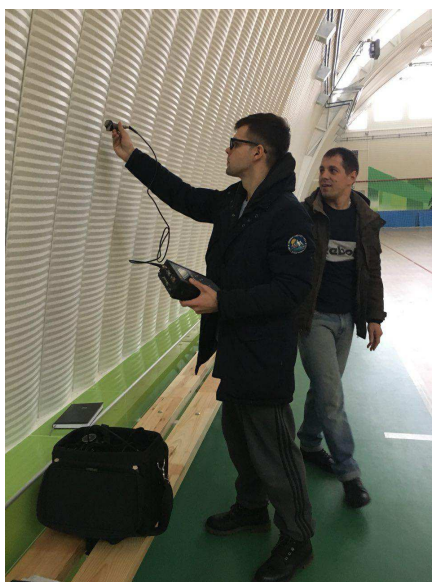


Рис. 7. Фотофиксация проведения эксперимента



Рис. 8. Двухканальный вибронализатор

С помощью указанной аппаратуры были построены графики спектральной

плотности, примеры которых представлены на рис. 9.



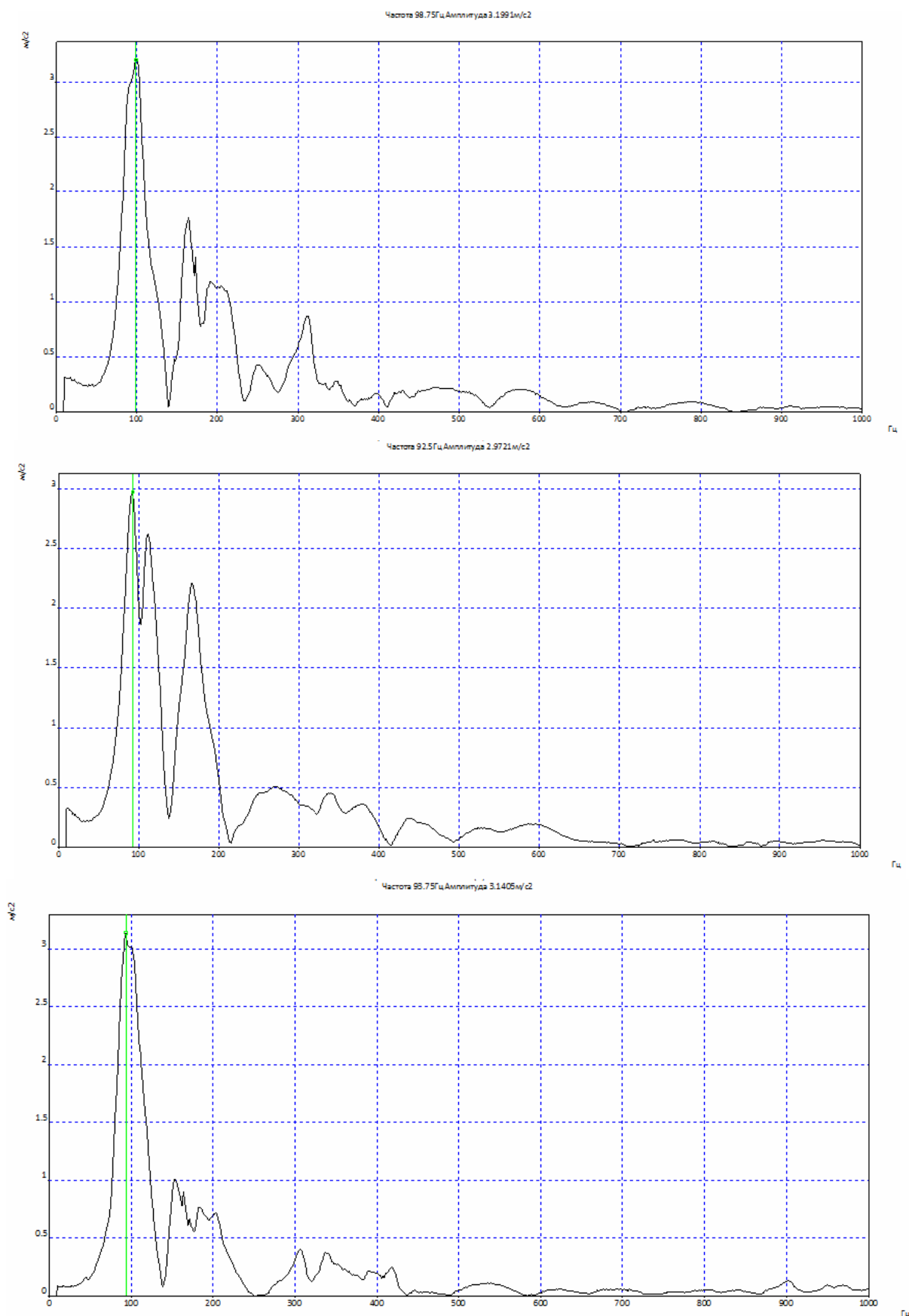


Рис. 9. Графики спектральной плотности

**Выводы.** В данном исследовании проведено численное моделирование специальной оболочечной системы. На базе построенной конечно-элементной модели проведен анализ напряженно-деформированного состояния конструкции, а также определены амплитудно-частотные характеристики и формы собственных колебаний. Конечно-элементная модель верифицирована натурным экспериментом.

Сопоставление результатов эксперимента с расчетной моделью показало, что в целом эксперимент показал удовлетворительную, для инженерных расчетов, точность. Определить частоту основного тона не удалось ввиду малости

прикладываемого возмущения, малого веса, большой жесткости конструкции и ряда других факторов. Однако характер полученных экспериментальным путем данных коррелирует с данными, полученными программным путем.

В дальнейшем для экспериментального определения амплитудно-частотных характеристик конструкции рекомендуется использовать устройство для генерации возмущения постоянной силы с целью его учета в расчетной модели.

В заключении следует отметить, что подобного рода конструкции нуждаются в углубленном изучении для уточнения алгоритмов и методов их расчета.

#### *Список использованных источников*

1. Зильберберг, С. Д. Эффективные хранилища из легких арочных металлических конструкций [Текст] / С. Д. Зильберберг, К. А. Огайка, В. П. Федорова // Пром. Стр-во: ежемесячный науч.-техн. и произв. журн. – М., 1988. – Вып. 11. – С. 21-23.
2. Білик, А. С. Визначення геометричних характеристик холодноформованих тонкостінних аркових профілів [Текст] / А. С. Білик, М. В. Лапонов // Зб. наук. праць. – К. : Укр. ін-т сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського, 2012. – Вип. 9, – С 193-203.
3. Жабинский, А. Н. Моделирование арковых покрытий з тонкостінних холодногнутих профілів / А. Н. Жабинский, А. Ф. Старовойтов // Зб. наук. праць. – Мінськ : Технічне нормування, стандартизація та сертифікація в будівництві, 2012. – Вип. 5. – С. 20-28.
4. Кузнецов, И. Л. Причины обрушения бескаркасного арочного сооружения пролетом 30 м [Текст] / И. Л. Кузнецов, А. В. Исаев, Л. Р. Гимранов // Известия КГАСУ: ежемесячный науч.-техн. журн. – Казань : ФГОУВО КГАСУ, 2011. – Вып. 4, – С 166-171.
5. Арменский, М. Ю. Эффективные хранилища из легких арочных металлических конструкций [Текст] / М. Ю. Арменский, И. И. Ведяков, П. Г. Еремеев // Пром. и гражданское стр-во: ежемесячный науч.-техн. и произв. журн. – М., 2007. – Вып. 3. – С. 16-18.
6. Сталеві конструкції. Норми проектування [Текст] : ДБН В.2.6-198:2014 [Чинний від 01.01.2015]. – К. : ДП «Укрархбудінформ», 2014. – 205 с.
7. Настанова з проектування конструкцій будинків із застосуванням сталевих тонкостінних профілів [Текст] : ДСТУ-Н Б В.2.6-87:2009 [Чинний від 01.08.2010]. – К. : ДП «Укрархбудінформ», 2010. – 55 с.
8. 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» [Текст]. – Тамбов : ООО «Стальпроект», 2012. – 39 с.
9. Городецкий, А. С. Информационные технологии расчёта и проектирования строительных конструкций [Текст] / А. С. Городецкий, В. С. Шмуклер, А. В. Бондарёв. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2003. – 248 с.
10. Моссаковский, В. И. Контактные задачи теории оболочек и стержней [Текст] / В. И. Моссаковский, В. С. Гудрамович, Е. М. Макеев. – М. : Машиностроение, 1978. – 507 с.

11. Eccher G., Rasmussen K.J.R., Zandonini R. Geometric nonlinear isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled structures [Text] // Thin-Walled Structures. – 2009. – Vol. 47. – P. 219–232.

12. Власов, В. З. Избранные труды. Общая теория оболочек [Текст] / В. З. Власов. – М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – Т. 1. – 528 с.

---

---

Резник Петро Аркадійович, канд. техн. наук, старш. викладач Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. E-mail: Petro.Reznik@kname.edu.ua. Тел. +38 (050) 615-86-38.  
Коренев Роман Валерійович, аспірант Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. E-mail: r.v.korr@gmail.com. Тел. +38 (098) 358-99-07.

Резник Петр Аркадиевич, канд. техн. наук, старш. преп. Харьковского национального университета городского хозяйства им. А. Н. Бекетова. E-mail: Petro.Reznik@kname.edu.ua. Тел. +38(050)615-86-38.  
Коренев Роман Валерьевич, аспирант Харьковского национального университета городского хозяйства им. А. Н. Бекетова. E-mail: r.v.korr@gmail.com. Тел. +38(098)358-99-07.

Reznik Petro, PhD, senior lecturer, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.  
E-mail: Petro.Reznik@kname.edu.ua. Tel. +38(050)615-86-38.  
Koreniev Roman, PhD Student, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.  
E-mail: r.v.korr@gmail.com. Tel. +38(098)358-99-07.

Статтю прийнято 22.05.2018 р.