

## Динамический расчёт и анализ полусферической оболочки покрытия объекта «Зимний сад» Технопарка Ростовского государственного строительного университета (РГСУ)

*Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, С.В. Борисов, С.С. Костенко*

*Ростовский государственный строительный университет*

**Аннотация:** в статье рассмотрен динамический расчет полусферических оболочек покрытия каркаса здания «Зимний сад» Технопарка РГСУ. Разработана конечно-элементная модель объекта и выполнен расчет в программном комплексе Лира-сапр. Проведен модальный анализ, который выявил изгибно-крутильные колебания пространственно-стержневой системы, вследствие чего были внесены изменения в конструктивную схему сооружения и произведен перерасчет.

**Ключевые слова:** полусферическая оболочка, каркас, купол, модальный анализ, динамический расчет, спектр частот, формы колебаний, метод конечных элементов.

Рассматриваемый объект «Зимний сад» является частью проекта Технопарка РГСУ и представляет собой ботанический сад-оранжерею с прогулочными галереями и местом для отдыха в зимний период года. Данное сооружение выполнено в виде трех соединенных между собой полусфер радиусами 9 м, 15 м и 12 м. Каркас запроектирован металлическими фермами арочного типа с переменным по длине поперечным трубчатым сечением. В главной полусфере на отметке +7,300 располагается межэтажное перекрытие в форме двенадцатиугольника из пустотных железобетонных плит, опирающихся на балки из двутавров, которые в свою очередь передают нагрузку на железобетонные колонны и фермы [1]. В центральном куполе находится лифт диаметром 1,7 м для подъема на смотровую площадку второго уровня. Мостик из армированного стекла шириной 2,5 м соединяет площадку лифта диаметром 6 м и кольцо перекрытия с внешним и внутренним диаметрами 25,2 м и 16,8 м соответственно. Покрытие «Зимнего сада» выполнено из жестких светопрозрачных поликарбонатных плит.

Экспериментально доказано, что упругая система с распределенными параметрами при гармоническом возбуждении испытывает резонансные

колебания на некоторых явно выраженных характерных частотах [2]. Каждой такой резонансной или собственной частоте соответствует собственная или нормальная форма распределения амплитуд колебаний сооружения. Эти характерные формы прогибов и связанные с ними частоты определяются особенностями самого сооружения, не зависят от внешних нагрузок и являются важными динамическими характеристиками распределения его инерционных и жесткостных свойств [3]. Именно поэтому необходимо определить собственные частоты и периоды колебаний сооружения.

Разработана конечно-элементная модель объекта «Зимний сад» по пространственно-стержневой схеме методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе (ПК) ЛИРА (рис. 1). Для её создания использованы стержневые конечные элементы 10-го типа с 6-ю степенями свободы в узлах. Постоянные нагрузки (собственный вес конструкций, вес перекрытия и покрытия) и кратковременные (снеговая нагрузка и статическая часть ветровой нагрузки) заданы в соответствии со сводом правил (СП) 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия» [4-6].

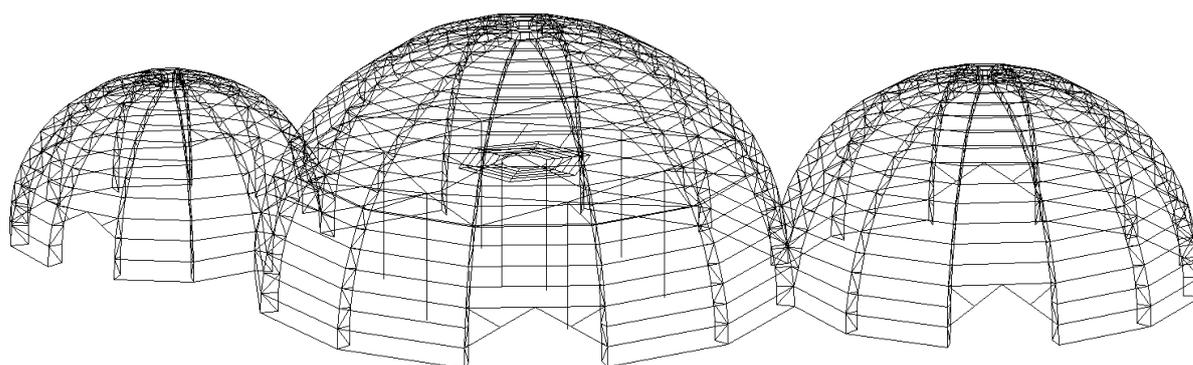


Рис. – 1. Расчётная схема объекта «Зимний сад»

Для корректного анализа собственных колебаний сооружения необходимо знать жесткость конструкций объекта [7]. Изначально был проведен расчет по несущей способности от воздействия постоянных и

временных нагрузок, по итогам которого были определены оптимальные сечения, удовлетворяющие условиям прочности.

Выполнен модальный анализ, в результате которого определены параметры собственных колебаний (таблица №1), а также их формы. Спектр частот системы с бесконечным числом степеней свободы ограничен до десяти форм. В таблице №1 приведены значения частот и периодов колебаний для первых семи форм.

Таблица № 1

Собственные частоты и периоды колебаний

№ формы колебаний	Частоты колебаний, ГЦ	Периоды колебаний, с
1	0.08	14.9063
2	0.36	4.0478
3	1.35	1.2547
4	1.42	1.1872
5	1.99	0.8647
6	2.34	0.7332
7	3.86	0.44181

Анализ полученных результатов показал, что первая форма колебаний является поступательной, вторая форма изгибно-крутильная для каркаса главного купола (рис. 2).

Появление таких форм колебаний конструкции негативно влияет на работу всего здания и может привести к невозможности эксплуатации объекта, поэтому их появление недопустимо [7-8].

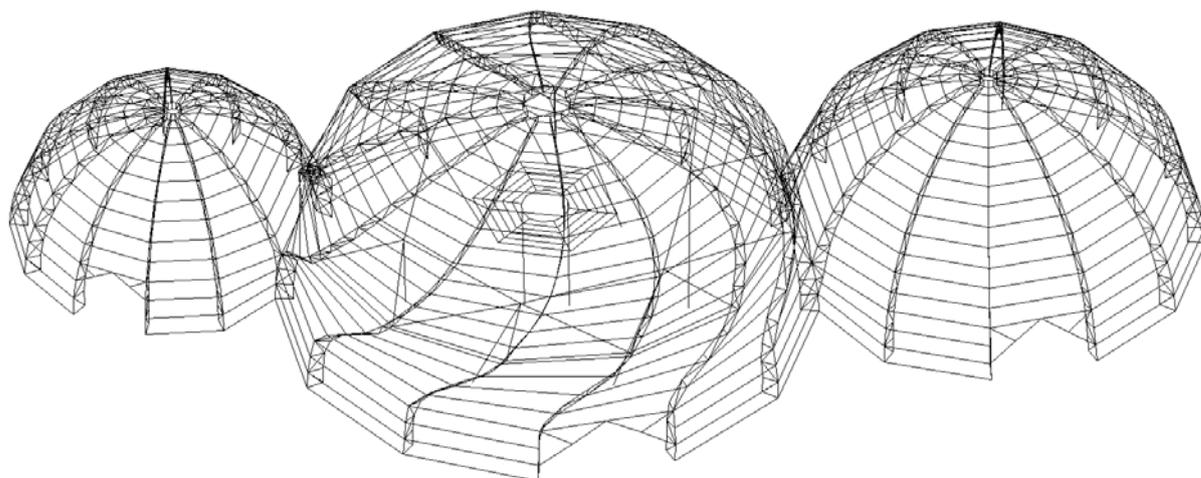


Рис. 2. – Вторая форма колебаний (изгибно-крутильные колебания)

Чтобы избавиться от изгибно-крутильных колебаний, следует изменить конструктивную схему сооружения путем:

- увеличения размеров сечения;
- создания диафрагм жесткости;
- построения дополнительного опорного кольца внутри здания;
- добавления в схему новых связей;
- увеличения жесткости покрытия оболочки.

Конструктивная схема изменена путем увеличения жесткости покрытия. Применен новый вид элемента решетки (рис. 3) [9]

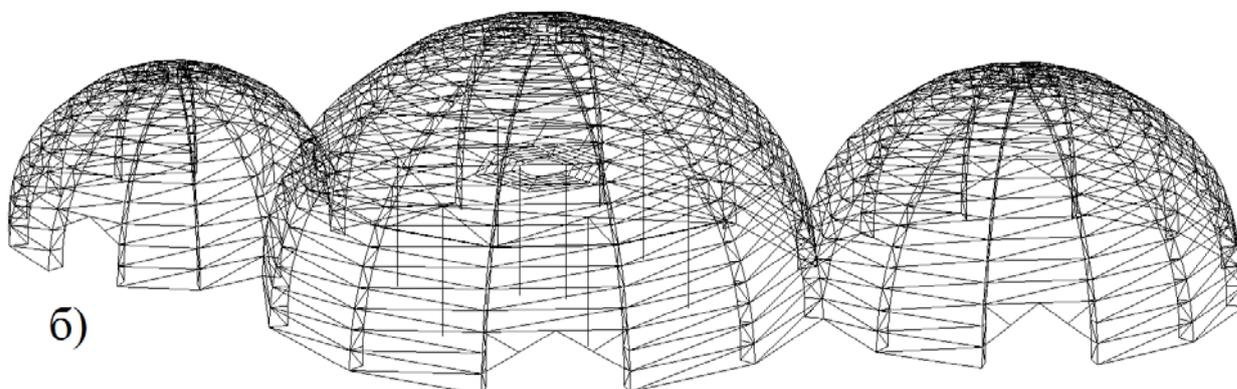


Рис. – 3. а) новый элемент решетки покрытия, б) измененная расчетная схема

Выполненный перерасчёт показал, что первые пять форм колебаний не затрагивают сферические оболочки, а изгибно-крутильные колебания исчезли. Частоты и периоды колебаний представлены в таблице 2. [10]

Таблица № 2

Собственные частоты и периоды колебаний

№ формы колебаний	Частоты колебаний, ГЦ	Периоды колебаний, с
1	0.63	1.6821
2	0.72	1.4687
3	1.65	0.6554
4	2.82	0.3860
5	3.98	0.2738

Выводы:

1. Разработана пространственно-стержневая конечно-элементная модель объекта «Зимний сад».
2. Определена жесткость отдельных конструктивных элементов сооружения.
3. Произведен анализ форм собственных колебаний объекта, определены частоты и периоды колебаний.

Анализ результатов расчета показал, что центральный полусфера объекта имеет собственные крутильно-изгибные колебания, недопустимые для эксплуатации здания [10]. Изменение расчётной схемы путем увеличения жесткости покрытия, позволило избавиться от опасной формы колебаний.

### Литература

1. Кравченко Г.М., Чехачев В.А. Исследование поведения монолитно-каркасного здания в аварийной ситуации // Инновационное развитие современной науки. Материалы международной научно-практической конференции. Уфа, 2015. С. 69-75.



2. Другин С.М., Стручков К.В. Экспериментальное исследование устойчивости сферической оболочки из стеклопластика при динамическом нагружении // Исследования по теории пластин и оболочек, выпуск 6–7, ред. К. З. Галимов. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1970. С. 503–510.

3. Engel H. Structure Systems. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt. 1967. pp. 105-111.

4. Кравченко Г.М, Труфанова Е.В., Костенко Д.С. Исследование характера распределения нагрузок в расчетных схемах МКЭ // Новый университет. Серии: Технические науки. 2015. №1-2 (35-36). С. 118-122.

5. Городецкий Д.А., Барабаш М.С., Водопьянов Р.Ю., Титок В.П., Артамонова А.Е. Программный комплекс Лира-сапр® 2013 Учебное пособие / Под ред. академика РААСН Городецкого А.С. К. М.: Электронное издание, 2013. 376 с.

6. Зотова Е. В., Панасюк Л. Н. Численное моделирование динамических систем с большим числом степеней свободы на импульсные воздействия // Инженерный вестник Дона, 2012, №3 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933/)

7. Кравченко Г.М, Коробкин А.П, Труфанова Е.В Лукьянов В.И. Критерии оценки динамических моделей железобетонного каркаса здания // Science Time. 2014. №12. с. 255-260.

8. Raymond W. Clough, Joseph Penzien. Dynamics of Structures // New York: McGraw-Hill, c1993. pp. 129-133.

9. Кравченко Г.М, Чехачев В.А. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения // Перспективы интеграции науки и практики. 2014. №1. С. 113-117.

10. Зырянов В.В. Методы оценки адекватности результатов моделирования // Инженерный вестник Дона, 2013, №2 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707)

---

## References

1. Kravchenko G.M., Chekhachev V.A. Innovatsionnoe razvitie sovremennoy nauki. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Ufa, 2015. pp. 69-75.
  2. Drugin S.M., Struchkov K.V. Eksperimental'noe issledovanie ustoychivosti sfericheskoy obolochki iz stekloplastika pri dinamicheskom nagruzhenii [Experimental investigation of the stability spherical shell of fiberglass under dynamic loading]. Issledovaniya po teorii plastin i obolochek, vypusk 6–7, red. K. Z. Galimov. Kazan': Izd-vo Kazanskogo un-ta, 1970. pp. 503–510.
  3. Engel H. Structure Systems. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt. 1967. pp. 105-111.
  4. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Kostenko D.S. Novyj universitet. Seriya: Tehnicheskie nauki. 2015. № 1-2 (35-36). p. 123-129.
  5. Gorodeckij D.A., Barabash M.S., Vodop'janov R.Ju., Titok V.P., Artamonova A.E. Programmnyj kompleks lira-sapr® 2013 [The program complex LIRA-cad 2013] Uchebnoe posobie. Pod red. akademika RAASN Gorodeckogo A.S. K. M.: Jelektronnoe izdanie, 2013. 376 p.
  6. Zotova E. V., Panasyuk L. N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №3 URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933/)
  7. Kravchenko G.M., Korobkin A.P., Trufanova E.V., Lukianov V.I. «Jurnal Science Time. Vipusk №12». Kazan, 2014. pp. 256-259.
  8. Raymond W. Clough, Joseph Penzien. Dynamics of Structures. New York: McGraw-Hill, c1993. pp. 129-133.
  9. Kravchenko G.M., Chekhachev V.A. Perspektivy integratsii nauki i praktiki. 2014. №1. pp. 113-117.
  10. Zirianov V. V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013. № 2, URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707).
-