

УДК 624.072.2:624.04

Ундалов А.М. – аспирант

E-mail: alekc-nn@yandex.ru

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 603950, Россия, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65

Исследование напряженно-деформированного состояния радиально-балочного купола с мембранный кровлей

Аннотация

В статье содержится методика и результаты теоретических и экспериментальных исследований НДС конического радиально-балочного купола с треугольными элементами-оболочками. Производится анализ и сравнение результатов, полученных различными методами.

Ключевые слова: купол, мембрана, экспериментальное исследование, напряженно-деформированное состояние.

Купола являются одними из наиболее экономически эффективных строительных конструкций, что наиболее очевидно проявляется, по сравнению с любыми другими жесткими конструкциями, именно в диапазоне больших пролетов [1]. Использование купольных покрытий в общественных и административных зданиях добавляет им архитектурной выразительности и оригинальности, а в промышленных и сельскохозяйственных – улучшает внешний вид массовой застройки.

Одними из наиболее экономически эффективных купольных конструкций являются радиально-балочные купола (рис. 1). Расход стали, приведенный на 1 м², для таких конструкций, в зависимости от снегоударного района, колеблется от 15,38 до 23,75 кг/м², что является сопоставимым с лучшими отечественными решениями. Основной проблемой, ограничивающей применение радиально-балочных куполов, является малое количество исследований, посвященных работе данной конструкции [2, 3, 4, 5]. Причем, эта проблема касается не только радиально-балочных куполов, но также является актуальной для других видов купольных, арочных и мембранных покрытий, поскольку экспериментальные исследования весьма трудоемки, а их общее количество мало, особенно в последнее время [6, 7, 8, 9].

Для радиально-балочных куполов остро стоит целый ряд вопросов, связанных с устойчивостью и деформативностью системы при различных видах загружений и условиях эксплуатации, решение которых может обоснованно расширить область их применения. Для решения обозначенных задач производились теоретические и экспериментальные исследования модели радиально-балочного купола.

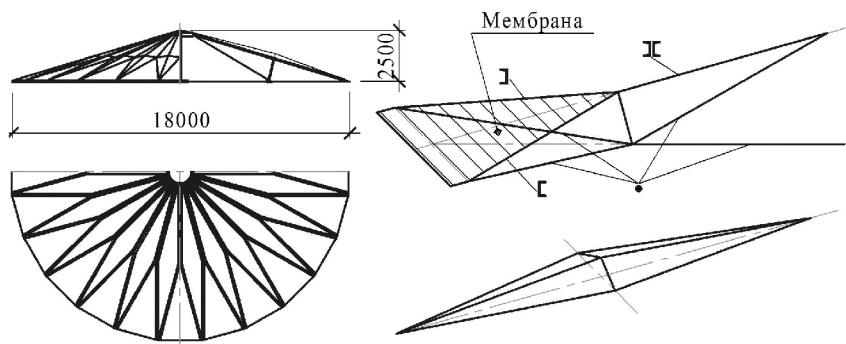


Рис. 1. Купольное покрытие радиально-балочного типа

Исследование модели проводилось в три этапа. На первом этапе определялось напряженно-деформированное состояние элементов купола численными методами, на втором – с помощью физического эксперимента. На третьем этапе производилось сравнение результатов.

Для возможности всестороннего сравнения результатов исследования по различным методикам была использована расчетная модель с полностью идентичными физическими и геометрическими характеристиками и схемой приложения нагрузок, сформированная, во многом, исходя из требований по конструированию физической модели и возможности проведения эксперимента.

Расчетная модель представляет собой три секции радиально-балочного купола, расположенные под углом 120 градусов в плане друг к другу с диаметром 4 м и масштабом к натуре 1:4,5 (диаметр серийного купола 18 м). Секции соединялись между собой горизонтальными гибкими связями. Жесткостные характеристики модельного купола подбирались максимально приближенными к реальной конструкции.

Сечение верхнего пояса принято из квадратной трубы 20x2 по ГОСТ 8639-82 из стали С245 по ГОСТ 27772-88. Стойка-раскос из трубы 15x1,5, гибкие элементы нижнего пояса и раскосы из проволоки Вр-І по ГОСТ 6727-80 диаметром 2,5 мм. В гибких элементах была предусмотрена возможность выравнивания начального натяжения специальным регулировочным устройством. Мембрана-обшивка представляла собой прокат листовой холоднокатаный по ГОСТ 19904-90 (стальной лист) толщиной 0,5 мм из стали С245 по ГОСТ 27772-88. Лист крепился к опорному контуру саморезами с конструктивным шагом 50 мм. Частый шаг саморезов, технология крепления, исключающая черноту в отверстиях, и плотное обжатие листа и профиля минимизировали влияние податливости крепления, что отвечало принятым предпосылкам расчетной модели.

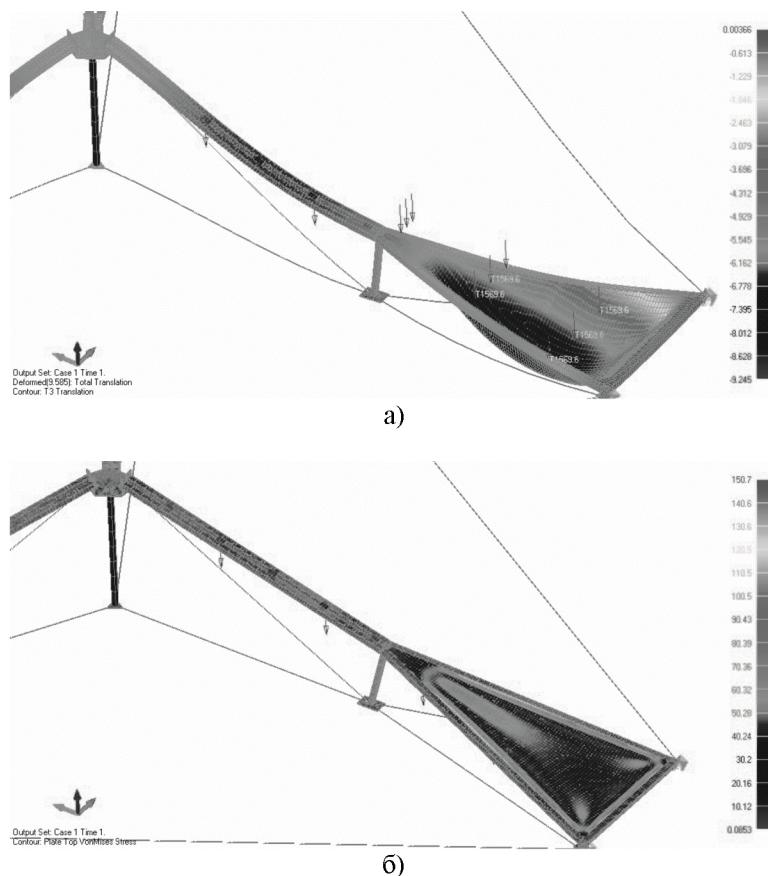


Рис. 2. а) деформации модели, б) эквивалентные напряжения по Мизесу

Величина нагрузки соответствовала VI снеговому району в соответствии с СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-1985*» и равнялась 480 кг/м². Нагрузка приводилась к сосредоточенным силам 20 кгс, исходя из грузовой площади одной секции при действии снеговой равномерно-распределенной нагрузки.

Первым этапом исследования являлось исследование прочности, устойчивости и деформативности купола с использованием программного комплекса «MSC Nastran». При моделировании элементов использовались пластинчатые конечные элементы прямоугольной формы с соотношением сторон не более 2:1.

Важнейшей задачей при исследовании купола является проверка устойчивости, в частности, и, в особенности в геометрически нелинейной постановке. При нелинейном анализе устойчивость и прочность проверяются единовременно, эти проверки взаимосвязаны. Наблюдение за увеличением перемещений при росте нагрузки позволяет выявить как исчерпание прочности, так и потерю устойчивости конструкции.

Нелинейный расчет проводился при упругопластической работе стали, с использованием упрощенной диаграммы Прандля. Модуль упругости задавался равным 206000 МПа, коэффициент Пуассона принимался равным 0.3. Поскольку верхний пояс купола является сжато-изгибаемым элементом, начальные несовершенства, в соответствии с Пособием по проектированию стальных конструкций к СНиП II-23-81*, в связи с малой вероятностью совпадения их максимальных значений с расчетным значением эксцентриситета, не учитывались. Напряженно-деформированное состояние конструкции на последнем этапе загрузки изображено на рис. 2.



а)



б)

Рис. 3. Экспериментальная конструкция а) до испытания, б) последняя ступень нагрузки

На втором этапе производилось экспериментальное изучение НДС конструкции. На рис. 3 изображена экспериментальная конструкция до загружения и на последнем этапе загрузки.

Перед проведением испытания давалась «нулевая» ступень с последующим разгружением до нуля. Целью предварительного этапа нагружения являлось обмятие узлов модели и проверка правильности работы приборов [10]. Нагружение конструкции производилось пятью примерно равными ступенями по 20 % от суммарной расчетной нагрузки. После доведения нагрузки до расчетных значений, для оценки надежности

конструкции, дополнительным этапом давалась нагрузка, в размере примерно 10 % от расчетной. Полный цикл одной ступени нагружения длился примерно 50 мин, в том числе загружение – 5 мин, выдержка после окончания загружения – 15 мин, взятие отсчетов по приборам – 30 мин.

Измерение вертикальных и горизонтальных перемещений конструкции производилось 9-ю прогибомерами системы Максимова 6-ПАО. Измерение относительных деформаций производилось тензометрической станцией ZET 017-T8 с помощью 72-и тензорезисторов 2ПКБ 10.100В по ТУ 2506-1382-78, с базой 10 мм, сопротивлением 100 Ом. Тензорезисторы устанавливались в 6 сечениях в крайних точках сжато-изгибающихся элементов купола, а также на растянутые проволочные элементы. Дополнительно были установлены прямоугольные розетки из тензорезисторов на мембранный элемент для измерения главных напряжений. Схема расположения приборов дана на рис. 4.

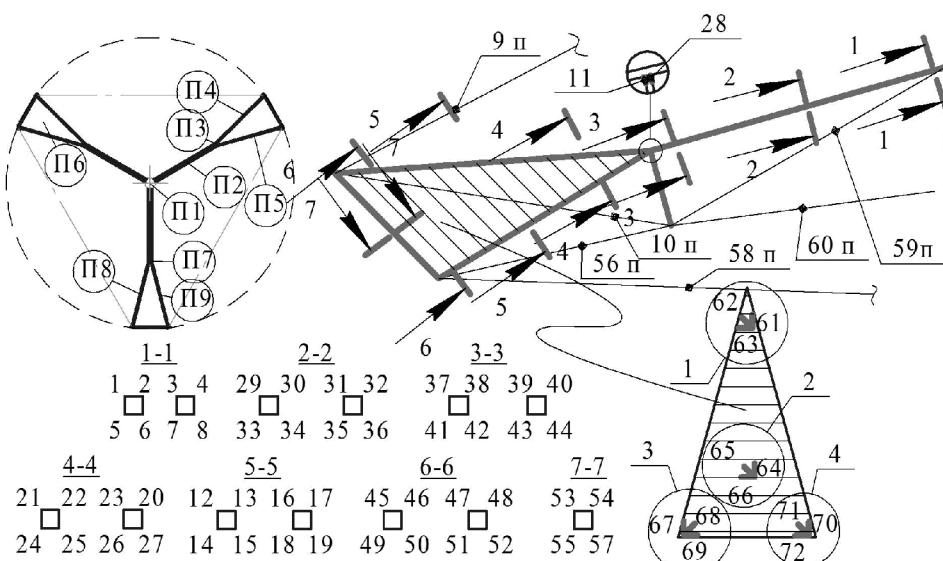


Рис. 4. Схема расположения прогибомеров и тензорезисторов

Таблица 1

Сравнение теоретических и экспериментальных значений перемещений

№ измеряемой точки	Теоретическое значение вертикального перемещения, $s_{\text{теор}}$, мм	Экспериментальное значение вертикального перемещения $s_{\text{экспер}}$, мм	$\frac{s_{\text{теор}}}{s_{\text{экспер}}}$
1	5,63	6,10	0,922
2	7,38	7,66	0,963
3	6,89	7,33	0,939
4	4,47	4,61	0,969
5	4,47	4,55	0,982
6	10,20	11,80	0,864
7	6,89	7,49	0,919
8	4,47	4,96	0,901
9	4,47	5,12	0,873

На последнем этапе полученные в ходе эксперимента величины вертикальных перемещений и напряжений для последнего этапа нагружения сравнивались с теоретическими, определенными методом конечных элементов (табл. 1-2).

Таблица 2
Сравнение теоретических и экспериментальных значений напряжений

$\#$ сечения (зоны)	$\#$ точки	Напряжение, определенное методом конечных элементов $\sigma_{\text{теор}}$, МПа	Напряжение, определенное в ходе физического эксперимента $\sigma_{\text{экспер}}$, МПа	$\frac{\sigma_{\text{теор}}}{\sigma_{\text{экспер}}}$
1-1	1	49,23	52,52	0,937
	2	28,17	32,32	0,872
	3	28,17	28,28	0,996
	4	49,23	52,52	0,937
	5	-66,61	-68,68	0,970
	6	-50,13	-52,52	0,954
	7	-66,61	-72,72	0,916
	8	-50,13	-56,56	0,886
2-2	29	-36,95	-40,40	0,915
	30	-45,70	-48,48	0,943
	31	-45,70	-48,48	0,943
	32	-36,95	-40,40	0,915
	33	17,40	20,20	0,861
	34	22,94	24,24	0,946
	35	22,94	24,24	0,946
	36	17,40	24,24	0,718
3-3	37	-7,07	-4,04	1,750
	38	-6,67	-4,04	1,651
	39	-6,67	-8,08	0,825
	40	-7,07	-8,08	0,875
	41	-15,62	-16,16	0,967
	42	-19,27	-20,20	0,954
	43	-19,27	-28,28	0,681
	44	-15,62	-20,20	0,773
4-4	20	-9,86	-12,12	0,814
	21	-9,86	-16,16	0,610
	22	-4,56	0	-
	23	-4,56	0	-
	24	-18,01	-20,20	0,892
	25	-20,15	-20,20	0,998
	26	-20,15	-24,24	0,831
	27	-18,01	-24,24	0,743
5-5	12	-48,09	-52,52	0,916
	13	-39,94	-44,44	0,899
	14	14,50	16,16	0,897
	15	21,35	24,24	0,881
	16	-39,94	-40,40	0,989
	17	-48,09	-52,52	0,916
	18	21,35	24,24	0,881
	19	14,50	20,20	0,718
6-6	45	4,96	0	-
	46	-13,88	-16,16	0,859
	47	-13,88	-16,16	0,859

Продолжение таблицы 2

	48	4,96	4,04	1,228
	49	-59,72	-64,64	0,924
	50	13,59	16,16	0,841
	51	13,59	16,16	0,841
	52	-59,72	-68,68	0,870
7-7	53	-20,98	-24,24	0,866
	54	-28,70	-32,32	0,888
	55	31,87	36,36	0,877
	57	24,69	28,28	0,873
	9	161,29	165,64	0,974
	10	169,11	177,76	0,951
	11	-16,32	-20,20	0,808
	28	5,11	4,04	1,265
	56	169,11	177,76	0,951
	58	161,29	166,00	0,972
	59	205,27	210,08	0,977
	60	116,53	121,20	0,961
1	y_{\max}	103,17	105,04	0,982
	y_{\min}	40,31	40,40	0,998
2	y_{\max}	45,40	48,48	0,936
	y_{\min}	35,01	40,40	0,867
3	y_{\max}	78,89	84,84	0,930
	y_{\min}	33,71	36,36	0,927
4	y_{\max}	78,89	84,84	0,930
	y_{\min}	33,71	40,40	0,834

Выводы

1. Различие теоретических и экспериментальных значений напряжений и перемещений составило не более 10-15 %, что позволяет сделать вывод о корректной работе вычислительного комплекса, достоверности результатов экспериментальных исследований и правильности принятых гипотез и предпосылок, адекватно отражающую реальную работу конструкции

2. Экспериментальное перемещение в центре купола оказалось больше теоретического на 7,8 %. Уровень напряжений в точках оказался выше при экспериментальном исследовании конструкции, по сравнению с теоретическим, в среднем на 8-10 %. Незначительное различие значений объясняется влиянием факторов второго порядка: податливости соединений, начальных несовершенств элементов и их узлов, точности приложения нагрузки, чувствительностью приборов.

3. В точках с минимальными значениями напряжений появляются расхождения между расчетными и экспериментальными величинами в пределах 20-75 %. Это связано с ограниченной чувствительностью тензометрической станции и параметров используемых тензорезисторов.

Список библиографических ссылок

- Тур В.И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 96 с.
- Молев И.В., Конструктивные разработки, экспериментально-теоретические исследования и внедрения стальных куполов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Пенза, 1996. – 34 с.
- Молев И.В., Ундалов А.М. Экспериментальное исследование напряженно-

- деформированного состояния треугольной мембранны радиально-балочного купола // Приволжский научный журнал, 2015, № 2. – С. 49-57.
4. Молев И.В., Ундалов А.М. Исследование напряженно-деформированного состояния радиально-балочного купола // Труды конгресса 16-го международного научно-промышленного форума «Великие реки» 13-16 мая 2014 года. – Н.Новгород, Т. 1. – С. 235-238.
 5. Молев И.В., Ундалов А.М. Исследование напряженно-деформированного состояния треугольной мембранны панели радиально-балочного купола // Труды конгресса 15-го международного научно-промышленного форума «Великие реки» 15-18 мая 2013 года. – Н.Новгород, Т. 1. – С. 167-170.
 6. Тур А.В. Совершенствование узловых соединений сетчатых куполов из тонкостенных холодногнутых профилей: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Казань, 2013. – 20 с.
 7. Клиньшов И.В., Колесов А.И., Ямбаев И.А., Жданов В.А. Экспериментальное исследование несущей способности квадратной в плане однослойной сетчатой выпуклой оболочки двоякой кривизны из тонколистовых гнутых профилей // Приволжский научный журнал, 2014, № 4. – С. 100-107.
 8. Киселев Д.Б. Комбинированные арочные системы. Экспериментальное исследование модели // Строительная механика и расчет сооружений, 2006, № 2. – С. 46-52.
 9. Фарфель М.И. Экспериментальное исследование модели двускатного блока из мембранных панелей // Строительная механика и расчет сооружений, 2006, № 2. – С. 53-57.
 10. Землянский А.А. Обследование и испытание зданий и сооружений. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 240 с.

Undalov A.M. – post-graduate student

E-mail: alekc-nn@yandex.ru

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

The organization address: 603950, Russia, Nizhny Novgorod, Il'inskaya st., 65

Investigation of the stress-strain state of radial beam dome with a membrane roof

Resume

In this paper, a comparison of theoretical and experimental research results stress-strain state tapered radial beam dome with triangular elements shells.

The study model carried out in three stages. In the first phase was determined the stress-strain state of the elements of the dome numerical method using software package «MSC Nastran». In the second phase voltage in the elements of the dome were measured experimentally using a strain gauge station ZET 017-T8 using strain gages 72 and 2PKB 10.100V TU 2506-1382-78, with a base of 10 mm, 100 ohm, and deformations of points - deflectometer system Maximov 6-PAO. At the final third stage comparison of the results determining the stress-strain state element.

The difference of the theoretical and experimental values of stress and strain was not more than 10-15 %, due to the compliance of the compounds, the initial geometric imperfections, the sensitivity of the instrument.

At points with a minimum value of the voltage differences appear between the calculated and experimental values in the range of 20-75 %. This is due to the limited sensitivity of the strain gauge station and a certain scale interval instruments

Conclusions about the correct operation of the computing system, the reliability of the experimental results and the correctness of the hypotheses and assumptions to reflect adequately the real work construction.

Keywords: dome, membrane, experimental study, the stress-strain state.

Reference list

1. Tour V.I. Dome design: shaping, calculation, design, efficiency. – M.: Publishers ASV, 2004.
2. Molev I.V. Structural design, experimental-theoretical study and implementation of steel domes: Abstract of dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. – Penza, 1996. – 34 p.
3. Molev I.V., Undalov A.M. Experimental study of stress-strain state of the triangular membrane radial beam dome // Privilzhsky nauchniy zhurnal, 2015, № 2. – P. 49-57.
4. Molev I.V., Undalov A.M. A study of stress-strain state of the radial beam dome // Proceedings of the 16th Congress of the International Scientific and Industrial Forum «Great Rivers» May 13-16, 2014. – Nizhny Novgorod, Vol. 1. – P. 235-238.
5. Molev I.V., Undalov A.M. A study of stress-strain state of the triangular membrane panel radial beam dome // Proceedings of the 15th Congress of the International Scientific and Industrial Forum «Great Rivers» May 15-18, 2013. – Nizhny Novgorod, Vol. 1. – P. 167-170.
6. Tour A.V. Improving junctions mesh domes of thin-walled cold-formed profiles: Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences. – Kazan, 2013. – 20 p.
7. Klinshov I.V., Kolesov A.I., Yambaev I.A., Zhdanov V.A. Experimental study the carrying capacity of a square in terms of a single-layer mesh convex hull of the double curvature of the thin sheet formed sections // Privilzhsky nauchniy zhurnal, 2014, № 4. – P. 100-107.
8. Kiselev D.B. Combined arched system. Experimental study of model // Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy, 2006, № 2. – P. 46-52.
9. Farfel M.I. Experimental study of the gable block model of membrane panels // Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy, 2006, № 2. – P. 53-57.
10. Zemlyansky A.A. Inspection and testing of buildings and constructions. – M.: Publishers ASV, 2004. – 240 p.