

Испытание модели стальной цилиндрической сетчатой оболочки

А.И. Сиянов, Д.К. Ярошевич

Лысьвенский филиал «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Лысьва

Аннотация: Найдено оптимальное соотношение геометрических параметров с учетом рационального распределения усилий по поверхности и минимального изменения формы цилиндрической сетчатой оболочки. В рамках увеличения габаритных размеров для определения несущей способности конструкции составлена программа исследований, сконструирована экспериментальная установка и проведены испытания на физической модели. По результатам выполненных исследований определены необходимые параметры напряженно-деформированного состояния оболочки. Проверена эффективность способов опорного подкрепления системы затяжками и горизонтальными фермами. Установлены закономерности поведения оболочки в условиях полного и одностороннего приложения нагрузок. Исследовано влияние способов подкрепления на общее состояние сетчатой поверхности. Определена степень разгрузки стержневой системы в случае использования горизонтальных ферм и установлено существенное увеличение несущей способности конструкции вследствие применения затяжек в опорной зоне.

Ключевые слова: цилиндрическая сетчатая оболочка, геометрический параметр, элемент подкрепления, затяжка, горизонтальная ферма.

Введение

Исследование стальных сетчатых оболочек уже несколько десятилетий объясняется расширением сферы их рационального использования в качестве конструкций покрытия зданий и сооружений [1–3]. Особый интерес вызывает случай размещения системы на квадратном, прямоугольном или сложном плане [4]. Проекты таких конструкций и их реализация широко распространены и известны во всем мире [5, 6].

Сейчас не составляет большого труда выполнить с помощью компьютера построение модели любой поверхности [7], задать материал, обеспечить требуемые условия закрепления и приложить нагрузки [8].

Путем анализа результатов моделирования и расчета можно получить качественную и количественную оценку напряженно-деформированного состояния конструкции [9, 10]. Однако для определения действительной работы круговой сетчатой поверхности потребовалось произвести испытания с использованием физической модели.

Испытательная установка

Все необходимые эксперименты проведены с цилиндрической сетчатой оболочкой, которая располагалась на специально изготовленной опорной стальной раме, установленной в помещении испытательной лаборатории с применением силового пола. Размеры опорной рамы в плане приняты 1,8 м × 2,4 м, причем ее высота составила 1,2 м. Конструкция запроектирована из сваренных между собой уголков № 5 с образованием прямоугольного контура и одиночных опорных стоек, запроектированных из уголков № 6,3 и расположенных с шагом 0,9 м и 1,2 м.

Приборы размещены на 4-х П-образных рамах из аналогичных уголков № 6,3, которые с помощью сварки соединены в единый пространственный блок двумя рядами стержней круглого сечения.

Нагрузка прикладывалась поэтапно снизу к узлам модели оболочки. Испытания конструкции проведены с полным и односторонним приложением нагрузки. Причем максимальное значение на узел составило 1 кН. Установка для испытания модели оболочки с приборами показана на рис. 1 и 2.

Подготовительный этап

Работы по подготовке к испытаниям включали: 1) изготовление модели оболочки; 2) включение в модель тросовых затяжек; 3) изготовление и включение в модель горизонтальных ферм. Процесс введения в работу затяжек предусматривал установку трех стальных тросов. Контроль натяжения тросов осуществлялся винтовыми муфтами с обязательной фиксацией проектного положения контргайками. Следующее подкрепление модели обеспечивалось двумя горизонтальными фермами, жестко соединенными к нижним опорным граням. Проектное положение горизонтальных ферм в конструкции модели обеспечивалось стальными подвесками из арматурной стали.

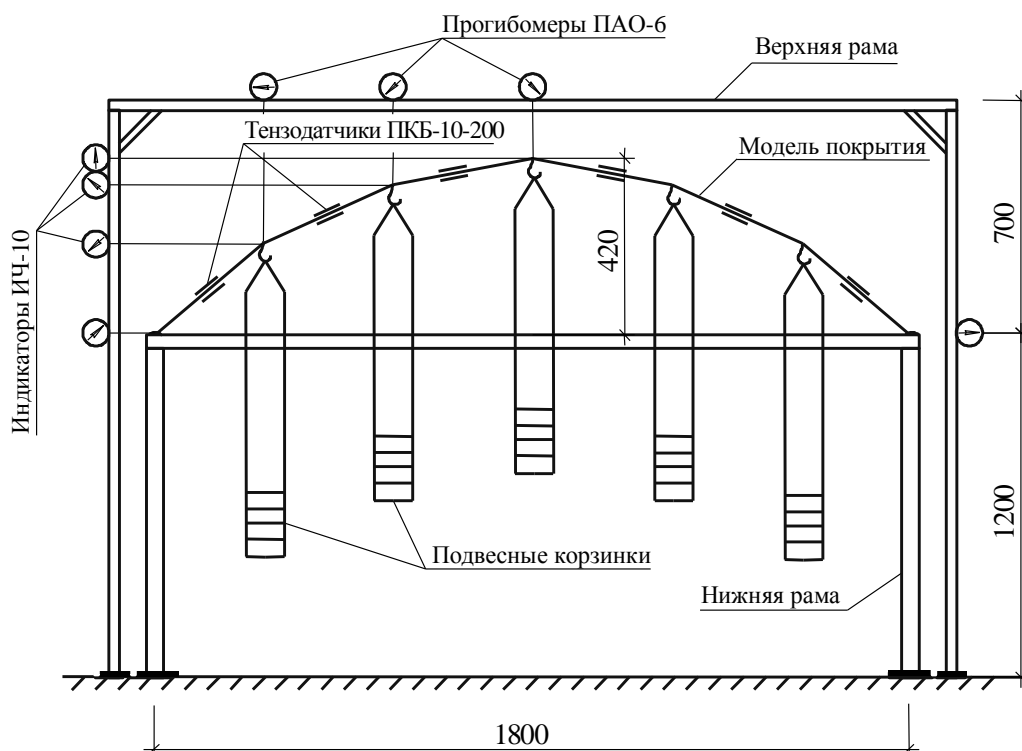


Рис. 1. Экспериментальная установка для испытания модели

Постановка задачи

По результатам экспериментальных исследований требовалось получить закономерности распределения напряжений и деформаций по поверхности модели цилиндрической сетчатой оболочки в зависимости от схемы приложения нагрузки и элементов подкрепления. В процессе исследований определялись опасные зоны концентрации напряжений и перемещений по всей сетчатой поверхности, и выявлялась рациональная конструктивная схема оболочки.

Модель оболочки

Размеры сетки в плане приняты $2,4 \text{ м} \times 1,8 \text{ м}$. Грани располагались на цилиндрической поверхности по дуге окружности и имели одинаковый размер. Их запроектировано 6 шт., причем число панелей в каждой грани принято 8. В результате между продольными и диагональными элементами получен угол $47^{\circ}37'$. Высота оболочки составила $0,42 \text{ м}$.

а)



б)



Рис. 2. Вид экспериментальной установки: а – сбоку; б – с торца

Стержни, расположенные в продольном направлении, выполнены неразрезными, к ним с помощью листовой стали толщиной 4 мм присоединены поперечные и диагональные элементы. Модель оболочки сконструирована из стержней трубчатого сечения 21 мм × 1,5 мм, в качестве

материала для элементов выбрана сталь класса С245.

Для подкрепления конструкции использованы затяжки ($R_y=720$ МПа) и горизонтальные фермы ($R_y=240$ МПа), причем каждая горизонтальная ферма удерживалась в проектном положении пятью подвесками, с помощью которых равномерно через каждые две панели по длине жестко соединялась с конструкцией модели (рис. 3).

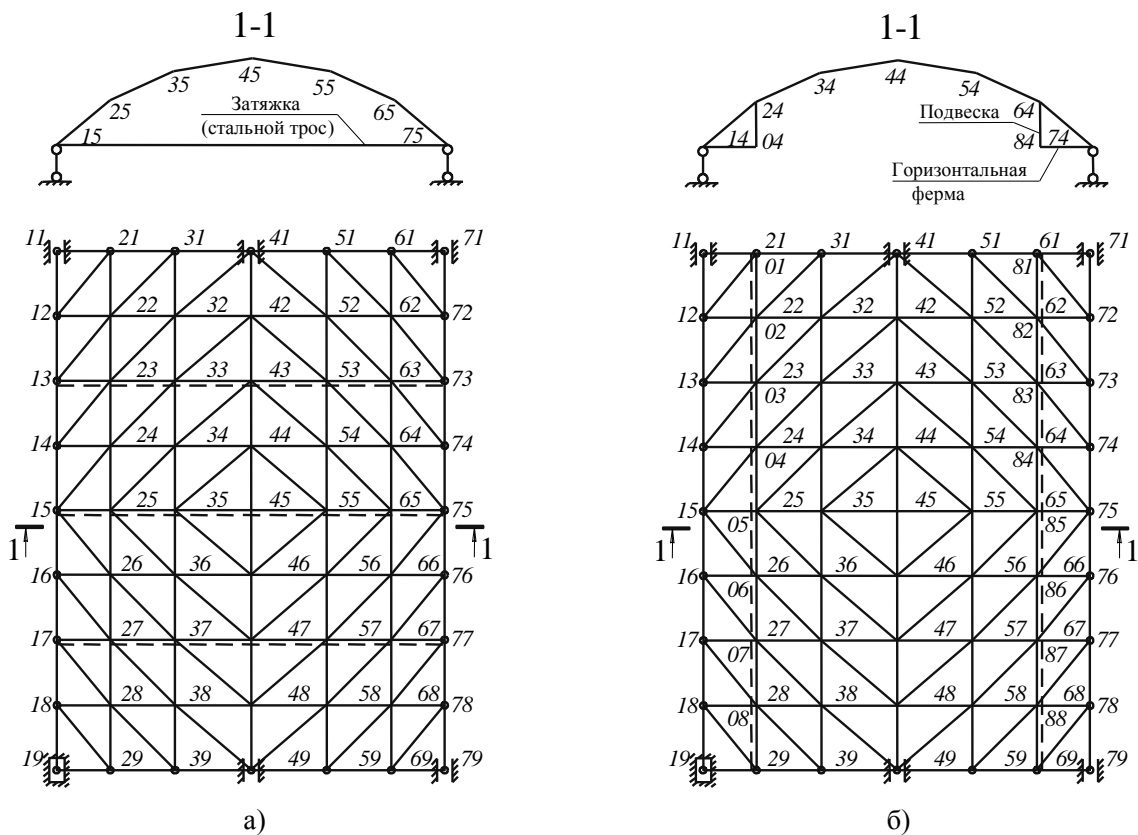


Рис. 3. Схемы введения в состав модели: а) затяжек; б) опорных горизонтальных ферм с подвесками

Затяжки и подвески выполнены из тросов диаметром 6 мм. Трубчатые стержни опорных ферм приняты из того же сечения, что и сама оболочка.

Результаты исследований

Проведенные испытания и дальнейшая обработка показаний приборов позволили выявить опасные участки и закономерности напряженно-деформированного состояния конструкции.

В табл. 1 и 2 приведены наибольшие значения внутренних силовых факторов и параметров деформирования.

Таблица 1

Максимальные усилия в элементах оболочки

Тип системы	Максимальные усилия N_{max} , Н			
	растяжения (+)		сжатия (-)	
начальная	38	44*	43	50*
с затяжками	25	30*	27	29*
с горизонтальными фермами	35	43*	37	41*

* величины усилий, определенные при одностороннем приложении нагрузки

Таблица 2

Максимальные перемещения узлов оболочки

Тип системы	Максимальные перемещения δ_{max} , мм			
	горизонтальные (\rightarrow)		вертикальные (\downarrow)	
начальная	2,06	2,94*	3,80	7,28*
с затяжками	0,23	–	2,60	3,37*
с горизонтальными фермами	0,93	1,58*	3,41	3,89*

* величины перемещений, определенные при одностороннем приложении нагрузки

На основании анализа полученных результатов (табл. 1 и 2), видно, что наибольшие показатели выявлены при одностороннем приложении нагрузки. Причем зоны концентрации внутренних силовых факторов и параметров деформирования для каждой системы разные.

В частности, в модели с затяжками, максимальные растягивающие напряжения зафиксированы в диагональных элементах, а наибольшие сжимающие напряжения выявлены в стержнях поперечного направления. Причем в начальной оболочке и в системе с горизонтальными фермами максимальные напряжения растяжения и сжатия зафиксированы только в продольных элементах.

При оценке распределения напряжений по сетчатой поверхности в верхней зоне модели с затяжками сократилось количество сжатых элементов

поперечного направления. Кроме того, в четвертях и в средней зоне большинство стержней, расположенных вдоль длины оболочки изменили свой знак на противоположный. Следует также отметить, что по всей сетчатой поверхности значения сжимающих напряжений по сравнению с начальной моделью уменьшились в 1,5...2,4 раза.

Введение горизонтальных ферм с подвесками практически не оказало сильного влияния на уменьшение количества сжатых элементов. Свой знак изменили только крайние продольные стержни в верхней зоне. Значения сжимающих напряжений снизились по сравнению с начальной оболочкой в 1,3...1,7 раза.

Проанализировано также изменение геометрии модели в результате проведения испытаний. Выявлено, что при заданных схемах приложения нагрузки, оболочка работает в зависимости от конструктивного решения и деформируется по-разному.

В частности, в модели с затяжками за счет крепления тросов в местах контакта с опорными элементами, конструкция не изменяет свою форму. Здесь максимальные горизонтальные перемещения зафиксированы в верхней зоне. Причем в начальной оболочке и в системе с бортовыми элементами наибольшие перемещения выявлены только на опорах.

В другом направлении изменение геометрии модели сильно зависело от схемы расположения внешних сил на сетчатой поверхности. При полном приложении нагрузки максимальные вертикальные перемещения выявлены в верхней зоне. Однако, при расположении сил на одной стороне оболочки, введение горизонтальных ферм привело к наибольшим перемещениям в коньковой зоне, в начальной конструкции и в модели с затяжками максимальные значения зафиксированы в нижних опорных гранях системы.

Тем не менее, все выявленные максимальные перемещения заметно уменьшились по сравнению с обычной конструкцией. За счет использования

дополнительных элементов достигнуто существенное увеличение жесткости оболочки. Решающую роль в сохранении геометрии модели оказали затяжки, с помощью которых перемещения по сравнению с начальной системой снизились в среднем в 5,5 раза. В значительно меньшей степени сопротивлялись деформированию конструкции опорные горизонтальные фермы, однако их введение все же уменьшило перемещения в 1,6 раза.

Выводы

1. В результате проведенных экспериментальных испытаний модели цилиндрической сетчатой оболочки выявлены закономерности распределения напряжений и перемещений для возможных конструктивных решений и схем приложения нагрузок.

2. Проверены на модели варианты подкрепления оболочки отдельными горизонтальными фермами и затяжками и определено их влияние на параметры напряженно-деформированного состояния конструкции.

3. Зафиксировано позитивное изменение максимальных показателей при использовании дополнительных опорных конструктивных элементов. Выявлено существенное снижение напряжений и перемещений и равномерное распределение их по поверхности при введении в систему стальных тросовых затяжек.

4. Определены параметры работы модели при полном и одностороннем приложении нагрузки. Получены максимальные значения при расположении силового давления по всей сетчатой поверхности и на одной ее стороне. Установлены общие закономерности изменения напряжений для заданных схем внешних воздействий. Зафиксированы особенности деформирования модели от нагрузок.

Литература

1. Zhou H., Zhang Y., Fu F., Wu J. Collapse mechanism of single-layer cylindrical latticed shell under severe earthquake // *Materials*. 2020. Vol. 13 (11). URL: preprints.org/manuscript/202005.0012/v1.
 2. MERO / ION Orchard // Project Details. MERO ASIA PACIFIC URL: mero.com.sg/project_references/ion-orchard.
 3. Ma H., Fan F., Wen P., Zhang H., Shen S. Experimental and numerical studies on a single-layer cylindrical reticulated shell with semi-rigid joints // *Thin-Walled Structures*. 2015. Vol. 86. pp 1–9.
 4. Rynkovskaya M., Simo D. Cylindrical surfaces for social significant architectural projects in Cameroon // 3rd International Scientific Conference “MoNGeometrija 2012”. P. 487-498.
 5. Great Court at the British Museum // Foster and Partners, 2000 URL: fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/.
 6. Шумейко В.И., Кудинов О.А. Об особенностях проектирования уникальных, большепролетных и высотных зданий и сооружений // *Инженерный вестник Дона*, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164.
 7. Краснобаев И.А., Маяцкая И.А., Аарон Икуру Годфрей. Прочностной расчет блока составной конструкции из шестиугольной пластины, круговой цилиндрической оболочки и отбортовки // *Инженерный вестник Дона*, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1667.
 8. Siyanov A. I., Rynkovskaya M. I., Abu Mahadi M. I., Mathieu G. O. Improving the performance parameters of metal cylindrical grid shell structures // *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2017. №7S. pp. 365-376.
 9. ЛИРА СЕРВИС URL: rflira.ru/services/objects/474/.
 10. Сиянов А.И., Ярошевич Д.К. Обоснование методологии расчета цилиндрической сетчатой оболочки // *Инженерный вестник Дона*, 2021, №12 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7319.
-

References

1. Zhou H., Zhang Y., Fu F., Wu J. *Materials*. 2020. Volume. 13 (11) URL: preprints.org/manuscript/202005.0012/v1.
2. MERO / ION Orchard [Project Details. MERO ASIA PACIFIC] URL: mero.com.sg/project_references/ion-orchard (accessed 12/08/22).
3. Ma H., Fan F., Wen P., Zhang H., Shen S. *Thin-Walled Structures*. 2015. Vol. 86. pp. 1-9.
4. Rynkovskaya M., Simo D. Cylindrical surfaces for social significant architectural projects in Cameroon “3rd International Scientific Conference”: (Proc. Conference “MoNGeometrija 2012”), 2012, pp. 487-498.
5. Great Court at the British Museum [Foster and Partners] URL: fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/ (accessed 12/08/22).
6. Shumeyko V.I., Kudinov O.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164.
7. Krasnobaev I.A., Mayatskaya I.A., Aaron Ikuru Godfrey. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1667.
8. Siyanov A. I., Rynkovskaya M. I., Abu Mahadi M. I., Mathieu G. O. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2017. №7S. pp. 365-376.
9. LIRA SERVIS URL: rflira.ru/services/objects/474/ (accessed 12/08/22).
10. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2021, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7319.