

## 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.

---



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).

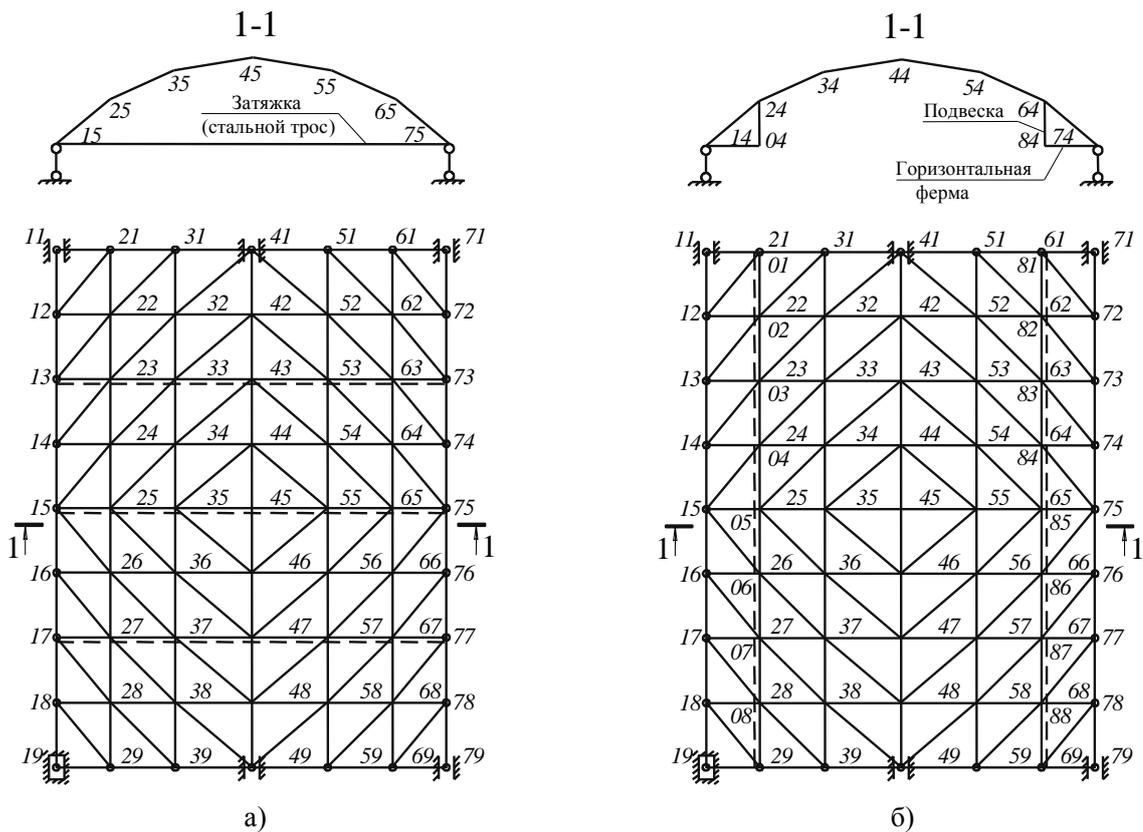


Рис. 3. Схемы введения в состав модели: а) затяжек; б) опорных горизонтальных ферм с подвесками

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 $\delta_{\max}$ , 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](https://preprints.org/manuscript/202005.0012/v1).
  2. MERO / ION Orchard // Project Details. MERO ASIA PACIFIC URL: [mero.com.sg/project\\_references/ion-orchard](http://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/](http://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](http://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](http://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/](http://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](http://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](https://preprints.org/manuscript/202005.0012/v1).
2. MERO / ION Orchard [Project Details. MERO ASIA PACIFIC] URL: [mero.com.sg/project\\_references/ion-orchard](https://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/](https://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](https://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](https://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/](https://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](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7319).