

## Моделирование цилиндрических стержневых покрытий с бортовыми элементами

*А.И. Сиянов, А.С. Осипов*

*Лысьвенский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Лысьва*

**Аннотация:** В рамках работы проведено конечно-элементное моделирование и выполнены численные исследования однослойных цилиндрических стержневых покрытий. Введены горизонтальные грани и определено влияние бортовых элементов на показатели напряженно-деформированного состояния конструкции. Установлена степень изменения усилий и перемещения узлов. Проанализированы особенности работы покрытия и выявлены опасные участки с максимальными показателями. Анализ введения горизонтальных граней выполнен путем сравнения полученных закономерностей. Достигнуто позитивное перераспределение усилий по поверхности и обеспечено уменьшение перемещений характерных узлов. Предусмотрено пространство для проводки инженерных коммуникаций.

**Ключевые слова:** цилиндрические стержневые покрытия, горизонтальные грани, бортовые элементы, усилия, перемещения.

### Введение

Однослойные цилиндрические стержневые покрытия при увеличении геометрических параметров [1] требуют включения в работу элементов подкрепления. Их можно применять на этапе моделирования в качестве конструктивного способа повышения эксплуатационных свойств пространственных конструкций.

Проведенный анализ публикаций показал отсутствие достоверных материалов по итогам ранее проведенных исследований [2]. Как правило, предлагались варианты подкрепления [3, 4], но мало внимания уделялось исследованиям состояния конструкций.

Известно, что в местах крепления покрытий возникают существенные концентрации напряжений [5, 6]. Их можно снизить за счет использования подкрепляющих элементов. Одним из практических конструктивных решений является применение горизонтальных бортовых элементов [7, 8], состоящих из дополнительных граней и подвесок.

## Цель и задачи исследований

Основываясь на исследованиях в сфере теории оболочек [9] поставлена цель – определить влияние горизонтальных элементов на величину факторов напряженно-деформированного состояния, степень изменения усилий и перемещений узлов покрытия. Благодаря использованию программного обеспечения проведено конечно-элементное моделирование и выполнены численные исследования указанных конструкций.

## Введение горизонтальных граней

Анализируя участки стержневой системы [10], принято решение ввести в состав покрытия две горизонтальные грани, каждая из которых содержала единое ребро с нижней опорной частью. С помощью подвесок грани фиксировались в узлах и через каждые две панели по длине жестко соединялись с конструкцией покрытия. Благодаря такому решению выделено пространство для проводки инженерных коммуникаций. Элементы подкрепления приняты из того же материала и профиля, что и покрытие.

## Результаты исследований

Исследования проведены на конкретных конечно-элементных моделях с заданными граничными условиями и характеристиками жесткости. Основные параметры конструкции представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели покрытия

| Размеры<br>в плане<br>$B \times L$ , м | Стрела<br>подъема<br>$f$ , м | Размеры<br>ячейки<br>$a$ , м | Угол<br>описанной<br>окружности<br>$\alpha$ , в градусах | Радиус<br>кривизны<br>$R$ , м | Сталь |
|--|------------------------------|------------------------------|--|-------------------------------|-------|
| 24×28,56                               | 6,87                         | 2,38                         | 120  | 13,9                          | C245  |

Полученная модель с элементами подкрепления показана на рис. 1.

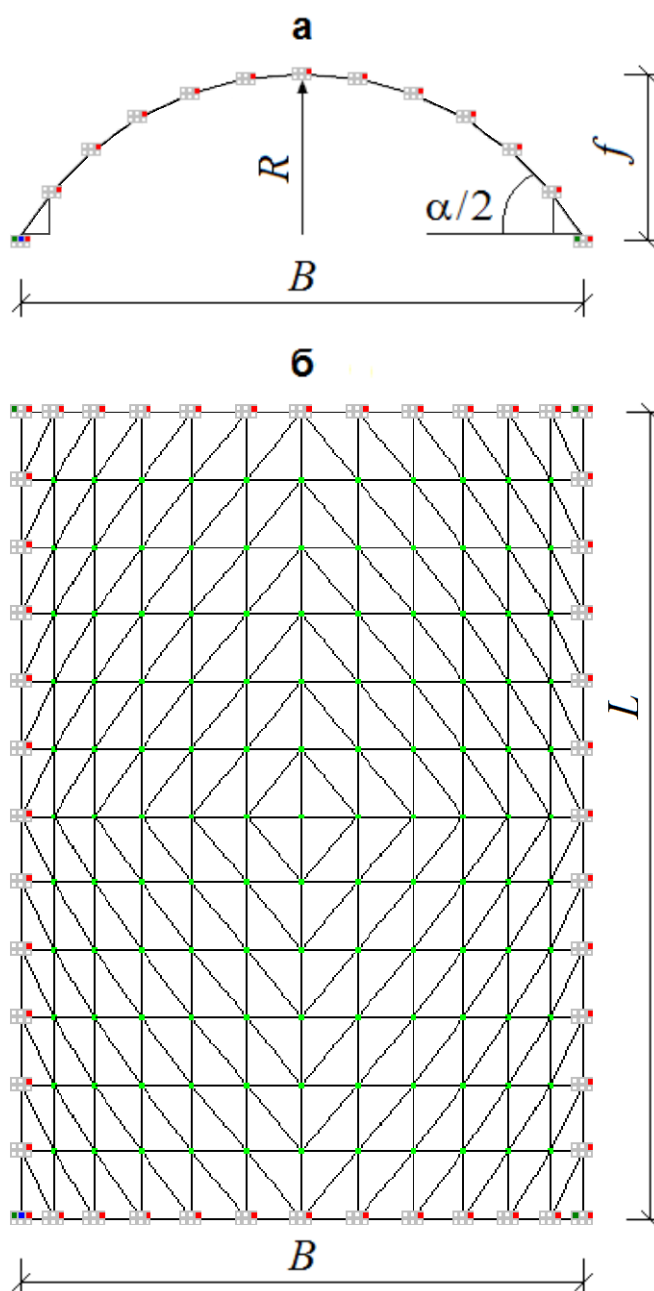


Рис. 1 – Модель покрытия в проекциях:  
а – фронтальной; б – горизонтальной

На основании проведенной оценки параметров силового состояния выявлена изменчивость знака усилий в отдельных элементах. Причем использование горизонтальных граней в одних местах уменьшило, а в других увеличило усилия в элементах.

Уязвимые участки подкрепленного покрытия по сравнению с неподкрепленным показали уменьшение до 15% наибольших усилий в элементах. Однако увеличился на 10% максимальный силовой параметр в продольных контурных элементах.

Тем не менее, обобщенный результат оказался не предсказуемым.

В частности, подкрепление покрытия вызвало:

- 1) появление минимального усилия растяжения (+0,21 т) в центральном поперечном элементе каждой из двух горизонтальных граней;
- 2) в срединной поверхности появилось четыре минимально растянутых (+0,35 т) продольных элемента;
- 3) на минимальную величину увеличилось (с -0,47 т до -0,62 т) усилие сжатия в четырех центральных диагональных элементах.

Полученная перестройка силовых параметров выявила определенные закономерности и стала результатом увеличения характеристик жесткости пространственной конструкции.

Тем не менее, на общий характер перемещений узлов введение горизонтальных граней существенного влияния не оказало. Изменились лишь числовые значения параметров деформирования. В частности, в одних местах зафиксировано уменьшение, а в других – увеличение отклонений узлов. Причем центральный узел верхнего ребра нижней грани покрытия почти занял свое прежнее положение, получив обратное перемещение в направлении горизонтали.

Как и ожидалось, от введения горизонтальных граней достигнуто уменьшение перемещений характерных узлов.

Особенно показательным стало снижение максимальных значений на 17...37%. И только некоторое увеличение перемещений выявлено по направлению длинной стороны покрытия. Среди них наибольший параметр деформирования вырос на 10%.

Разница между максимальными показателями обеих конструкций показала влияние горизонтальных граней на состояние и изменение формы покрытия (рис. 2, 3).

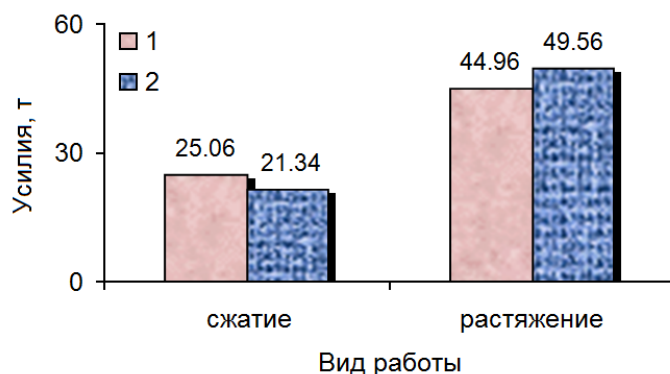


Рис. 2. Максимальные усилия в элементах: 1 – неподкрепленного покрытия;  
2 – покрытия с горизонтальными гранями

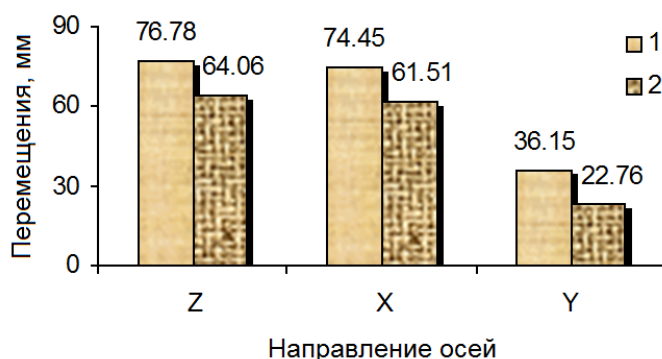


Рис. 3. Максимальные перемещения узлов: 1 – неподкрепленного покрытия;  
2 – покрытия с горизонтальными гранями

### Выводы

1. В рамках работы проведено конечно-элементное моделирование и выполнены численные исследования однослойных цилиндрических стержневых покрытий.

2. Введены горизонтальные грани и определено влияние бортовых элементов на показатели напряженно-деформированного состояния. Установлена степень изменения усилий и перемещения узлов.

3. Проанализированы особенности работы покрытия и выявлены опасные участки с максимальными показателями. Анализ введения горизонтальных граней выполнен путем сравнения полученных закономерностей.

4. Достигнуто позитивное перераспределение усилий по поверхности и обеспечено уменьшение перемещений характерных узлов. Предусмотрено пространство для проводки инженерных коммуникаций.

### Литература

1. 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.
2. Лубо Л.Н. Руководство по проектированию и расчету покрытий нового типа – сетчатых оболочек. Л.: ЛенЗНИИЭП, 1971. 63 с.
3. Патцельт О. Стальные решетчатые пространственные конструкции. М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1970. 95 с.
4. Рюле Г. Пространственные покрытия (конструкции и методы возведения). Том 2. М.: Стройиздат, 1974. 247 с.
5. 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).
6. 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 // ThinWalled Structures. 2015. Vol. 86. pp 1-9.
7. Попов И.Г. Цилиндрические стержневые системы. Л.; М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и арх-ре, 1952. 112 с.
8. Сиянов А.И., Ярошевич Д.К. Влияние наружных бортовых элементов на состояние цилиндрической сетчатой оболочки // Инженерный вестник Дона, 2022, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7396](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7396).

9. Пшеничников Г.И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок. М.: Наука, 1982. 352 с.

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. Siyanov A.I., Rynkovskaya M.I., Abu Mahadi M.I., Mathieu G.O. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. №7S. pp. 365-376.

2. Lubo L.N. Rukovodstvo po proektirovaniyu i raschetu pokrytiy novogo tipa – setchatykh obolochek [Guidelines for the design and calculation of roofs of a new type of mesh shells]. L.: LenZNIIEHP, 1971. 63 p.

3. Pattsel't O. Stal'nye reshchatye prostranstvennye konstruktsii [Steel net space structures]. M.: TSINIS Gosstroya SSSR, 1970. 95 p.

4. Ryule G. Prostranstvennye pokrytiya (konstruktsii i metody vozvedeniya) [Spatial roofs (structures and methods of construction)]. Tom 2. M.: Stroyizdat, 1974. 247 p.

5. Zhou H., Zhang Y., Fu F., Wu J. Materials. 2020. Volume. 13 (11) URL: preprints.org/manuscript/202005.0012/v1.

6. Ma H., Fan F., Wen P., Zhang H., Shen S. Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 86. pp 1-9.

7. Popov I.G. Tsilindricheskie sterzhnevye sistemy [Cylindrical rod systems]. L.; M.: Gos. izd-vo lit. po str-vu i arkh-re, 1952. 112 p.

8. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7396.

9. Pshenichnov G.I. Teoriya tonkikh uprugikh setchatykh obolochek i plastinok [Theory of thin elastic mesh shells and plates]. M.: Nauka, 1982. 352 p.

10. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7319.

**Дата поступления: 8.12.2025    Дата публикации: 13.01.2026**

---