

## Подход к оптимизации цилиндрического стержневого покрытия

*А.И. Сиянов, Д.В. Сивков, Д.К. Ярошевич*

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

**Аннотация:** В рамках оптимизации конструктивного решения проведены исследования цилиндрического стержневого покрытия с повышенной жесткостью опорных ребер и с учетом подкрепления системы затяжками. Определено требуемое расстояние между элементами натяжения вдоль длины конструкции и предложены размеры и форма сечения нижних ребер. Разработан критерий оптимальности с управляющими параметрами и учтены три типоразмера стержней по наибольшим усилиям. Получены внутренние силовые факторы и перемещения узлов с учетом подкрепления и без него. Выявлено позитивное перераспределение усилий по поверхности и уменьшение деформативности покрытия. Установлена зависимость основных геометрических параметров от массы.

**Ключевые слова:** цилиндрическое стержневое покрытие, жесткость опорных ребер, подкрепление затяжками, оптимизация, усилия, перемещения, масса.

### Введение

Для того, чтобы определить оптимальные параметры цилиндрического стержневого покрытия [1] используется самый простой показатель, который характеризует расход материала на единицу площади. Вместе с тем, проектирование конструкции требует минимизации многих видов затрат. Уменьшить массу системы, которая состоит из отдельных стержней можно благодаря изменению конструктивного решения [2].

Ранее предлагалось подкрепить покрытие горизонтальными фермами [3]. Однако это сильно увеличивает затраты материала. Поэтому решено усовершенствовать конструкцию за счет введения затяжек и повышения жесткости опорных ребер. Такой подход, особенно при повышении пролета и ряда других геометрических параметров [4], призван изменить состояние конструкции, снизить усилия в стержнях и уменьшить перемещения узлов.

### Введение в состав покрытия затяжек

Совершенствование предлагается осуществить за счет увеличения жесткости опорных ребер и подкрепления конструкции затяжками, которые

---

расположены через каждые две панели по длине и соединены с конструкцией покрытия в опорной зоне (рис. 1).

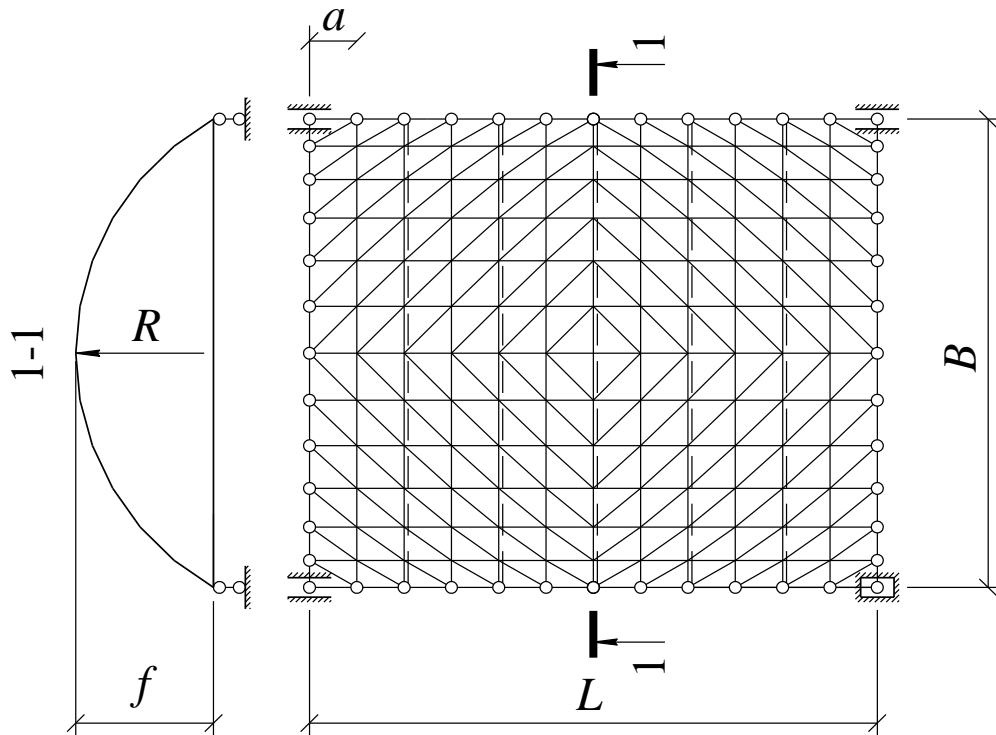


Рис. 1. Расчетная схема покрытия с затяжками

Исследование проведено с использованием прикладного программного обеспечения [5, 6], в котором созданы модели цилиндрической конструкции. Построение расчетных схем основано на сборе данных, от которых зависели формообразующие параметры, геометрическая неизменяемость, жесткость и устойчивость системы. На основании анализа и опыта проектирования конструкций обоснован выбор стрелы подъема, ширины и длины покрытия, типа решетки, характеристик жесткости, граничных условий, величины, вида, направления и расположения нагрузки.

Предполагалось, что введение в состав покрытия затяжек и увеличение жесткости опорных ребер даст возможность перераспределить усилия, снизить перемещения, уменьшить массу и, соответственно, стоимость конструкции.

Путем анализа полученных результатов определялось влияние расположения затяжек вдоль длины покрытия с увеличенной жесткостью нижних продольных элементов, и устанавливалась зависимость массы от геометрических параметров.

### Критерий оптимальности и управляющие параметры

В качестве критерия для поиска оптимального покрытия принято уравнение критической нагрузки. Параметр, характеризующий оптимальную систему, представлен в виде:

$$a = f(L, q_{cr}, R, B), \quad (1)$$

где  $a$  – высота грани (размер ячейки);  $L, B, R$  – соответственно длина, ширина и радиус кривизны покрытия;  $q_{cr}$  – величина критической нагрузки конструкции ( $q_{cr} = \text{const}$ ).

Поперечное сечение подобрано на основании трех типоразмеров по наибольшему усилию, а масса системы для каждой модели принята, как:

$$G = f(a), \quad (2)$$

Выражение (2) отразило степень заполнения решетки и определило расход материала на конструкцию.

### Определение оптимальной конструктивной схемы

Основываясь на рекомендациях по проектированию [7–9], решено рассмотреть 4 схемы покрытия шириной от 18 м до 36 м (табл. 1).

Таблица 1

Геометрические параметры покрытий

Схема покрытия	$B, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$a, \text{ м}$	$f, \text{ м}$
1	18	21,6	10,4	1,8	5,145
2	24	28,56	13,9	2,38	6,87
3	30	36,12	17,3	3,01	8,6
4	36	43,2	20,8	3,6	10,29

Подкрепление покрытия затяжками из каната  $d = 24$  мм и опорными ребрами двутаврового сечения  $h_w \times t_w = 950 \times 16$  мм,  $b_f \times t_f = 320 \times 21$  мм [10] при условии обеспечения общей устойчивости конструкции и с учетом увеличения пролетов позволило определить оптимальную схему. В результате такая конструкция получила размеры в плане  $L \times B = 36,12 \times 30$  м, высоту грани (размер ячейки)  $a = 3,01$  м, стрелу подъема  $f = 8,6$  м, радиус кривизны  $R = 17,3$  м, элементы из труб  $D \times t = 146 \times 8$  мм.

### Результаты оптимизационных расчетов

Отдельно, для неподкрепленных покрытий и покрытий, подкрепленных затяжками и опорными ребрами, определены усилия в элементах и перемещения узлов при симметричной и несимметричной нагрузках. Соотношение диаметра к длине элемента  $l$  не превысило  $1/15$ .

Характер распределения, величина усилий и перемещений позволили установить, что затяжки и опорные ребра повышенной жесткости оказали существенное влияние на внутренние силовые факторы и параметры деформирования конструкции.

Выявлено, что введение затяжек с более жесткими опорными ребрами повлияло на величину максимальных вертикальных перемещений узлов, которые обнаружены в центре покрытия. Кроме того, в опасных ребрах (втором и предпоследнем) максимальное вертикальное перемещение от такого подкрепления уменьшилось в 3 раза.

Покрытие, подкрепленное жесткими опорными ребрами и затяжками, характеризовалось более равномерным распределением усилий в элементах и перемещений узлов. В результате уменьшились максимальные показатели в опорных гранях и усилия во многих ранее загруженных элементах. Масса системы снизилась на 16%.

## Выводы

Подводя итог, следует отметить, что введение затяжек и увеличение жесткости опорных ребер значительно повышает эксплуатационные возможности цилиндрического стержневого покрытия и при выполнении ряда проектных работ может быть использовано для массового внедрения в практику строительства. В дальнейшем планируется модифицировать конструкцию решетки и разработать ряд опорных узловых соединений.

## 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. 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.
  3. Попов И.Г. Цилиндрические стержневые системы. Л.; М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и арх-ре, 1952. 112 с.
  4. Патцельт О. Стальные решетчатые пространственные конструкции. М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1970. 95 с.
  5. ЛИРА СЕРВИС URL: [rflira.ru/services/objects/474/](http://rflira.ru/services/objects/474/).
  6. ЛИРА Софт URL: [lira-soft.com/news/novovvedeniya-lira-10-12/](http://lira-soft.com/news/novovvedeniya-lira-10-12/).
  7. Xiong Z., Zhu S., Zou X., Guo S., Qiu Y., Li L. Elasto-plastic buckling behaviour of aluminium alloy single-layer cylindrical reticulated shells with gusset joints // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 242. pp. 112562.
  8. 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).
  9. Пшеничнов Г.И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок. М.: Наука, 1982. 352 с.
-

10. Сиянов А.И. Исследование цилиндрической сетчатой оболочки с повышенной жесткостью опорных ребер // Инженерный вестник Дона, 2019, №9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6166](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6166).

### 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. Siyanov A.I., Rynkovskaya M.I., Abu Mahadi M.I., Mathieu G.O. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. №7S. pp. 365-376.
3. Popov I.G. Tsilindricheskie sterzhnevye sistemy [Cylindrical rod systems]. L.; M.: Gos. izd-vo lit. po str-vu i arkh-re, 1952. 112 p.
4. Pattsel't O. Stal'nye reshchatye prostranstvennye konstruktsii [Steel net space structures]. M.: TSINIS Gosstroya SSSR, 1970. 95 p.
5. LIRA SERVIS URL: [rflira.ru/services/objects/474/](http://rflira.ru/services/objects/474/) (accessed 28/07/22).
6. LIRA Soft URL: [lira-soft.com/news/novovvedeniya-lira-10-12/](http://lira-soft.com/news/novovvedeniya-lira-10-12/) (accessed 28/07/22).
7. Xiong Z., Zhu S., Zou X., Guo S., Qiu Y., Li L. Engineering Structures. 2021. Vol. 242. pp. 112562.
8. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №12. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7319](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7319).
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. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6166](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6166).