

## Влияние перекрестных связей на состояние цилиндрических сетчатых оболочек

*А.И. Сиянов, Д.К. Ярошевич*

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

**Аннотация:** Исследовано влияние расположения подкрепляющих связей на общее состояние цилиндрических сетчатых оболочек. В качестве подкрепления конструкций приняты перекрестные стержневые элементы из трубчатых профилей. Количество связей принято 8 (по 4 в пределах каждой панели). Крестообразными элементами по направлению дуги соединены противоположные узлы смежных граней. Проверена целесообразность расположения связей в пределах каждой из двух средних панелей и на расстоянии одной панели от середины длины. В результате проведенных исследований определены закономерности напряженно-деформированного состояния и опасные участки оболочки. Благодаря крестообразным связям выявлено снижение усилий в элементах и уменьшение перемещений узлов. Зафиксировано перераспределение внутренних силовых факторов и сокращение числа типоразмеров элементов. Получена рациональная схема подкрепления конструкции.

**Ключевые слова:** цилиндрическая сетчатая оболочка, подкрепление, крестообразные связи, усилия, перемещения.

### Введение

В мировой конструкторской практике металлические цилиндрические сетчатые оболочки начали развиваться с середины двадцатого века. Первые разработки относились к сфере формообразования [1], геометрических размеров [2] и узловых соединений [3]. Позже стали решаться вопросы расчета [4], монтажа и эксплуатации [5]. Созданный таким образом комплексный подход привел к формулированию проблемы устойчивости и проектированию оболочек с определенными размерами в плане [6]. Так появилось утверждение о предельных габаритных размерах конструкций [7]. Как следствие рассматривалась возможность подкрепления оболочки путем использования дополнительных элементов [8]. К тому же, предлагалось усовершенствовать конструкцию с помощью связей в виде перекрестных элементов [9]. Поэтому в статье показаны результаты исследования оболочки с крестообразными связями.

Элементами подкрепления предложено соединить противоположные узлы смежных граней в двух схемах по направлению дуги: 1) в пределах каждой из двух средних панелей и 2) на расстоянии одной панели от середины длины конструкции. Количество подкрепляющих связей принято 8, то есть по 4 в пределах каждой панели. Крестообразные связи предполагалось изготовить из труб, то есть из того же самого профиля, что и оболочка. Расчетная схема (рис. 1) формировалась в ПК ЛИРА [10].

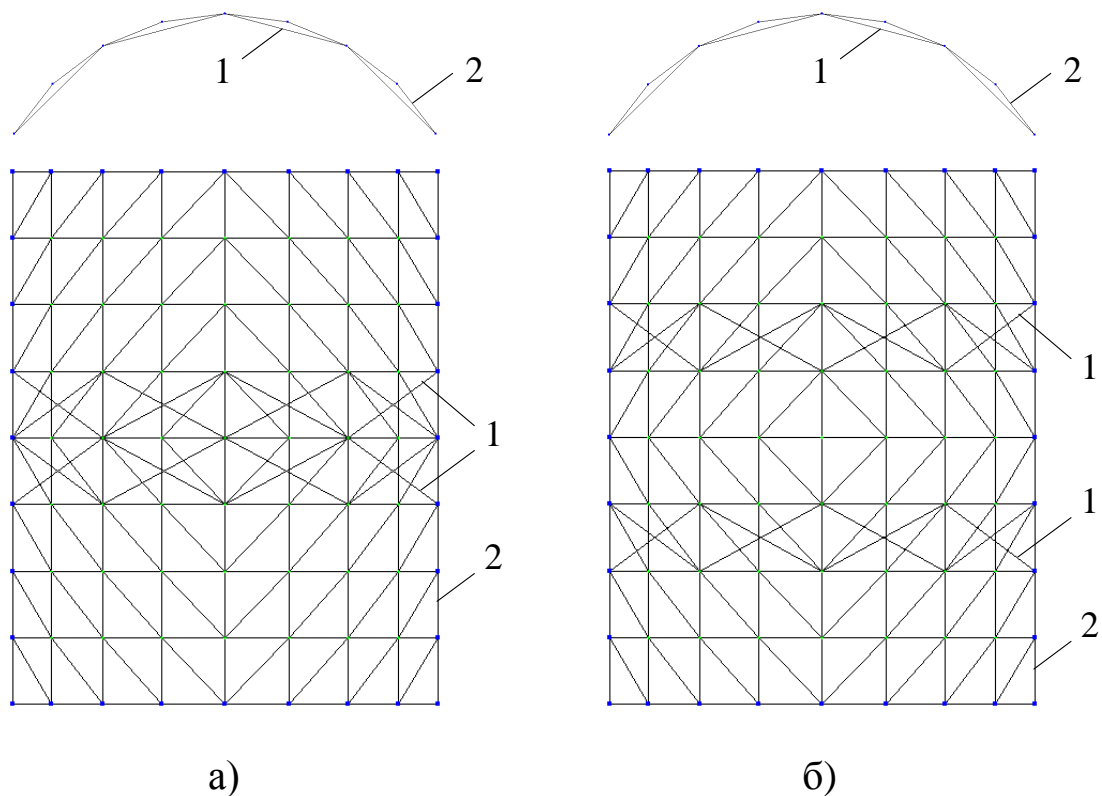


Рис. 1. Модели оболочки с крестообразными связями: а) – в средней зоне; б) – на расстоянии одной панели от центра вдоль длины; 1 – связь; 2 – оболочка

За определяющие критерии приняты:

1) силовой параметр:

$$N = f(N_i^{\pm}, n_{Ni}^{\pm}), \quad (1)$$

где  $N_i^{\pm}$  – усилие растяжения (сжатия) в элементах;  $n_{Ni}^{\pm}$  – количество растянутых и сжатых элементов;

2) параметр деформирования:

$$\delta = f(\delta_{zi}^{\pm}, \delta_{yi}^{\pm}, n_{\delta zi}^{\pm}, n_{\delta yi}^{\pm}), \quad (2)$$

где  $\delta_{zi}^{\pm}$  и  $\delta_{yi}^{\pm}$  – вертикальные и горизонтальные перемещения узлов соответственно;  $n_{\delta zi}^{\pm}$  и  $n_{\delta yi}^{\pm}$  – количество вертикальных и горизонтальных перемещений узлов соответственно.

Проведенные расчеты показали, что большинство растянутых и сжатых элементов зафиксировано в тех же самых участках, что и в неподкрепленной оболочке. Разница заключалась лишь в том, что изменились значения усилий в элементах. С введением крестообразных связей выявлено уменьшение максимальных показателей (рис. 2).

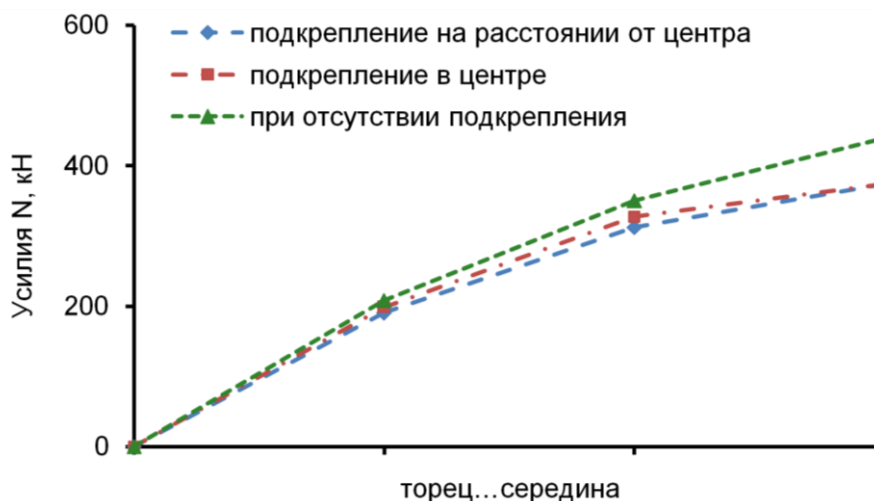


Рис. 2. Продольные усилия в элементах опорного ребра 1/4 части оболочки

К тому же наблюдалось значительное перераспределение усилий. В опасных участках отмечено уменьшение наибольших усилий обоих знаков. Для подкрепления крестообразными связями на расстоянии одной панели от середины длины оболочки зафиксировано увеличение в 11,3 раза максимального усилия сжатия в диагональных элементах и на 5% и на 2,4% максимального усилия растяжения и сжатия в поперечных элементах.

Знак усилий изменился в четырнадцати элементах для подкрепления среднего участка конструкции и в двенадцати элементах для подкрепления на расстоянии одной панели от середины длины оболочки. Причем выявлено, что без учета крестообразных связей по схеме подкрепления среднего участка конструкции большинство элементов со сменой знака получили сжатие, а по схеме подкрепления на расстоянии одной панели от середины длины – растяжение.

Анализ максимальных усилий в элементах по направлениям расположения по поверхности и проверка количества сжатых и растянутых подкрепляющих элементов позволил выявить преимущество схемы подкрепления среднего участка оболочки. В результате число типоразмеров элементов существенно сократилось.

Однако, несмотря на введенные крестообразные связи, зафиксированы и перемещения узлов конструкции. Так наиболее опасные максимальные вертикальные перемещения узлов найдены в нижнем ребре граней, смежных с гранями верхнего участка (рис. 3).

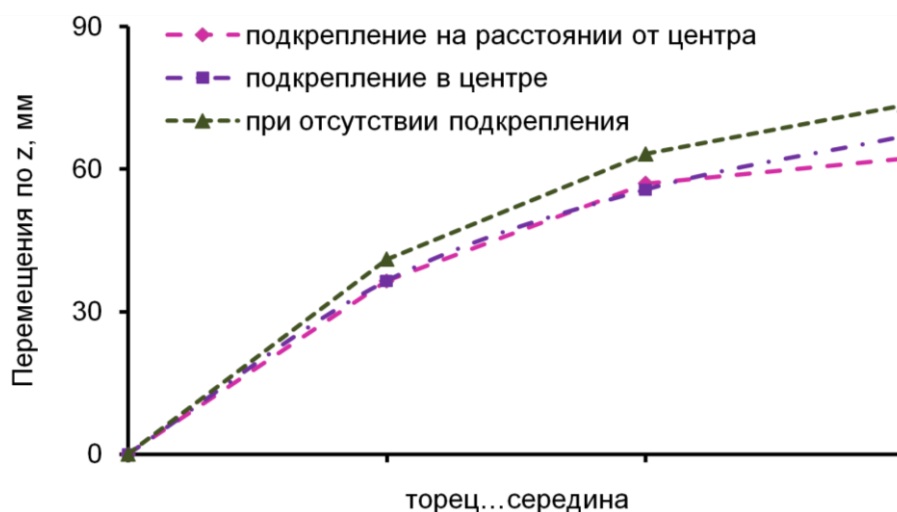


Рис. 3. Вертикальные перемещения узлов нижнего ребра грани, смежной с гранью верхнего участка 1/4 оболочки

Тем не менее, зафиксировано существенное перераспределение

вертикальных перемещений узлов по поверхности для схемы подкрепления на расстоянии одной панели от середины длины. Впрочем, искривление формы оболочки определялось также горизонтальными перемещениями узлов. В частности, наибольшие отклонения узлов по горизонтали в двух схемах подкрепления выявлены в нижнем ребре опорных граней в средней части длины. Другие ребра были отмечены меньшими горизонтальными перемещениями узлов. Введенные элементы подкрепления перераспределили горизонтальные перемещения узлов по поверхности.

В целом, использование крестообразных связей позволило уменьшить смещения узлов. Характерными в данном случае можно назвать зафиксированные на поверхности максимальные узловые отклонения. По сравнению с неподкрепленной оболочкой они уменьшились на 7,5...54,5%. Минимальной по массе оказалась система подкрепления среднего участка.

### **Выводы**

1. Исследования позволили выявить закономерности состояния и опасные участки цилиндрической сетчатой оболочки с крестообразными связями.
2. Введение подкрепляющих связей в работу конструкции ослабило усилия значительного количества элементов и уменьшило перемещение многих узлов.
3. Благодаря перераспределению усилий по поверхности вследствие использования крестообразных связей, уменьшилось число типоразмеров элементов и определена рациональная схема подкрепления.

### **Литература**

1. Патцельт О. Стальные решетчатые пространственные конструкции. М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1970. 95 с.
2. Лубо Л.Н. Руководство по проектированию и расчету покрытий нового типа сетчатых оболочек. Л.: ЛенЗНИИЭП, 1971. 63 с.

3. Рюле Г. Пространственные покрытия // Конструкции и методы возведения. Том 2. М.: Стройиздат, 1974. 247 с.
4. Лебедев В.А., Лубо Л.Н. Сетчатые оболочки в гражданском строительстве на севере. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. 136 с.
5. Трущев А.Г. Пространственные металлические конструкции: учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1983. 215 с.
6. 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.
7. Сиянов А.И. Влияние криволинейной формы на распределение массы металлических цилиндрических сетчатых оболочек // Инженерный вестник Дона, 2019, №6 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6053](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6053).
8. Сиянов А.И., Ярошевич Д.К. Исследование подкрепленной цилиндрической сетчатой оболочки // Инженерный вестник Дона, 2023, №9 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8660](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8660).
9. Kolakkattil R., Tsavdaridis K.D., Sanjeev A.J. A state-of-the-art review of progressive collapse research and guidelines for single-layer lattice shell structures // Structures. 2023. Vol. 56. URL: [openaccess.city.ac.uk/id/eprint/31044/](https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/31044/).
10. Лира Сервис. URL: [rflira.ru/services/objects/474/](http://rflira.ru/services/objects/474/).

### References

1. Pattsel't O. Stal'nye reshetchatye prostranstvennye konstruksii [Steel net space structures]. М.: TSINIS Gosstroya SSSR, 1970. 95 p.
2. Lubo L.N. Rukovodstvo po proektirovaniyu i raschetu pokrytiy novogo tipa – setchatykh obolochek [Methodological recommendations for the design and calculation of roofs of a new type – mesh shells]. L.: LenZNIIEHP, 1971. 63 p.
3. Ryule G. Prostranstvennye pokrytiya. Konstruksii i metody vozvedeniya [Spatial roofs. Constructions and methods of construction]. Vol. 2. М.: Stroyizdat, 1974. 247 p.



4. Lebedev V.A., Lubo L.N. Setchatye obolochki v grazhdanskom stroitel'stve na severe [Mesh shells in civil engineering in the North]. L.: Stroyizdat, Leningr. otd-nie, 1982. 136 p.
5. Trushchev A.G. Prostranstvennyye metallicheskie konstruksii: ucheb. posobie dlya vuzov [Spatial metal structures: manual for universities]. M.: Stroyizdat, 1983. 215 p.
6. Siyanov A.I., Rynkovskaya M.I., Abu Mahadi M.I., Mathieu G.O. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. №7S. pp. 365-376.
7. Siyanov A.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6053](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6053).
8. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8660](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8660).
9. Kolakkattil R., Tsavdaridis K.D., Sanjeev A.J. Structures. 2023. Vol. 56. URL: [openaccess.city.ac.uk/id/eprint/31044/](https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/31044/).
10. Lira Servis. URL: [rflira.ru/services/objects/474/](http://rflira.ru/services/objects/474/) (accessed 11/11/23).

**Дата поступления: 20.11.2023**

**Дата публикации: 28.12.2023**