

## Узловое соединение подкрепленной цилиндрической сетчатой оболочки

*А.И. Сиянов, Д.К. Ярошевич*

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

**Аннотация:** Статья посвящена разработке узлового соединения для оценки уровня жесткости цилиндрической сетчатой оболочки. Предложены практические рекомендации по сборке узла с затяжкой и представлена конструкция винтовой муфты для реализации процесса контролируемого натяжения. Определены рациональные места расстановки узловых соединений на нижних поясах опорных граней. Проведены численные исследования возможных схем и установлена закономерность изменения вертикальных перемещений узлов от торца к центру. Выявлен позитивный вклад элементов подкрепления и определена жесткость оболочки. Показано, что введение затяжек с разработанным узлом повышает уровень сопротивления действующим нагрузкам и заметно снижает деформации в характерных участках.

**Ключевые слова:** узловое соединение, цилиндрическая сетчатая оболочка, затяжка, винтовая муфта, подкрепление, жесткость.

### Введение

Опыт исследования цилиндрических сетчатых оболочек для покрытий зданий и сооружений с разными геометрическими параметрами, формами сеток, схемами подкрепления и граничными условиями на контуре [1–3] указывает на необходимость применения эффективных узловых соединений.

Из литературы известно [4, 5], что такие конструкции в основном имеют круговое очертание, характеризуются сложной пространственной структурой и большим количеством элементов. Цель исследований – упростить строительные работы путем разработки узловых соединений для осуществления максимально быстрой сборки конструкции. В данном направлении исследования проводятся регулярно [6, 7]. Однако очень мало внимания уделяется контурному или частичному креплению оболочки из-за ранее установленных ограничений габаритных размеров здания или сооружения. Сдерживающим фактором выступает необходимость изменить конструктивное решение при увеличении перекрываемой площади.

Наиболее приемлемым и конструктивно возможным способом усовершенствования цилиндрических сетчатых оболочек является введение

подкрепляющих элементов в виде затяжек в контурные зоны. Изменение конструктивного решения требует разработки опорных узлов.

### Основная часть

В данном случае предполагается, что все усилия от распора будут восприниматься стягивающими элементами, которые присоединяются к нижним поясам опорных граней. По отношению к другим стержням конструкции предусмотрено применение специальных ребер повышенной жесткости [8]. Крепление затяжек выполняется заранее рассчитанными высокопрочными натяжными болтами. Причем на одной стороне затяжка фиксируется неподвижно, а на другой стороне присоединяется устройство для ее натяжения. Наиболее простыми в изготовлении могут быть винтовые муфты с правой или левой резьбой (рис. 1).

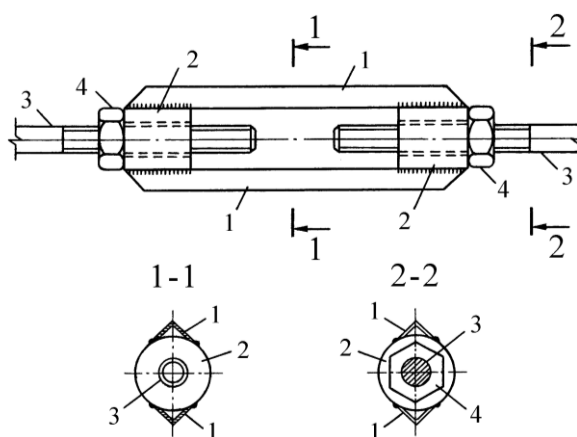


Рис. 1. Винтовая муфта для натяжения затяжек:

- 1 – уголок; 2 – трубчатый элемент;
- 3 – стальной стержень; 4 – контргайка

После натяжения, чтобы избежать раскручивания, их необходимо затягивать контргайками. Размеры муфт зависят от геометрических параметров оболочки и задаются в зависимости от диаметра затяжки при заданной несущей способности или жесткости.

Затяжки начинают воспринимать усилия от распора после закрепления их на нижних поясах опорных граней и после равномерного и окончательного их натяжения.

Условие прочности затяжки можно записать в виде:

$$N_F \leq \phi_3,$$

где  $N_F$  – усилие в затяжке от приложенных нагрузок;  $\phi_3$  – несущая способность затяжки на растяжение,

$$\phi_3 = \sum A_3 R_3 \varpi_1 \varpi_2 \varpi_3.$$

Здесь  $\sum A_3$  – суммарная площадь сечений проволок, которые формируют затяжку;  $R_3$  – расчетное сопротивление материала затяжки;  $\varpi_1$ ,  $\varpi_2$ ,  $\varpi_3$  – соответственно, коэффициенты условий работы проволок, конструкции крепления затяжки и оболочки.

Рекомендуемая схема опорного узла представлена на рис. 2.

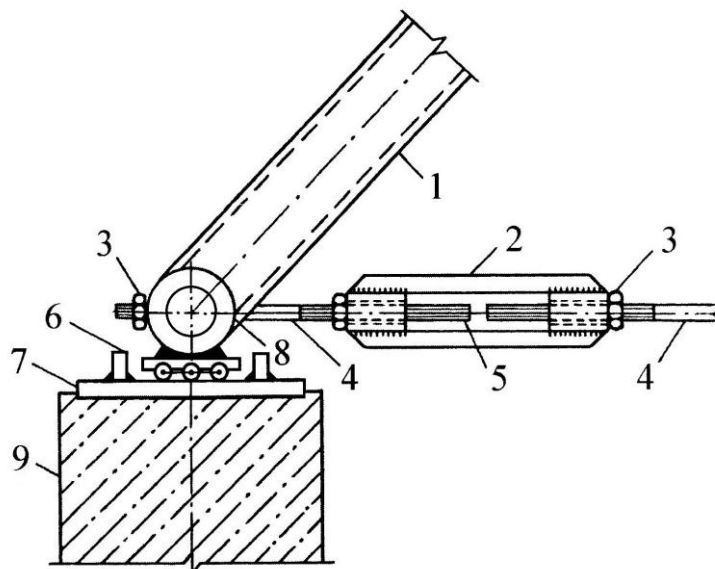


Рис. 2. Опорный узел затянутой конструкции:

- 1 – трубчатый элемент оболочки; 2 – винтовая муфта для натяжения затяжки;
- 3 – контргайка; 4 – стальной стержень; 5 – резьба; 6 – упор;
- 7 – закладная деталь; 8 – нижний пояс; 9 – опора

Как видно из рис. 2, в нижних поясах опорных граней оболочки в местах узловых соединений предусмотрены отверстия, куда вставляются стержни с резьбой для крепления винтовых муфт. Один конец стержня пропускается через круглое отверстие для крепления затяжки, а другой конец соединяется с винтовой муфтой. Предусматривается чередование узлов вдоль образующей. После натяжения затяжек муфты фиксируются контргайками.

В таких узлах, для уменьшения трения, конструкцию упора предлагается покрывать специальным материалом.

Предложенную схему узлового соединения рационально использовать во время монтажа оболочки на уровне обреза фундамента, поскольку в данном случае затяжки можно спрятать под пол.

Численные исследования конструкции с разработанным узлом выполнены путем компьютерного моделирования [9, 10].

Формообразование осуществлено на основе геометрических размеров, указанных в табл. 1 [2].

Таблица 1

Размеры сетчатой оболочки

№	Размеры в плане $B \times L$ , м	Стрела подъема $f$ , м	Размеры ячейки $a$ , м	Угол описанной окружности $\alpha$ , в градусах	Радиус кривизны $R$ , м
1	24×28,56	6,87	2,38	120	13,9
2	30×37,2	9,55	3,1	130	16,59
3	36×43,2	10,29	3,6	120	20,8

Принятые граничные условия оболочки обеспечивают геометрическую неизменяемость системы и отражены тремя видами крепления на контуре

$$X = Y = Z = 0; X = Z = 0; Z = 0.$$

В качестве основных элементов выбраны круглые трубы с заданными расчетными параметрами  $D = 140$  мм и  $t = 4,5$  мм.

Нижний пояс опорных граней назначен из труб повышенной жесткости с увеличенной в 8 раз толщиной стенки ( $t = 36$  мм) и тем же габаритным размером профиля ( $D = 140$  мм).

На основе прежних исследований подкрепленных оболочек элементам задана сталь С245.

Нагрузки к сетчатой поверхности приложены с учетом собственного веса конструктивных элементов.

Результаты проведенных исследований показали высокий уровень сопротивления действующим нагрузкам и снижение вертикальных перемещений узлов в характерных участках (рис. 3).

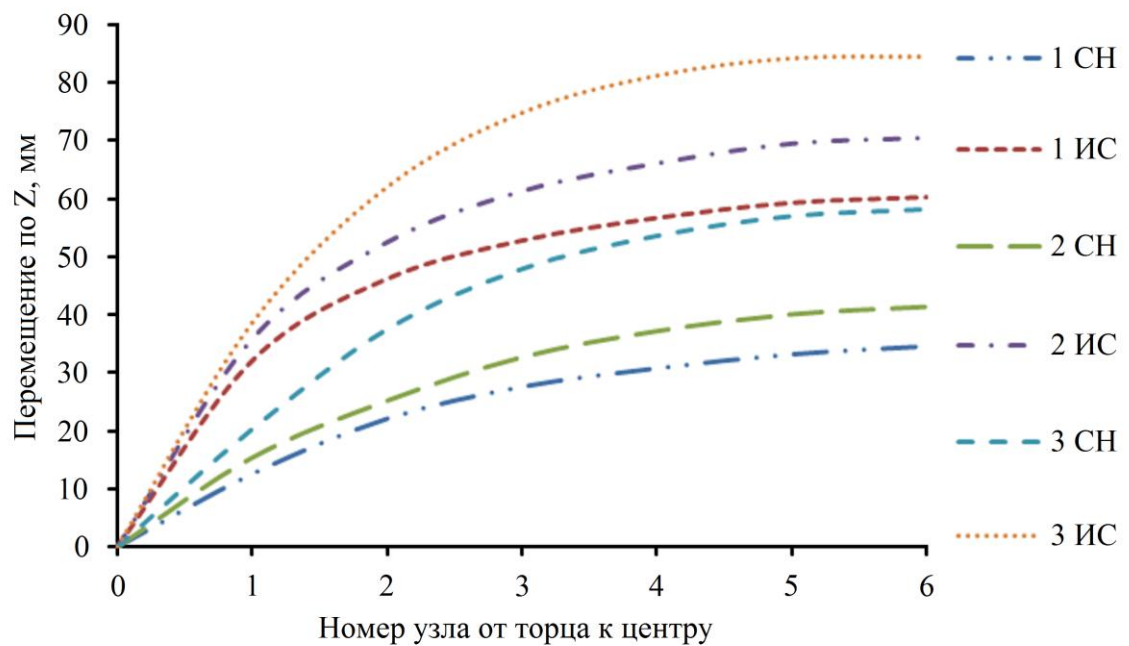


Рис. 3. Наиболее опасные вертикальные перемещения узлов:

1, 2, 3 – номера исследуемых оболочек;

СН – схема с натяжением; ИС – исходная схема

Таким образом, предложенное для опорных зон узловое соединение позволяет уменьшить деформации и позитивно влияет на повышение несущей способности конструкции.

## Выводы

Поочередная расстановка узловых соединений затяжек с нижними поясами улучшает качество работы сетчатой оболочки, а рекомендации по сборке не требуют специальных механизмов. Предложенная винтовая муфта является простой в изготовлении и способствует успешной реализации процесса контролируемого натяжения на заданных участках. Результаты исследований схем оболочек с затяжками показывают снижение уровня деформаций и свидетельствуют о повышении жесткости конструкции.

## 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. 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).
3. 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.
4. Wu J., Lu X.Y., Li S.C., Xu Z.H., Wang Z.D., Li L.P., Xue Y.G. Parametric modeling and shape optimization design of five extended cylindrical reticulated shells // *Steel and Composite Structures*. 2016. Vol. 21 (1), pp. 217-247. URL: [doi.org/10.12989/scs.2016.21.1.217](https://doi.org/10.12989/scs.2016.21.1.217).
5. Yu Z., Lu C., Zhong Y. Performance-based analysis of single-layer cylindrical steel reticulated shells in fire // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10 (9). URL: [doi.org/10.3390/app10093099](https://doi.org/10.3390/app10093099).
6. 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. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112562.

7. 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. URL: doi.org/10.1016/j.tws.2014.08.006.

8. 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.

9. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций: АСВ, 2009. 360 с.

10. Стрелец-Стрелецкий Е.Б., Журавлев А.В., Водопьянов Р.Ю. ЛИРА-САПР. Книга 1. Основы: LIRALAND, 2019. 154 с.

### References

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

2. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8660.

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

4. Wu J., Lu X.Y., Li S.C., Xu Z.H., Wang Z.D., Li L.P., Xue Y.G. Steel and Composite Structures. 2016. Vol. 21 (1), pp. 217-247. URL: doi.org/10.12989/scs.2016.21.1.217.

5. Yu Z., Lu C., Zhong Y. Applied Sciences. 2020. Vol. 10 (9). URL: doi.org/10.3390/app10093099.

6. Xiong Z., Zhu S., Zou X., Guo S., Qiu Y., Li L. Engineering Structures. 2021. Vol. 242. URL: doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112562.

7. Ma H., Fan F., Wen P., Zhang H., Shen S. Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 86, pp. 1-9. URL: doi.org/10.1016/j.tws.2014.08.006.

---



8. Siyanov A.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6166](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6166).

9. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. Komp'yuternye modeli konstruktsiy [Computer models of structures]. ASV, 2009. 360 p.

10. Strelets-Streletskiy E.B., Zhuravlev A.V., Vodop'yanov R.Yu. LIRA-SAPR. Kniga 1. Osnovy [LIRA-CAD. Book 1. The Basics]. LIRALAND, 2019. 154 p.

**Дата поступления: 20.11.2023**

**Дата публикации: 28.12.2023**