

Исследование цилиндрической сетчатой оболочки с повышенной жесткостью опорных ребер

А.И. Сиянов

Технический институт (филиал) «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова», г. Нерюнгри

Аннотация: Проведены исследования работы металлической цилиндрической сетчатой оболочки с опорными ребрами повышенной жесткости. Определен рациональный вариант профиля продольных элементов и предложены рекомендуемые параметры сечения стержней в месте укрепления нижних граней. Проверено нескольких подходов конструирования схемы и выполнен расчет сечений по трем блокам проектных решений. Рекомендовано применение двутаврового профиля как оптимального варианта для увеличения коэффициента запаса устойчивости конструкции. Благодаря повышению жесткости опорных ребер получена существенная разгрузка опасных участков и перестроена форма возможного деформирования системы. Выявлены качественные закономерности распределения продольных усилий и перемещений, которые отразили позитивные изменения в общем состоянии сетчатой поверхности. Полученные числовые значения расчетных параметров показали имеющие резервы несущей способности конструкции.

Ключевые слова: цилиндрическая сетчатая оболочка, покрытие, укрепление, жесткость опорных ребер, силовой фактор, параметр деформирования.

Введение

Металлические цилиндрические сетчатые оболочки являются многофункциональными пространственными конструкциями и успешно применяются в качестве покрытий зданий и сооружений [1]. Их форма обладает повторяемой структурой, прекрасным внешним видом, высокой светопропускной способностью, относительной легкостью и экономичностью. Благодаря удачным дизайнерским решениям и современным компьютерным технологиям указанные оболочки удачно вписываются в архитектурный облик существующей застройки.

Широкое применение цилиндрических покрытий объясняется многообразием расположения стержней, возможностью использования нескольких поверхностей и различных граничных условий на контуре [2–4]. Причем системы, состоящие из одной круговой формообразующей сетки, с учетом принципа минимизации материала, отличаются большей уязвимостью

от действия приложенных эксплуатационных нагрузок. Кроме того, на общее состояние поверхности сильное влияние оказывает учет многих факторов [5], требующих применения сложных математических выражений, способных описать состояние и геометрические параметры поверхности [6].

Исследования показали, что между длиной и шириной покрытия существует зависимость, нарушение которой приводит к появлению концентраторов напряжений и опасности потери устойчивости сетки [7]. В соответствии с принятыми рекомендациями для проектирования, длина L не должна превышать ширину B более чем на 40 %. Другие геометрические параметры, такие как ширина и высота подъема также связаны между собой. Их соотношение имеет определенные пределы $B/f=3\dots 5$ и зависит от радиуса кривизны R и угла α описанной окружности оболочки.

По результатам исследований доказано, что самой экономичной по расходу материала является цилиндрическая сетка, состоящая из взаимно перпендикулярных и диагональных стержней [8]. Как ни странно именно она обладает архитектурной выразительностью и считается весьма удачной в работе. Повторяющиеся ячейки, с учетом симметрии, располагаются по направлению длины и ширины конструкции. Ориентация диагональных стержней с позиции каждой грани имеет нисходящий характер. В такой системе наблюдается лучшее распределение материала по поверхности, что создает предпосылки для появления новых идей и соответствующих технических решений.

Следует, однако, отметить, что любые преобразования оболочки должны соответствовать действующим нормативным требованиям по несущей способности и жесткости. Особенно если речь идет о необходимости обеспечить перекрытие значительных площадей без установки продольных стен или колонн. Возникает задача создания и проверки в действии технического решения с торцевым креплением оболочки.

Описание проблемы и постановка задачи

Попытки сохранить характеристики жесткости стержней (трубчатые сечения диаметром 152×7 мм) сетчатой конструкции с учетом прежних геометрических параметров [9] оказались непродуктивными. Разработка систем с дополнительными стержнями из плоскости покрытия или на сетчатой поверхности также не дала ощутимых результатов.

Поэтому принято решение укрепить нижние грани и найти подходящий вариант сечения опорных ребер. С учетом удобства крепления стержней и усилий, возникающих в продольных элементах, выбран двутавр с параметрами, указанными в таблице 1.

Таблица 1

Параметры двутаврового сечения в опорных ребрах оболочки

| h , мм | b_f , мм | t_w , мм | t_f , мм | r , мм | A , см ² |
|----------|------------|------------|------------|----------|-----------------------|
| 990 | 320 | 16 | 21 | 30 | 293,8 |

Построение конструкции (таблица 2) осуществлено в прикладном программном комплексе [10] с использованием поверхности вращения и прямоугольного типа ячеек.

Таблица 2

Размеры и параметры построения оболочки

| L , м | B , м | f , м | R , м | α , ° |
|---------|---------|---------|---------|--------------|
| 30 | 24,25 | 7 | 14 | 120 |

Вклад нового сечения в работу системы проанализирован на основании показателей, полученных по результатам моделирования и расчета.

Создание расчетной модели

Формообразование оболочки выполнено с учетом продольных, поперечных и диагональных стержней, установленного соотношения геометрических параметров, требований устойчивости и минимизации расходов. Характеристики жесткости заданы в соответствии с опытом проектирования и особенностями работы конструкции. Нагрузки на покрытие определены для городских условий строительства средней полосы России. В угловых опорных узловых соединениях поставлены горизонтальные и вертикальные связи, обеспечивающие геометрическую неизменяемость сетчатой поверхности.

На основании имеющегося спектра возможных предпосылок проверено несколько вариантов конструирования схемы и выполнен расчет сечений стержней по трем блокам проектных положений.

Исследование работы конструкции

Результаты рабочего состояния покрытия наглядно отразили поведение системы и позволили осуществить адекватную оценку полученных расчетных показателей. Двутапное сечение, принятое для нижних ребер оболочки сыграло роль вертикального бортового элемента и оказалось наиболее приемлемым, о чем свидетельствуют мозаики проверок по предельным состояниям. К тому же увеличился коэффициент запаса устойчивости конструкции.

Изменения, полученные от повышения жесткости опорных ребер показали ожидаемый эффект и сильно отразились на работе покрытия. Они позволили выявить характерные закономерности и явились следствием внутренних силовых факторов и параметров деформирования конструкции. Наглядными оказались полученные мозаики усилий и перемещений, которые четко проявились на сетчатой поверхности.

Система позитивно отреагировала на повышение жесткости опорных ребер, отличилась минимальными затратами и качественно перераспределила

по сетке показатели работы покрытия. Отдельные участки пространственной конструкции получили существенную разгрузку, что значительно снизило опасность наступления критической ситуации и перестроило форму возможной потери устойчивости (рис. 1, 2).

Загружение 1
Форма потери устойчивости в гл. с. 1
Коэффициент 10.0362

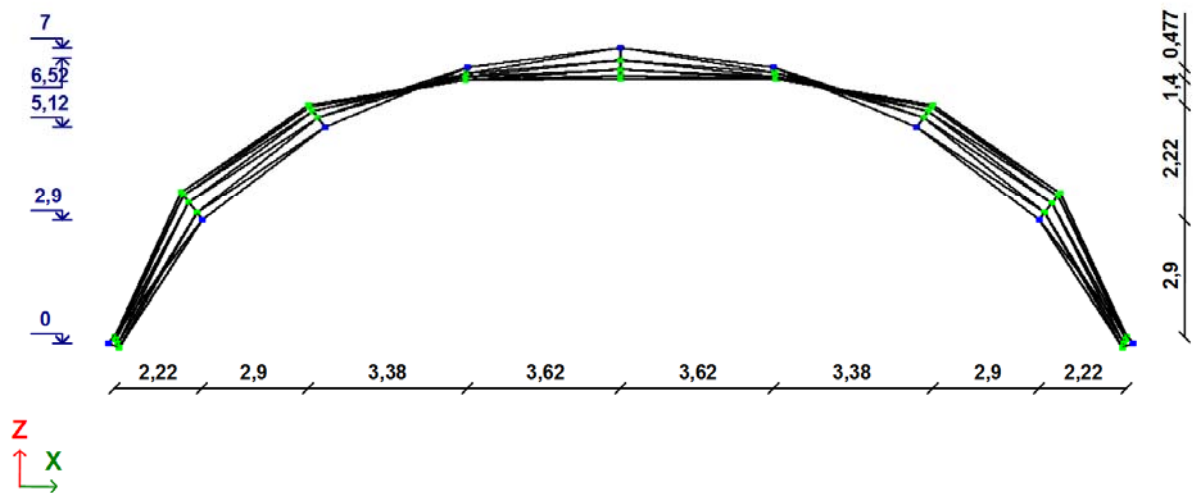


Рис. 1 – Форма возможной потери устойчивости исходной металлической цилиндрической сетчатой оболочки (вид с торца)

Загружение 1
Форма потери устойчивости в гл. с. 1
Коэффициент 12.1985

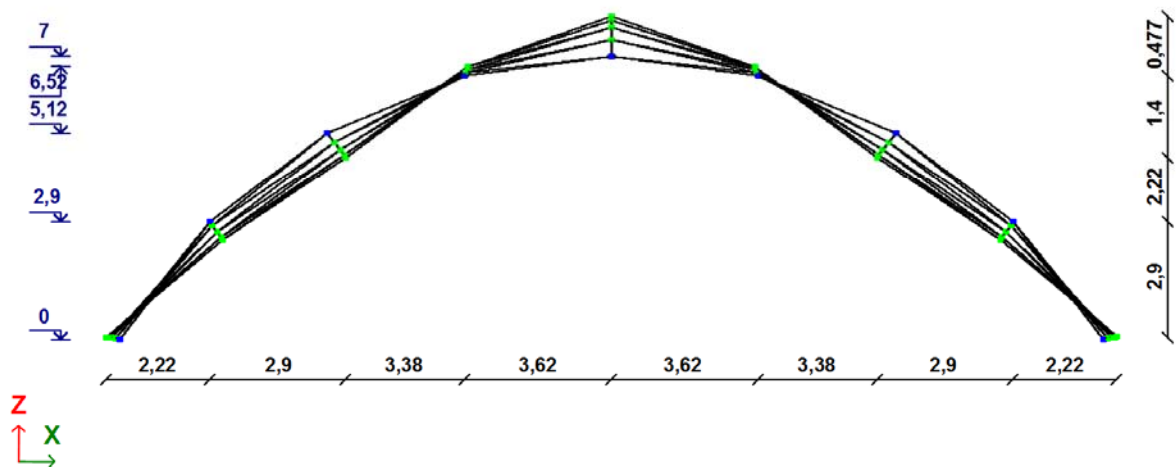


Рис. 2 – Форма возможной потери устойчивости укрепленной металлической цилиндрической сетчатой оболочки (вид с торца)

После укрепления нижних продольных стержней максимальные значения осевых сил серьезно уменьшились, но не изменили своего положения и остались в растянутых опорных ребрах. Верхние пояса нижних граней оказались по-прежнему сжатыми с наибольшим усилием на расстоянии одной ячейки от края покрытия. Элементы вдоль дуги окружности слабо отреагировали на процесс повышения жесткости стержней. Однако в некоторых раскосах, примыкающих к торцам, изменился знак осевых усилий, что привело к необходимости воспринимать растяжение. Центральное продольное ребро оболочки также не смогло сопротивляться дополнительному включению жесткости и вступило в работу под действием сжатия. Аналогичная ситуация зафиксирована с некоторыми диагональными элементами средней зоны, которые качественно перестроились и начали работать в условиях растяжения. Причем знак осевых усилий в центральных нисходящих стержнях верхних граней не изменился.

Выявленные отличия в загруженности элементов контура и средних участков компенсировались более равномерным распределением материала по поверхности. Изменилось общее состояние конструкции, и значительно уменьшились максимальные усилия в стержнях (таблица 3).

Естественно, перераспределение внутренних силовых факторов путем повышения жесткости опорных ребер существенно повлияло на числовые значения параметров деформирования. Заметно снизилась разница между соседними показателями и усилилась сопротивляемость конструкции действующим нагрузкам. Система повысила свои эксплуатационные качества, стала более устойчивой и менее чувствительной к приложенным комбинациям внешних нагрузок. Максимальные перемещения узлов (таблица 4) зафиксированы на центральной дуге симметрии оболочки. Они значительно уменьшились после укрепления конструкции и немного

изменили свое положение, оказавшись в верхнем ребре нижних граней. Другие узлы системы отклонились в меньшей степени, причем существенных отличий между значениями перемещений по сетчатой поверхности не выявлено. Такое обстоятельство свидетельствует о выравнивании процесса деформирования покрытия.

Таблица 3

Максимальные усилия в продольных опорных элементах
нижних граней оболочки

| Тип системы | Максимальные усилия N_{\max} | | | |
|-------------|--------------------------------|--------|------------|--------|
| | растяжения (+) | | сжатия (-) | |
| Начальная | 409,4 кН | 100 % | 274,46 кН | 100 % |
| Укрепленная | 266,36 кН | 65,1 % | 121,54 кН | 44,3 % |

Таблица 4

Максимальные перемещения узлов в продольных элементах
нижних граней оболочки

| Тип системы | Максимальные перемещения δ_{\max} | | | |
|-------------|------------------------------------------|-------|-------------------------------|--------|
| | горизонтальные (\rightarrow) | | вертикальные (\downarrow) | |
| Начальная | 180,9 мм | 100 % | 185,9 мм | 100 % |
| Укрепленная | 10,4 мм | 5,7 % | 25,3 мм | 13,6 % |

Полученные закономерности распределения осевых усилий и перемещений вследствие повышения жесткости опорных ребер демонстративно отразили положительные изменения в общем состоянии конструкции. Числовые значения расчетных параметров оказались не только приемлемыми (выявленными в рамках требований норм), но и показали имеющиеся резервы несущей способности.

Выводы

1. С учетом анализа прежних разработок и опыта проектирования криволинейных покрытий проведены исследования металлической цилиндрической сетчатой оболочки с торцевым креплением по краям. На основании результатов моделирования и расчета принято решение увеличить жесткость нижних граней путем изменения профиля опорных элементов.

2. Определено позитивное влияние продольного укрепления на загруженность участков и устойчивость поверхности.

3. Выявлены характерные особенности и закономерности поведения системы в рамках изменения общего состояния и значений полученных расчетных величин. Зафиксировано частичное смещение зон наибольшей концентрации внутренних силовых факторов и параметров деформирования.

4. Достигнуто ощутимое повышение эксплуатационных качеств и рациональное перераспределение показателей работы конструкции.

Литература

1. III Форум Building Skin Russia 2019 // 3-й Международный форум технологий и элементов внешних оболочек зданий, 2019. URL: fasad-rus.ru/bsr/index.php.

2. Application of circular surfaces to the architecture of the building, structures and products // Cylindrical surfaces for social significant architectural projects in Cameroon, 2015 URL: researchgate.net/publication/302934584.

3. Rynkovskaya M., Simo D. Cylindrical surfaces for social significant architectural projects in Cameroon // 3rd International Scientific Conference "MoNGeometrija 2012". pp. 487-498.

4. Great Court at the British Museum // Foster and Partners, 2000 URL: fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/.



5. 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.

6. 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.

7. Gotsulyak E.A., Siyanov A.I. Stability and nonlinear deformation of cylindrical grids // International Applied Mechanics. 2004. Volume 40, Issue 4, pp. 426-431. URL: researchgate.net/publication/226437755.

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. Сиянов А.И. Моделирование и расчет подкрепленной цилиндрической сетчатой оболочки // Промышленное строительство и инженерные сооружения. 2017. №4. С. 16-19.

10. Программы для расчета и проектирования конструкций // LiraLand Group, 2019 URL: liraland.ru/.

References

1. III Forum Building Skin Russia 2019 [3-у Mezhdunarodnyy forum tekhnologiy i ehlementov vneshnikh obolochek zdaniy] URL: fasad-rus.ru/bsr/index.php (accessed 26-27.02.19).

2. Application of circular surfaces to the architecture of the building, structures and products [Cylindrical surfaces for social significant architectural projects in Cameroon] URL: researchgate.net/publication/302934584 (accessed 12/09/15).



3. 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.
4. Great Court at the British Museum [Foster and Partners] URL: fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/ (accessed 05/02/00).
5. Shumeyko V.I., Kudinov O.A. Inzenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164.
6. Krasnobaev I.A., Mayatskaya I.A., Aaron Ikuru Godfrey. Inzenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1667.
7. Gotsulyak E.A., Siyanov A.I. International Applied Mechanics. 2004. Volume 40, Issue 4, pp. 426-431.
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. Siyanov A.I. Promyshlennoe stroitel'stvo i inzhenernye sooruzheniya. 2017. №4. С. 16-19.
10. Programmy dlya rascheta i proektirovaniya konstruktsiy [LiraLand Group] URL: liraland.ru/ (accessed 13/08/19).