

Влияние наружных бортовых элементов на состояние цилиндрической сетчатой оболочки

А.И. Сиянов, Д.К. Ярошевич

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

Аннотация: Исследовано состояние металлической цилиндрической сетчатой оболочки с наружными горизонтальными фермами. Рассмотрены основные принципы формообразования конструкции с учетом использования опорного ребра для совмещения граней сетчатой поверхности. Проведен анализ значимых силовых факторов и параметров деформирования подкрепленной оболочки с учетом всех возможных комбинаций нагрузок. Определены закономерности работы системы и оценено влияние расположения опорных ферм на поведение конструкции. Выявлены уязвимые участки с максимальными продольными силами в элементах и наибольшими перемещениями узлов. Получено увеличение жесткости из плоскости оболочки в поперечном направлении и зафиксировано позитивное перераспределение усилий по поверхности. Установлен приемлемый результат с позиций обеспечения устойчивости конструкции и отмечена повышенная сопротивляемость оболочки к деформированию.

Ключевые слова: цилиндрическая сетчатая оболочка, бортовые элементы, горизонтальные фермы, расчетные параметры, усилия, перемещения.

Введение

В строительстве рациональными многоэлементными конструкциями считаются цилиндрические сетчатые оболочки. Их криволинейная форма является востребованной у заказчиков, поскольку имеет современный внешний вид и может применяться в качестве покрытий зданий и сооружений [1–3]. Однако, благодаря пространственной структуре, каждый элемент цилиндрической сетки по-разному воспринимает приложенную нагрузку но, так или иначе, оказывается задействованным в работе. В таком случае одни элементы работают достаточно активно, другие почти не нагружены [4]. Так образуются отдельные участки с неравномерными перемещениями характерных узлов. Эта ситуация формирует проблему, которая проявляется при неоправданном увеличении размеров конструкций, когда проектировщики игнорируют рекомендуемые соотношения

геометрических параметров и принимают ошибочные решения по сбору нагрузок.

В научной литературе [4, 5] встречаются подходы, направленные на обеспечение равномерности работы оболочек, уменьшение силовых факторов и параметров деформирования. Известна информация [6] о принятии конкретного конструктивного решения, направленного на использование дополнительных элементов, расположенных в опорных участках. Однако выявленное предложение имеет ограниченную реализацию и до настоящего времени остается без подтверждения его результативности. Как следствие в рамках данной статьи выполнено построение конечно-элементной модели, осуществлен расчет, получены и проанализированы числовые параметры силовой работы оболочки с возможной схемой подкрепления опорных участков.

Формирование конструкции

В качестве объекта исследований выбрана схема оболочки с рекомендуемыми соотношениями геометрических параметров (табл. 1) [7, 8].

Таблица 1

Параметры цилиндрической сетчатой оболочки

Размеры в плане $B \times L$, м	Стрела подъема f , м	Размеры ячейки $l \times h$, м	Угол описанной окружности α , в градусах	Количество, шт		Угол между элементами φ , в градусах	Сталь
				панелей n	граней m		
24×30	6,93	3,65×3,75	120	8	8	43,97	C245

Сетчатая поверхность сформирована системой ортогональных ребер с диагональными элементами. В целях технологичности и экономии материала выбрана наиболее приемлемая для сборки круговая форма по направлению дуги. Расстояние между узлами в продольном и поперечном направлениях принято одинаковое с образованием ячеек, разделенных раскосами на

смежные треугольники. Таким образом, в плане получено равное количество граней и панелей. Снижение коррозионных рисков обеспечено заданием трубчатых профилей. Геометрическая неизменяемость системы обеспечена опорным закреплением по вертикали, полным запретом перемещений в одной угловой точке и частичным наложением связей по направлениям осей в остальных угловых точках.

Равномерное распределение по поверхности расчетных характеристик обеспечено путем использования опорных ферм, присоединенных к нижним ребрам конструкции. Грани подкрепления расположены в горизонтальном направлении, а их сетка конструктивно соответствовала граням оболочки. Опорные фермы выполнены из труб и прикреплены к несущей системе десятью стержнями из стали круглого сечения, в соответствии с рис. 1.

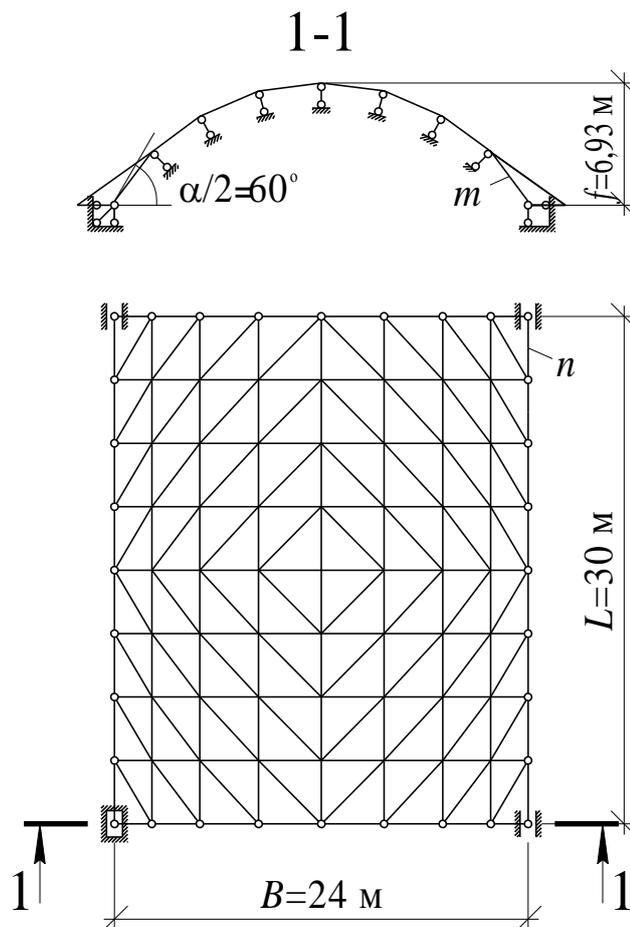


Рис. 1 – Схема цилиндрической сетчатой оболочки

Конечно-элементная модель

Идеализированная сетчатая система представлена в виде конечно-элементной модели, построенной методом вращения поверхностей в программном комплексе ЛИРА [9, 10].

Жесткость каждому элементу задана из имеющегося программного сортамента путем выбора и назначения рационального стального профиля. Элементы системы и опорных ферм смоделированы из труб в горячекатаном бесшовном варианте.

Для соединения несущей и подкрепляющей конструкции использована круглая сортовая сталь.

Общая неизменяемость геометрической формы обеспечена связями, наложенными на контурные опорные узлы.

Собственный вес оболочки определен на основании назначенных характеристик жесткости элементов. Распределенные нагрузки с учетом возможных комбинаций переведены через грузовые площади в сосредоточенные узловые силы.

Расчет проведен для конструкции, подкрепленной опорными фермами в горизонтальном направлении. Причем контурные ребра входили в состав поясов подкрепляющих граней, что предполагало использование бортовых элементов и наружное горизонтальное расположение опорных ферм.

Подкрепленная система оценена по степени активности силовой работы и уязвимости к деформациям.

Влияние опорных ферм на общее состояние конструкции определено по внутренним усилиям в элементах, линейным перемещениям узлов и распределению их по поверхности.

Расчетные параметры и результаты

В результате выполненных расчетов получены и проанализированы деформированные схемы оболочки, характерные мозаики усилий и

перемещений, эпюры внутренних силовых факторов. На основании расчетных параметров выявлена уязвимость отдельных участков, определены закономерности и максимальные показатели работы конструкции под нагрузкой, оценено влияние расположения опорных ферм на поведение оболочки. Причем максимальные усилия зафиксированы в средних элементах нижних ребер, а наибольшие отклонения получил равноудаленный от торцов узел средних ребер.

На рис. 2 показаны диаграммы с максимальными показателями работы исходной и подкрепленной оболочки.

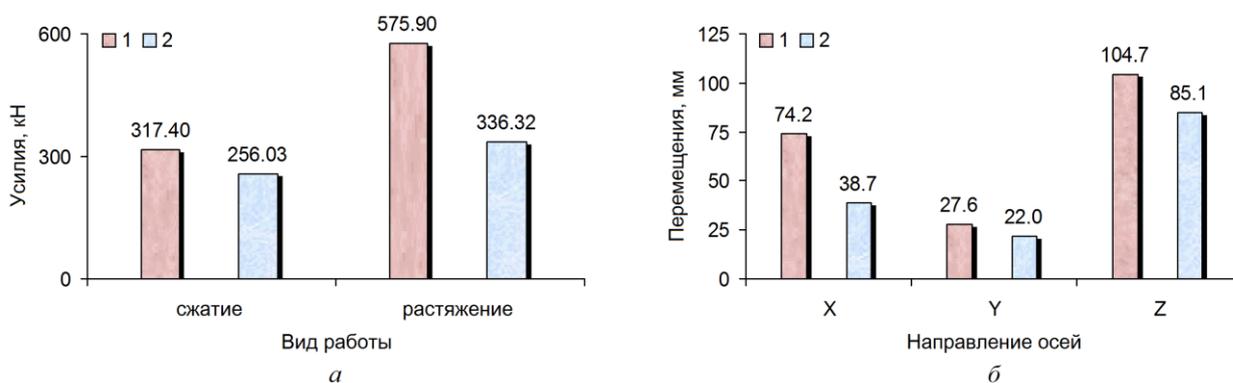


Рис. 2 – Максимальные усилия в элементах (а) и максимальные перемещения узлов (б) оболочки: 1 – исходной; 2 – подкрепленной

Как показали выполненные исследования, схема подкрепления в виде наружных горизонтальных ферм существенно повлияла на работу конструкции. Направленные от центра пролета дополнительные грани придали большей жесткости плоскости оболочки в поперечном направлении. С использованием такого вида подкрепления зафиксировано позитивное перераспределение усилий по поверхности и достигнуто значительное уменьшение максимальных силовых факторов и параметров деформирования. За счет введения наружных горизонтальных ферм,

перестроилась форма конструкции, о чем свидетельствует центральное перемещение, которое выявлено в нижнем ребре верхних граней.

Наибольшие усилия зафиксированы преимущественно в растянутых элементах. Сопоставление максимальных продольных сил разных знаков показало неравномерность работы наиболее нагруженных элементов. Отмеченная тенденция привела к одностороннему искривлению системы и значительному перемещению уязвимых узлов. Из всех возможных направлений работы конструкции в пространстве наибольшего изменения претерпела геометрия оболочки по направлению вертикали. Поперечное расползание и продольное смещение узлов в меньшей степени повлияли на схему изменения формы. Из проведенных исследований выявлено, что в оболочке, подкрепленной наружными горизонтальными фермами, параметры деформирования имеют приемлемый результат с позиций обеспечения требуемой жесткости и устойчивости конструкции.

Выводы

1. Исследовано состояние металлической цилиндрической сетчатой оболочки с наружными горизонтальными фермами, имеющими общее ребро с нижней гранью сетчатой поверхности и жестко объединенными с пространственной системой с помощью подвесок.

2. Проведен анализ силовых факторов и параметров деформирования подкрепленной оболочки с учетом возможных комбинаций нагрузок. Определены закономерности работы системы и оценено влияние расположения опорных ферм на поведение конструкции. Выявлены уязвимые участки с максимальными продольными силами в элементах и наибольшими перемещениями узлов.

3. Получено увеличение жесткости из плоскости оболочки в поперечном направлении и зафиксировано позитивное перераспределение усилий по поверхности. Установлен приемлемый результат с позиций

обеспечения устойчивости конструкции и отмечена повышенная сопротивляемость оболочки к деформированию.

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.
2. A Jewel on Progress // *Company Construction Systems* URL: mero.de/index.php/en/construction-systems/references-en/36-space-structures/847-the-carpenter-s-church.
3. MERO / ION Orchard // *Project Details*. MERO ASIA PACIFIC. URL: mero.com.sg/project_references/ion-orchard.
4. Попов И.Г. Цилиндрические стержневые системы. Л.; М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и арх-ре, 1952. 112 с.
5. Патцельт О. Стальные решетчатые пространственные конструкции. М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1970. 95 с.
6. Таиров В.Д. Сетчатые пространственные конструкции. Киев: Будівельник, 1966. 75 с.
7. 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.
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. LiraLand Group URL: liraland.ru/lira/systems/km.php.
10. Программа для проектирования и расчета строительных конструкций // LiraLand Group URL: liraland.ru/lira/.

References

1. Zhou H., Zhang Y., Fu F., Wu J. Materials. 2020. Volume. 13 (11). URL: preprints.org/manuscript/202005.0012/v1.
2. A Jewel on Progress [Company Construction Systems]. URL: mero.de/index.php/en/construction-systems/references-en/36-space-structures/847-the-carpenter-s-church (accessed 10/01/22).
3. MERO / ION Orchard [Project Details. MERO ASIA PACIFIC]. URL: mero.com.sg/project_references/ion-orchard (accessed 10/01/22).
4. Popov I.G. Tsilindricheskie sterzhnevye sistemy [Cylindrical rod systems]. L.; M.: Gos. izd-vo lit. po str-vu i arkh-re, 1952. 112 p.
5. Pattsel't O. Stal'nye reshchatye prostranstvennyye konstruktsii [Steel net space structures]. M.: TSINIS Gosstroya SSSR, 1970. 95 p.
6. Tairov V.D. Setchatye prostranstvennyye konstruktsii [Mesh spatial structures]. Kiev: Budivel'nik, 1966. 75 p.
7. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7319.
8. Siyanov A.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6166.
9. LiraLand Group URL: liraland.ru/lira/systems/km.php (accessed 10/01/22).
10. Programma dlya proektirovaniya i rascheta stroitel'nykh konstruktsiy [LiraLand Group]. URL: liraland.ru/lira/ (accessed 10/01/22).