

Формообразование цилиндрических сетчатых оболочек

А.И. Сиянов, Д.Ю. Дылдин

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

Аннотация: В статье определены предпосылки и критерии построения рациональных форм цилиндрических сетчатых оболочек. Выявлены соотношения геометрических параметров с учетом габаритных размеров по направлению дуги. Установлено необходимое количество узловых соединений в местах контурного крепления и в средней зоне. Сформированы принципиальные положения для создания геометрических схем формирования конструкции и рассмотрены возможные варианты назначения размеров. Обоснована целесообразность применения одинаковых ячеек в рамках построения регулярной структуры сетчатой поверхности. Разработана последовательность вычисления параметров, определяющих форму конструкции.

Ключевые слова: цилиндрические сетчатые оболочки, форма конструкции, поверхности, параметры, соотношения.

Введение

Оболочечные конструкции уже более полувека пользуются значительным спросом у населения для возведения крупных и различных строительных объектов [1]. Такие конструкции рекомендуется проектировать для покрытий ангаров, крытых стоянок автотранспорта, торговых и выставочных центров, в сельском хозяйстве и промышленности.

Форма оболочек зависит от назначения, размеров площадки под строительство и определяется соотношением геометрических параметров. Как свидетельствует статистика, современные заказчики отдают предпочтение прежде всего симметричным оболочкам, образованным криволинейными системами на прямоугольном плане.

Наиболее рациональной и функциональной считают форму конструкции в виде цилиндрической сетчатой поверхности [2]. Главные фундаментальные работы в сфере формообразования указанных конструкций принадлежат инженерам и ученым прошлого столетия [3-5]. Между тем, в последние годы заметно вырос интерес к сетчатым оболочкам круговой формы [6, 7].

Цель и задачи исследований

Совершенствование имеющихся конструктивных решений и повышение эксплуатационных качеств позволило сформулировать цель исследований, которая заключалась в уточнении формообразующих принципов построения геометрически рациональных круговых конструкций. Установление параметров, отвечающих за порядок определения размеров оболочек, разработка геометрических схем с учетом особенностей построения сетчатых поверхностей составило задачи исследований.

Порядок определения параметров

Процесс построения круговой поверхности предполагал наличие заданного радиуса кривизны и угла описанной окружности оболочки. С введением регулярной сетки поверхность разбивалась на нужное количество ячеек вдоль дуги окружности и по направлению образующей. Введены квадратные ячейки с раскосом [8], который позволил получить два одинаковых треугольника. Следовательно число элементов в узлах в плане таким образом составило 2, 4, 5 или 6 (рис. 1).

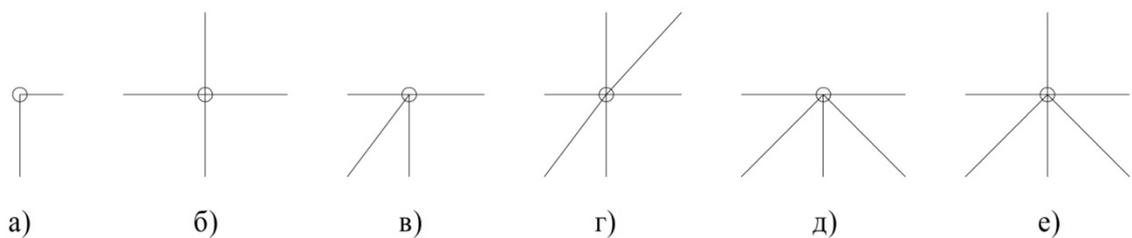


Рис. 1. Число элементов в узлах в плане круговой цилиндрической сетчатой оболочки: а – два; б, в – четыре; г, е – шесть; д – пять; кружочками показаны узловые вставки

В соответствии с технологическими требованиями и для устойчивости формы, круговая поверхность цилиндрических сетчатых оболочек принята симметричной с ячейками из продольных, поперечных и диагональных элементов [9].

Как уже отмечалось ранее [10], размер ячеек a или шаг элементов в направлении длины и ширины конструкции принят одинаковым.

При заданной ширине B и стреле подъема (высоте) f оболочки и их рациональном соотношении $B/f = 2 \dots 5$ [2], установлена последовательность построения конструкции и определен ряд формообразующих параметров.

Так, согласно геометрическим соотношениям, длина элементов вдоль дуги окружности

$$h = 2R \sin \alpha_0, \quad (1)$$

где R – радиус кривизны; α_0 – угол между элементом по направлению дуги оболочки и уровнем горизонтальной плоскости.

Откуда

$$\sin \alpha_0 = h / 2R; \quad \alpha_0 = \sin^{-1}(h / 2R) = \arcsin(h / 2R). \quad (2)$$

Тогда получим центральный угол α и дополнительный угол α_1 (рис. 2):

$$\alpha = 2\alpha_0, \quad \alpha_1 = 90^\circ - \alpha_0. \quad (3)$$

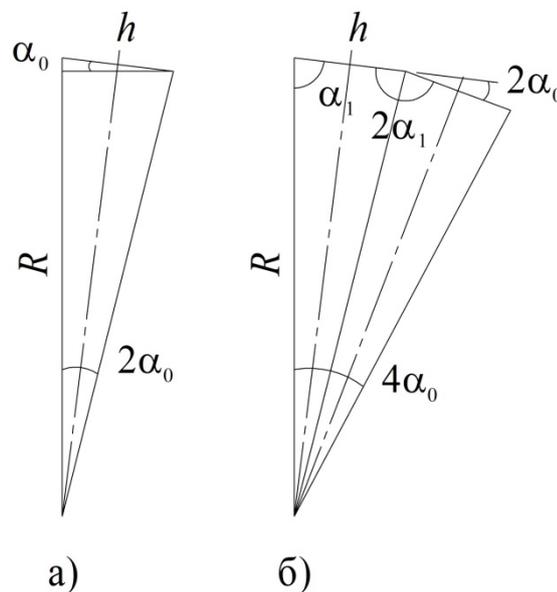


Рис. 2. Геометрические параметры построения элементов вдоль дуги:

а – одного; б – двух смежных

Для наглядности приведен конкретный пример с определением геометрических параметров оболочки. В качестве исходных данных принят

радиус кривизны $R = 22,5$ м и размер ячейки $a = h = 3,011$ м,

После их подстановки, получены следующие значения:

$$\sin \alpha_0 = h / 2R = a / 2R = 3,011 / 2 \cdot 22,5 = 0,06692;$$

$$\alpha_0 = \sin^{-1}(h / 2R) = \arcsin(h / 2R) = \arcsin 0,06692 = 3,837^\circ;$$

$$\alpha = 2\alpha_0 = 2 \cdot 3,837^\circ = 7,674^\circ,$$

$$\alpha_1 = 90^\circ - \alpha_0 = 90^\circ - 3,837^\circ = 86,163^\circ.$$

Порядок определения показателей от коньковой зоны до опорных граней вдоль дуги оболочки приведен в таблице 1.

Таблица 1

Пример расчета показателей конструкции

n^*	$n\alpha_0$	$\sin n\alpha_0$	$\cos n\alpha_0$
1	3,839	0,06700	0,99777
3	11,512	0,19957	0,97990
5	19,186	0,32863	0,94447
7	26,860	0,45181	0,89213

Примечание: n^* – коэффициент увеличения угла α_0 между элементом по направлению дуги и уровнем горизонтальной плоскости от верхней до нижней грани.

Следовательно, формообразующими параметрами цилиндрической сетчатой конструкции будут радиус кривизны R , размер ячейки a , ширина B , высота f , центральный угол α , угол между элементом по направлению дуги и горизонтальной плоскостью α_0 в верхней зоне, а также угол α_1 . Их рациональные соотношения оказались следующими: $a / 2R = 0,06692$, $\alpha = 2\alpha_0 = 7,674^\circ$, $\alpha_1 = 90^\circ - \alpha_0 = 86,163^\circ$, $f = (1/2...1/5)B$.

По установленным параметрам и уточненным принципам создания конструкций выполнено формообразование и расчет неподкрепленных круговых сетчатых оболочек шириной 24 м.

Оценка устойчивости выполнена для конструкций с прямоугольными и квадратными ячейками.

Габаритный размер по направлению образующей принят в зависимости от соотношений продольных l и поперечных h элементов в пределах длины оболочки $L = 30 \dots 32,28$ м. Однако в случае использования одинаковых элементов вдоль длины и ширины, то есть $l = h$, величина L осталась фиксированной на уровне 30 м.

Соответствие параметров построения приведено в таблице 2.

Таблица 2

Габариты конструкции, размеры ячеек и их соотношения

B/f	3,5	3,1	2,9	2,6	3,5	3,1	2,9	2,6	2,9	2,6
l	5,00	5,00	5,00	5,00	3,75	3,75	3,75	3,75	3,00	3,00
$a(h)$	4,8	5,00	5,16	5,38	3,62	3,74	3,89	4,05	3,11	3,24
l/h	1,04	1,00	0,97	0,93	1,04	1,00	0,96	0,93	0,96	0,93

Значения, указанные в таблице 2 характеризуются определенной повторяемостью, что свидетельствует об одинаковом количестве граней вдоль длины и по направлению дуги оболочки.

Учтено изменение угловых параметров формообразования сетчатой поверхности. Соотношение габаритных размеров B/f выявлено в пределах 2,6...3,5.

Полученные показатели позволили увеличить ширину конструкции, обеспечили возможность рационального построения сетчатой поверхности и положительно повлияли на устойчивость оболочек.

Проследить за динамикой изменения характерных показателей можно на рис. 3, где приведен график зависимости коэффициента запаса устойчивости λ от соотношения B/f и формы ячеек.

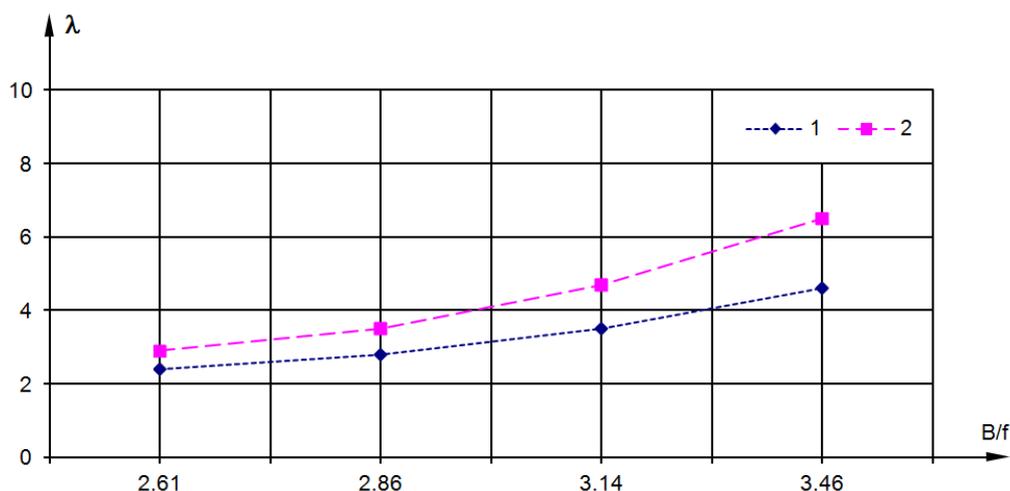


Рис. 3. Динамика изменения коэффициента запаса устойчивости λ в зависимости от B/f круговой цилиндрической сетчатой оболочки с ячейками: 1 – квадратными; 2 – прямоугольными

Представленные на рис. 3 кривые демонстрируют плавное увеличение коэффициента запаса устойчивости при росте соотношения габаритных параметров B/f . Такая динамика объясняется снижением стрелы подъема по отношению к ширине конструкции. В результате из-за повышения энергетического барьера наибольшую устойчивость показали оболочки с квадратными ячейками.

Выводы

1. Определены предпосылки и критерии построения рациональных форм цилиндрических сетчатых оболочек с учетом соотношения геометрических параметров и габаритных размеров.

2. Обоснована целесообразность применения одинаковых ячеек в рамках построения регулярной структуры сетчатой поверхности. Установлено необходимое количество узловых соединений в местах контурного крепления и в средней зоне.

3. Сформированы принципиальные положения для создания геометрических схем формирования конструкции. Рассмотрены возможные

варианты назначения размеров и разработана последовательность вычисления параметров, определяющих форму конструкции.

Литература

1. Лубо Л.Н. Руководство по проектированию и расчету покрытий нового типа – сетчатых оболочек. Л.: ЛенЗНИИЭП, 1971. 63 с.
2. Лебедев В.А., Лубо Л.Н. Сетчатые оболочки в гражданском строительстве на севере. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. 136 с.
3. Рюле Г. Пространственные покрытия (конструкции и методы возведения). Том 2. М.: Стройиздат, 1974. 247 с.
4. Попов И.Г. Цилиндрические стержневые системы. Л.; М.: Гос. издво лит. по стр-ву и арх-ре, 1952. 112 с.
5. Трущев А.Г. Пространственные металлические конструкции: учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1983. 215 с.
6. 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.
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 // *ThinWalled Structures*. 2015. Vol. 86. pp 1-9.
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., Ярошевич Д.К. Обоснование методологии расчета цилиндрической сетчатой оболочки // *Инженерный вестник Дона*, 2021, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7319.
10. Сиянов А.И., Ярошевич Д.К. Исследование параметрических соотношений в пределах безопасной работы цилиндрических сетчатых



оболочек // Инженерный вестник Дона, 2025, №1. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2025/9745.

References

1. Lubo L.N. Rukovodstvo po proektirovaniyu i raschetu pokrytiy novogo tipa – setchatykh obolochek [Guidelines for the design and calculation of roofs of a new type of mesh shells]. L.: LenZNIIEHP, 1971. 63 p.
2. 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.
3. Ryule G. Prostranstvennye pokrytiya (konstruktsii i metody vozvedeniya) [Spatial roofs (structures and methods of construction)]. Tom 2. M.: Stroyizdat, 1974. 247 p.
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. Trushchev A.G. Prostranstvennye metallicheskie konstruktsii: ucheb. posobie dlya vuzov [Spatial metal structures: manual for universities]. M.: Stroyizdat, 1983. 215 p.
6. Zhou H., Zhang Y., Fu F., Wu J. Materials. 2020. Volume. 13 (11) URL: preprints.org/manuscript/202005.0012/v1.
7. Ma H., Fan F., Wen P., Zhang H., Shen S. Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 86. pp 1-9.
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., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7319.
10. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2025/9745.

Дата поступления: 22.07.2025

Дата публикации: 27.08.2025