

Параметры критического состояния цилиндрических сетчатых оболочек

А.И. Сиянов, Д.Ю. Дылдин

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

Аннотация: В статье в рамках исследования устойчивости круговых пространственных конструкций определены параметры критического состояния цилиндрических сетчатых оболочек. Проанализированы особенности применения сплошного аналога и получена зависимость для определения величины критической нагрузки. Установлено влияние геометрических параметров на степень уязвимости и опасность искривления сетчатой поверхности. Выявлена рациональная величина пролета при фиксированной длине и заданном радиусе кривизны. Выполнено компьютерное моделирование с применением квадратных ячеек и установлены возможные формы потери устойчивости оболочек. Получено приемлемое сходство между результатами расчета сплошных и сетчатых поверхностей.

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

Введение

Металлические цилиндрические сетчатые оболочки при определенном соотношении геометрических параметров оказываются в критическом состоянии [1] и теряют устойчивость [2]. Известно, что при постепенном увеличении ширины или длины конструкции требуется оценка технического состояния поверхности с учетом фиксации или изменения других параметров. Пропорциональное увеличение геометрии часто приводит к неоправданным затратам материалов и является малоэффективным способом создания оболочки [3]. Поиск решения рекомендуется производить с помощью компьютерного моделирования путем задания параметров, которые определяют форму поперечного сечения конструкции [4].

Цель и задачи исследований

Основываясь на исследованиях в сфере теории оболочек [5] поставлена цель – определить характерные параметры, влияющие на устойчивость круговых оболочечных конструкций с учетом особенностей поведения сетчатой поверхности и ее сплошного аналога от действия приложенных

эксплуатационных нагрузок. Основными задачами такой постановки является выполнение комплексного анализа зависимостей на основании проведения числового компьютерного моделирования оболочек в рамках применения фиксированной длины, радиуса кривизны и размера ячеек с пошаговым варьированием пролета в направлении дуги.

Параметры критического состояния

Рассмотрим поверхность круговой оболочки на прямоугольном плане. Заметим, что наиболее опасным показателем исчерпания несущей способности такой конструкции следует считать величину критической нагрузки [6, 7]. На ее значение влияют различные факторы, которые при определенном сочетании позволяют обеспечить необходимую устойчивость пространственной конструкции.

Зафиксируем схему крепления на контуре в местах расположения опорных узловых соединений и запишем зависимость

$$q = f(E, \Gamma), \quad (1)$$

где q – величина критической нагрузки; E и Γ – параметры, соответственно учитывающие материал и размеры пространственной конструкции.

Причем для круговой сетчатой поверхности, которая может использоваться в качестве покрытия [8] следует учесть еще и степень заполнения сетки. Поэтому введем коэффициент s , который способен усилить жесткость системы.

Благодаря такой геометрической форме конструкция стержневой круговой оболочки работает в обоих направлениях. Для нее следует обеспечить удачное соотношение изгибной EI и тангенциальной EA жесткостей. Здесь E – модуль упругости материала; I и A – соответственно момент инерции и площадь поперечного сечения стержня.

С учетом толщины h сплошной конструкции и размера a ячейки

стержневого аналога осуществим переход от континуальной к сетчатой поверхности. Тогда эквивалентные жесткости примут вид:

$$D \sim \frac{EIs}{a}, \quad Eh \sim \frac{EAs}{a}. \quad (2)$$

Обеспечим кривизну системы радиусом R и с учетом количества полуволин n , m в двух направлениях, а также параметров αR и L , которые отвечают за габариты конструкции, будем иметь:

$$q = \frac{EAs}{aR}(C + TK), \quad (3)$$

где параметр C содержит изгибную, а T и K – тангенциальную жесткости соответственно.

$$C = \frac{I}{A} \left(\frac{\pi \alpha R}{nL^2} + \frac{n\pi}{\alpha R} \right)^2, \quad T = \frac{(\alpha R)^2}{\left(1 + \frac{n^2 L^2}{(\alpha R)^2} \right)^2}, \quad K = \frac{1}{R^2 n^2 \pi^2}. \quad (4)$$

В таком случае для сетчатой оболочки представим критическую нагрузку q с учетом коэффициента заполнения сетки s , размера a ячейки и показателей I , A сечения стержней:

$$q = f(E, \Gamma, s). \quad (5)$$

На основании полученных соотношений геометрических параметров проведено компьютерное моделирование [9, 10] и выполнены расчеты исследуемых конструкций с заданными геометрическими параметрами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1

Геометрические параметры компьютерных моделей круговых оболочек

L , м	R , м	a , м	a^* , м
36,132	22,5	3,011	0,36

Примечание: * a – размеры ячейки сплошной конструкции.

С помощью системы поверхностей вращения создано 10 расчетных

схем (по 5 расчетных схем на каждый тип поверхности) с различными значениями ширины B (расстояния между опорными узлами по направлению дуги) оболочки: 17,358 м; 22,671 м; 27,590 м; 32,029 м; 35,911 м.

Для построения необходимых конечно-элементных моделей использована стандартная база типов жесткостей. Сетчатым моделям задан квадратный тип решетки с диагональным элементом в середине, причем всем стержням назначено поперечное сечение в форме прокатного трубчатого профиля. В качестве материала выбрана сталь ВСт3пс4 (модуль упругости $E = 2,1 \times 10^5$ МПа). Граничные условия обеспечены шарнирным креплением по контуру в рамках обеспечения геометрической неизменяемости. Сосредоточенные узловые силы на оболочку определены с учетом наиболее невыгодных сочетаний нагрузок.

После компьютерного моделирования выполнен расчет и выявлены общие закономерности работы конструкций. Исходя из полученных результатов, принято решение скорректировать характеристики жесткости.

Ориентиром для подбора толщины сплошных систем и критерием для выбора размеров сечения элементов сетчатых оболочек стали усилия в элементах и перемещения узлов характерных участков круговых многоэлементных моделей.

Проведенный расчет показал незначительную разницу между величинами критической нагрузки q для сплошных и сетчатых конструкций (рис. 1). Число полуволн $n = 2, 3$ и 4 формы потери устойчивости выявлены в направлении дуги. Искривление поверхности наглядно получено в стержневых оболочках вследствие фиксации радиуса кривизны и размера ячейки.

В целом резкие отклонения в значениях критической нагрузки q возможны, но при условии нарушения пропорциональности увеличения параметров сечения обоих типов поверхностей.

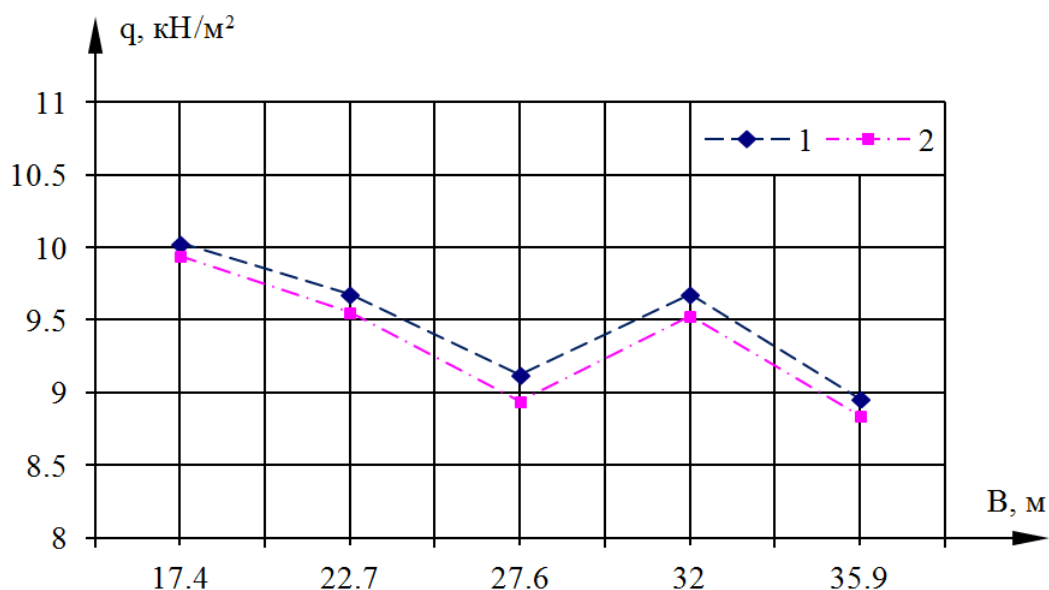


Рис. 1. График зависимости величины критической нагрузки q от ширины B круговых оболочек на прямоугольном плане: 1 – сетчатых; 2 – сплошных

Однако на практике рекомендуется ограничивать ширину B оболочки величиной 24 м. Причем, в случае использования приведенных выше параметров, предельным показателем является меньшее значение ширины B (22,671 м).

Выводы

1. В рамках исследования устойчивости круговых пространственных конструкций определены параметры критического состояния цилиндрических сетчатых оболочек.

2. Проанализированы особенности применения сплошного аналога и получена зависимость для определения величины критической нагрузки. Установлено влияние геометрических параметров на степень уязвимости и опасность искривления сетчатой поверхности.

3. Выявлена рациональная величина пролета при фиксированной длине и заданном радиусе кривизны. Выполнено компьютерное моделирование с применением квадратных ячеек и установлены возможные формы потери

устойчивости оболочек. Получено приемлемое сходство между результатами расчета сплошных и сетчатых поверхностей.

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. 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.
 3. Лубо Л.Н. Руководство по проектированию и расчету покрытий нового типа – сетчатых оболочек. Л.: ЛенЗНИИЭП, 1971. 63 с.
 4. 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.
 5. Пшеничников Г.И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок. М.: Наука, 1982. 352 с.
 6. 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.
 7. 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.
 8. Рюле Г. Пространственные покрытия (конструкции и методы возведения). Том 2. М.: Стройиздат, 1974. 247 с.
 9. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций: АСВ, 2009. 360 с.
 10. ЛИРА Софт URL: lira-soft.com/news/novovvedeniya-lira-10-12/.
-

References

1. Zhou H., Zhang Y., Fu F., Wu J. Materials. 2020. Volume. 13 (11) URL: preprints.org/manuscript/202005.0012/v1.
2. Ma H., Fan F., Wen P., Zhang H., Shen S. Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 86. pp. 1-9.
3. 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.
4. Siyanov A.I., Rynkovskaya M.I., Abu Mahadi M.I., Mathieu G.O. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017. №7S. pp. 365-376.
5. Pshenichnov G.I. Teoriya tonkikh uprugikh setchatykh obolochek i plastinok [Theory of thin elastic mesh shells and plates]. M.: Nauka, 1982. 352 p.
6. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7319.
7. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2025/9745.
8. Ryule G. Prostranstvennye pokrytiya (konstruktsii i metody vozvedeniya) [Spatial roofs (structures and methods of construction)]. Tom 2. M.: Stroyizdat, 1974. 247 p.
9. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. Komp'yuternye modeli konstruktsiy [Computer models of structures]. ASV, 2009. 360 p.
10. LIRA Soft. URL: lira-soft.com/news/novovvedeniya-lira-10-12/ (accessed 28/07/25).

Дата поступления: 6.07.2025

Дата публикации: 27.08.2025