

Исследование параметров подкрепленных цилиндрических сетчатых оболочек в пределах обеспечения устойчивости

А.И. Сиянов, Д.К. Ярошевич

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

Аннотация: В статье исследованы параметры рационального использования дополнительных опорных граней подкрепленных цилиндрических сетчатых оболочек. Выполнена оценка особенностей формообразования и обоснован выбор топологии поверхности в пределах обеспечения устойчивости конструкции. Предложены рекомендуемые соотношения габаритных размеров и сформированы соответствующие расчетные модели. Приведены критерии определения чувствительности сетки с учетом дополнительных опорных граней и выполнения условий предельных состояний. Получен диапазон приемлемой кривизны и геометрических параметров для создания подкрепленных цилиндрических сетчатых оболочек. Проанализировано влияние повышения жесткости и увеличения стрелы подъема на показатели работы сетчатой поверхности. Выявлены характерные закономерности изменения узловых отклонений и внутренних силовых факторов уязвимых участков.

Ключевые слова: цилиндрические сетчатые оболочки, дополнительные опорные грани, формообразование, соотношения параметров, подкрепление, устойчивость.

Введение

Информация последних десятилетий свидетельствует о повышенном интересе к использованию в строительстве цилиндрических сетчатых оболочек [1]. Их уникальная форма давно уже привлекает потенциальных заказчиков. Однако такие конструкции [2], вследствие уязвимости отдельных участков, характеризуются установленными ограничениями габаритных размеров.

Стремление увеличить хотя бы один из параметров приводит к необходимости применять конструктивные мероприятия [3]. Можно повысить степень заполнения сетки или увеличить площадь поперечного сечения стержней. Однако более рациональным считается использование дополнительных элементов [4]. Для усовершенствования конструкции и расширения функциональности при эксплуатации предложено присоединять наружные опорные грани. Главным фактором здесь выступают соотношения

геометрических параметров. Изменяя их, можно определить уровень расчетных состояний и проверить систему на устойчивость.

Поставленные задачи актуальны, поскольку их решение и дальнейший анализ результатов позволят выявить границы рационального использования наружных граней в опорных участках.

Начальные положения

Из литературных источников известны разработки различных сетчатых поверхностей [5]. Известна информация о том, что каждая сетка имеет присущие только ей свойства и видоизменяется под действием нагрузок в зависимости от схемы пересечения стержней [6].

Путем сравнения особенностей работы сетчатых поверхностей в статье принята схема сетки с ортогональными ребрами и диагональными элементами, поскольку доказано, что именно она позволяет обеспечить максимальную экономичность конструктивного решения [7].

Ширина B сетки или расстояние между опорными узлами по направлению дуги является функцией радиуса R и угла α описанной окружности:

$$B = \Phi(R, \alpha). \quad (1)$$

Согласно исследованиям геометрических параметров, в зависимости от жесткости конструкции, длина L оболочки напрямую связана с шириной B и получена в заранее определенных пределах: $L = (1,2...1,4)B$. Аналогично ширина B является величиной зависимой, которая в 3...5 раз превышает стрелу подъема f . Проведенный анализ показал, что рационально принять габаритные размеры оболочки в плане $B \times L = 24 \times 30$ м, и получить соответствующее выражение $L = 1,25B$.

В опорных участках для подкрепления конструкции предусмотрены расположенные наружу дополнительные грани размером $2,2 \times 30$ м.

Для изготовления элементов задан тонкостенный бесшовный трубчатый профиль из стали С235.

Крепление узловых соединений принято в шарнирном варианте, с обеспечением геометрической неизменяемости [8].

Включение конструкции в работу осуществлено с учетом всех невыгодных сочетаний нагрузок.

Формообразование сетки в пределах обеспечения устойчивости

Использован метод вращения поверхностей [9] и выполнено компьютерное конечно-элементное моделирование. На рис. 1 показана последовательность формообразования сетки.

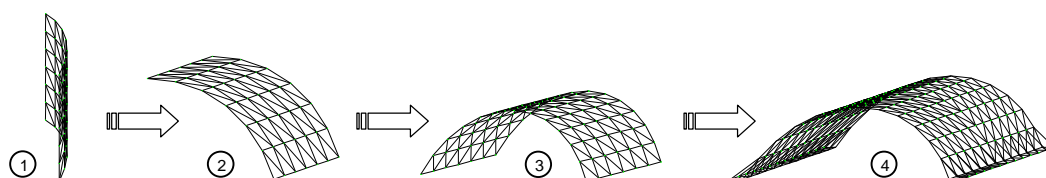


Рис. 1. Этапы конечно-элементного моделирования оболочки

В процессе создания моделей и последующих расчетов проанализировано влияние плотности расположения элементов в пределах обеспечения устойчивости.

На основании проведенного анализа определена бесцельность сгущения сетки лишними ячейками, тем более при наличии введения дополнительных элементов. Как следствие, разрежение поверхности принято на основании тестовых примеров, а изменение высоты конструкции проконтролировано проверкой ее устойчивости по условию [10].

$$a^2/Ri = a^2 8f / (B^2 + 4f^2) i < 9, \quad (2)$$

где a – размер ячейки по направлению образующей; i – радиус инерции поперечного сечения стержня.

Чувствительность сетки определена путем изменения угла α описанной

окружности, радиуса кривизны R и стрелы подъема f . Пределы изменения отражены параметрами n и λ :

$$n = [2, 4]; \lambda \in [0, \Lambda]. \quad (3)$$

где n – число полуволовн по направлению дуги; λ – коэффициент запаса устойчивости; Λ – число, которого параметр λ способен достичь.

Вдоль дуги и по направлению образующей принято 12 ячеек (меньшее их количество не выдержало проверку устойчивости, а большее – привело к неоправданным расходам материала).

Таким образом, поиск целесообразности применения указанного способа подкрепления позволил определить границы возможной кривизны ($1/R = 0,059...0,076$) и исходные показатели геометрии оболочки (табл. 1).

Таблица 1

Параметры подкрепленных оболочек

Номер модели	α , град.	R , м	f , м
1	90	16,97	4,97
2	100	15,66	5,6
3	110	14,65	6,25
4	120	13,86	6,93
5	130	13,24	7,64

Полученное ограничение угла α выявлено из условия проверки устойчивости (2) и результатов определения параметров деформирования. В частности использование дополнительных граней в конструкции с минимальной стрелой подъема ($f = 4,97$ м) существенно улучшило работу системы, повысив жесткость опасных участков более чем в 1,5 раза. Первые три модели позитивно отреагировали на введенное подкрепление. Только четвертая схема ($\alpha = 120^\circ$, $R = 13,86$ м, $f = 6,93$ м) не показала существенных изменений от дополнительных граней. В завершение выполнена проверка

устойчивости пятой модели, по результатам которой сделан вывод о необходимости увеличения радиуса инерции и поперечного сечения стержней. Максимальные узловые отклонения в характерных местах такой модели от введения дополнительных граней сокращены существенно и с ощутимой разницей в двух главных направлениях (x, z).

В отличие от предыдущих исследований [8], выявлена рациональность использования оболочек с кривизной $1/R = 0,068..0,076$ при начальном значении угла $\alpha = 110^\circ$. И если при отсутствии подкрепления предложено поднимать угол α от 120° до 150° , то в случае введения наружных граней достаточно ограничить угол α , оставив его на уровне 130° .

Изменение указанных параметров несколько повлияло на размеры ячеек, что привело к использованию различных величин нагрузок и, как следствие, к существенному (на 54,9 %) изменению значения коэффициента запаса λ .

Форма возможного наступления критического состояния конструкции в случае наличия опорных граней для первых четырех указанных моделей оказалась более уязвимой, показав 3 полуволны по направлению дуги и 1 полуволну вдоль образующей.

Более устойчивый характер выявлен в пятой модели, стрела подъема которой обеспечила повышение жесткости конструкции и рост числа полуволн вдоль дуги.

Основанием для определения рациональных параметров стало сравнение опасных перемещений узлов, зафиксированных в моделях.

Из графиков на рис. 2 видно, что все модели положительно отреагировали на включение в работу дополнительных граней.

Предложенное подкрепление обеспечило равномерный характер изменения максимальных перемещений узлов, достигнуто повышение жесткости и уменьшение чувствительности конструкций.

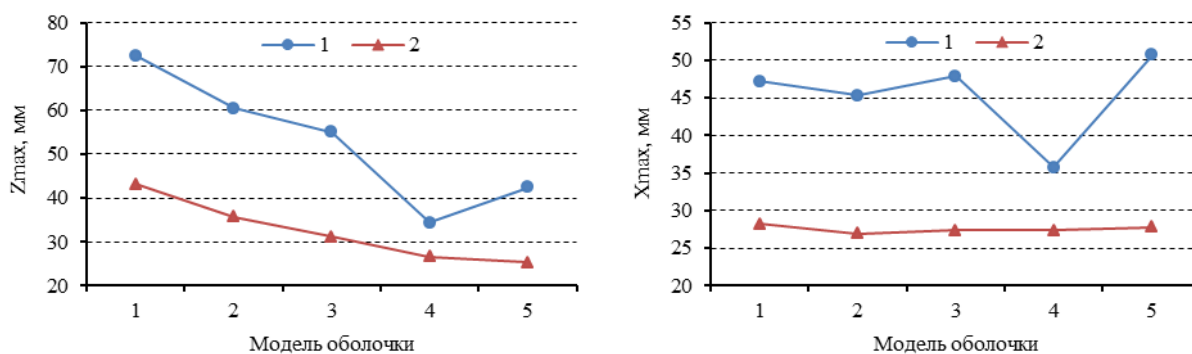


Рис. 2. Динамика изменения максимальных перемещений узлов моделей:
1 – неподкрепленных; 2 – с дополнительными гранями

Отмеченные показатели деформирования стали результатом работы элементов в рамках изменения геометрических параметров. Зафиксировано позитивное влияние дополнительных граней на распределение усилий по поверхности. Особенно показательным явилось то, что в каждой оболочке сокращен разрыв между параметрами максимально растянутых и максимально сжатых стержней. Выполненные проверки несущей способности выявили соответствие условиям предельных состояний.

Выводы

1. Путем конечно-элементного моделирования, расчета и анализа цилиндрических сетчатых оболочек исследованы параметры рационального использования дополнительных граней.

2. Выполнена оценка особенностей формообразования конструкции в пределах обеспечения устойчивости. Обоснован выбор топологии поверхности и предложены рекомендуемые соотношения габаритных размеров $L/B = 1,25$, $B = 3...5f$.

3. Приведены критерии определения чувствительности сетки с учетом дополнительных опорных граней и выполнения условий предельных состояний.

4. Получен диапазон приемлемой кривизны $1/R = 0,068..0,076$ и ряд параметров α , R , f для создания подкрепленных цилиндрических сетчатых оболочек.

5. Проанализировано влияние повышения жесткости и увеличения стрелы подъема на показатели работы сетчатой поверхности. Выявлены характерные закономерности изменения узловых отклонений и внутренних силовых факторов уязвимых участков.

Литература

1. 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.

2. 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.

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. Патцельт О. Стальные решетчатые пространственные конструкции. М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1970. 95 с.

5. Трущев А.Г. Пространственные металлические конструкции: учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1983. 215 с.

6. Рюле Г. Пространственные покрытия // *Конструкции и методы возведения*. Том 2. М.: Стройиздат, 1974. 247 с.

7. Сиянов А.И., Сивков Д.В., Ярошевич Д.К. Подход к оптимизации цилиндрического стержневого покрытия // *Инженерный вестник Дона*, 2022, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7836.

8. Попов И.Г. Цилиндрические стержневые системы. Л.; М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и арх-ре, 1952. 112 с.



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

10. Лебедев В.А., Лубо Л.Н. Сетчатые оболочки в гражданском строительстве на севере. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. 136 с.

References

1. Ma H., Fan F., Wen P., Zhang H., Shen S. Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 86. pp. 1-9.

2. Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7319.

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. Patsel't O. Stal'nye reshchatye prostranstvennyye konstruktsii [Steel net space structures]. M.: TSINIS Gosstroya SSSR, 1970. 95 p.

5. Trushchev A.G. Prostranstvennyye metallicheskie konstruktsii: ucheb. posobie dlya vuzov [Spatial metal structures: manual for universities]. M.: Stroyizdat, 1983. 215 p.

6. Ryule G. Prostranstvennyye pokrytiya. Konstruktsii i metody vozvedeniya [Spatial roofs. Constructions and methods of construction]. Vol. 2. M.: Stroyizdat, 1974. 247 p.

7. Siyanov A.I., Sivkov D.V., Yaroshevich D.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7836.

8. Popov I.G. Tsilindricheskie sterzhnevyye sistemy [Cylindrical rod systems]. L.; M.: Gos. izd-vo lit. po str-vu i arkh-re, 1952. 112 p.

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

10. 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.

Дата поступления: 13.10.2024

Дата публикации: 27.11.2024