

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 112–119.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 112–119.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.074.433

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-112-119

EDN: JCAХAA

РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЕТЧАТЫХ ПОКРЫТИЙ С УЧЕТОМ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ

Александр Ильич Сиянов, Данил Константинович Ярошевич

*Лысьвенский филиал Пермского национального исследовательского
политехнического университета, г. Лысьва, Россия*

Аннотация. При использовании цилиндрических сетчатых покрытий в особых условиях появляется необходимость учета колебательных процессов от работающих устройств и в случае механической поломки – прикрепленного оборудования, что определяет актуальность исследования.

Целью статьи является определение закономерностей влияния указанных процессов на работу покрытия и создание рациональной визуализации полученных результатов.

Рассмотрена методика приложения динамических воздействий на характерные зоны цилиндрических сетчатых покрытий. Принята рациональная форма сетки с диагональным элементом посередине. Учтены особенности построения конструкций и расположения статических нагрузок. Заданы определяющие математические зависимости и показан процесс моделирования динамической нагрузки.

Результаты. Осуществлено прямое интегрирование уравнений движения. Приведен конкретный числовой пример в рамках применения прикладного программного обеспечения. Получены приемлемые соотношения геометрических параметров.

Выводы. Зафиксированы экстремальные значения силовых факторов и параметров деформирования конструкции на заданном интервале времени.

Ключевые слова: цилиндрическое сетчатое покрытие, прямое интегрирование уравнений движения, динамическое воздействие, силовой фактор, параметр деформирования

Для цитирования: Сиянов А.И., Ярошевич Д.К. Расчет цилиндрических сетчатых покрытий с учетом уравнений движения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 112–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-112-119. EDN: JCAХAA

ORIGINAL ARTICLE

CALCULATION OF CYLINDRICAL MESH COATINGS BASED ON EQUATIONS OF MOTION

Aleksandr I. Siyanov, Danil K. Yaroshevich

Lysva Affiliate of Perm National Research Polytechnic University, Lysva, Russia

Abstract. Purpose: Determination of oscillation process mechanisms affecting the coating operation and rational visualization of the results obtained.

Methodology: The analysis of dynamic effects on cylindrical mesh coatings. The considered rational grid shape has a diagonal element in the middle. Numerical calculations are conducted using software.

Research findings: Structures under static loads are studied. Mathematical dependencies are identified and the model of the dynamic load is proposed. Direct integration of equations of motion is carried out. Acceptable ratios are obtained for geometric parameters.

Practical implication: Extreme values of force factors and parameters are recorded for the structure deformation at given time interval.

Originality/value: Oscillatory processes of operating devices and mechanical failure of the attached equipment considered in using cylindrical mesh coatings in specific conditions.

Keywords: cylindrical mesh coating, direct integration, equations of motion, dynamic load, force factor, deformation parameters

For citation: Siyanov A.I., Yaroshevich D.K. Calculation of cylindrical mesh coatings based on equations of motion. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 112–119. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-112-119. EDN: JCAXAA

Введение

Общепринятая тенденция выполнять расчет цилиндрических сетчатых покрытий с использованием прикладных программных продуктов получила свое развитие еще в прошлом столетии. Разработанные тогда математические аппараты имели громоздкий вид [1, 2, 3] и не всегда позволяли получать точные результаты. Часто применялись приближенные методы и алгоритмы с принятыми предположениями и упрощениями [4]. Как правило, решались задачи устойчивости и исследовалась работа конструкций в условиях действия возможных статических и динамических нагрузок [1, 2, 3, 4, 5]. Созданные в то время формы сеток отличались архитектурной привлекательностью и, безусловно, радовали заказчика. Но с учетом минимизации затрат все они требовали тщательного изучения и проверки на живучесть. В условиях развития компьютерной техники появилась возможность с требуемой точностью рассчитывать покрытия для защиты от всех неблагоприятных нагрузок и воздействий. Тем более когда речь идет о динамике, где существуют опасные колебательные процессы. Их влияние зависит от параметров работающих устройств и механической поломки прикрепленного оборудования.

Постановка задачи

Сегодня разработки современных программных комплексов [6, 7, 8, 9] упростили задачи формообразования и открыли возможность для исследований расчетных схем цилиндрических сетчатых покрытий. Естественно, нет необходимости указывать целый ряд различных или похожих по форме многоэлементных сеток. Для наглядности достаточно привести характерный пример и показать особенности использования предложенных модулей. Поэтому в статье на основании созданной методологии изложена методика приложения динамических воздействий на конструкцию с учетом действия статических нагрузок. Все указанные процедуры выполнены средствами прикладного программного обеспечения.

Результаты

Путем анализа критериев формообразования и возможных размеров сетчатой поверхности выбрана цилиндрическая оболочка с ранее обоснованными геометрическими параметрами, характеристиками жесткости и граничными условиями [10].

Основу построения составили трубчатые продольные и поперечные ребра с нисходящими диагональными элементами (рис. 1).

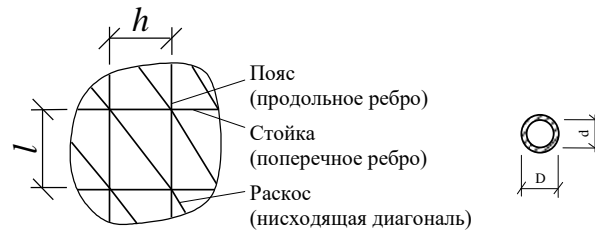


Рис. 1. Фрагмент цилиндрического сетчатого покрытия с сечением стержней из горячекатаных бесшовных труб

Fig. 1. Fragment of cylindrical mesh coating with cross section of hot-rolled seamless pipes

Использованы рекомендации по конструированию и получены приемлемые значения длины L , ширины B , стрелы подъема f , радиуса кривизны R , размер $l \times h$ ячейки, число панелей n , граней m и класс стали для изготовления конструкции (таблица).

Параметры сетчатой поверхности оболочки

Parameters of mesh coating surface

L , м	B , м	f , м	R , м	l , м	h , м	n	m	Сталь
30	24	6,93	13,85	3,75	3,62	8	8	C245

Геометрическая неизменяемость системы обеспечена тем, что конструкция [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] оперта по контуру в каждом узле, причем закреплена шарнирно с полным запрещением перемещений в одной угловой точке и наложением связей по двум направлениям в остальных опорных узлах [18]:

$$Z = 0, \quad X = Y = Z = 0, \quad X = Z = 0. \quad (1)$$

Уравнение движения конечно-элементной модели покрытия представлено в виде [19]:

$$M\ddot{Z}(t) + C\dot{Z}(t) + KZ(t) = f(t). \quad (2)$$

Начальные условия заданы векторами Z_0 и \dot{Z}_0 , свидетельствующими о начальных перемещениях и скоростях.

Интегрирование уравнений движения (2) произведено при начальных условиях:

$$Z(0) = Z_0, \quad \dot{Z}(0) = \dot{Z}_0. \quad (3)$$

Согласно функциональным требованиям динамическая нагрузка приложена к конструкции в виде работы механических устройств и сосредоточена на двух склонах покрытия в виде симметрично приложенных узловых сил на нижнем ребре граней, которые примыкают к граням коньковой зоны. Направление действия выбрано по оси Z.

Использован синусоидальный закон с амплитудой 3,6 кН, частотой 5 рад и сдвигом фаз 90° . Шаг интегрирования принят 0,01 с, время интегрирования 3 с, время начала и конца воздействия 0 и 1,26 с, количество дроблений шага 10 (рис. 2).

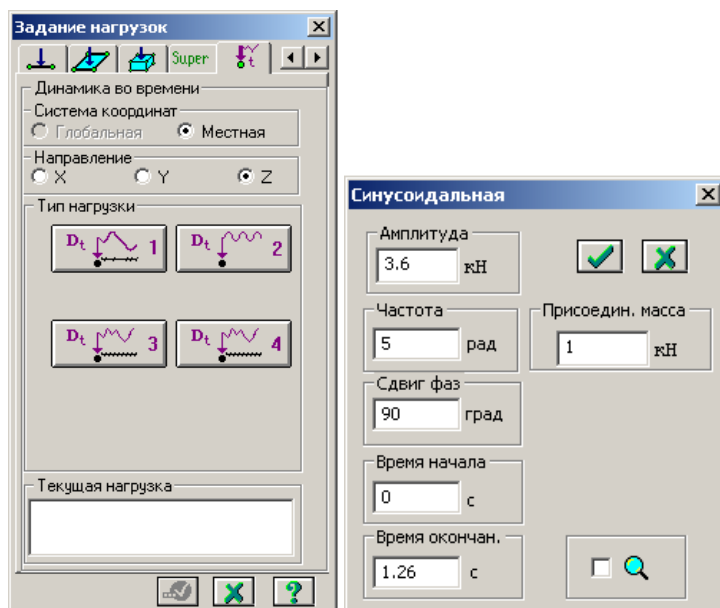


Рис. 2. Закладка «Динамика во времени» и тип нагрузки «Синусоидальная» с заданием необходимых параметров

Fig. 2. "Dynamics over time" tab and sinusoidal load with setting required parameters

Результат получен в виде графика (рис. 3) путем нажатия в нижнем квадрате диалогового окна «Синусоидальная» с получением знака ✓.

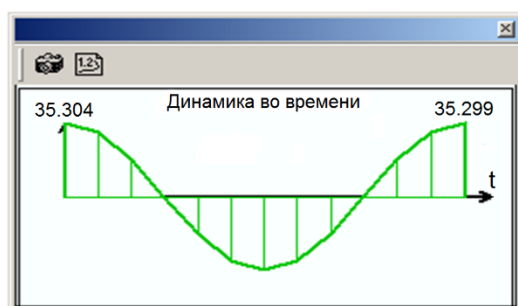


Рис. 3. Визуализация графика «Динамика во времени» по результатам расчета

Fig. 3. "Dynamics over time" visualisation according to calculations

Информация о внутренних силовых факторах и параметрах деформирования выведена нажатием на элементы и узлы. Показатели с учетом действия динамической нагрузки получили значительное увеличение. Максимальное усилие в элементе выросло на 18 %, причем экстремум (рис. 4) зафиксирован раньше половины заданного временного интервала на склоне с полным запрещением перемещений в угловом опорном узле.

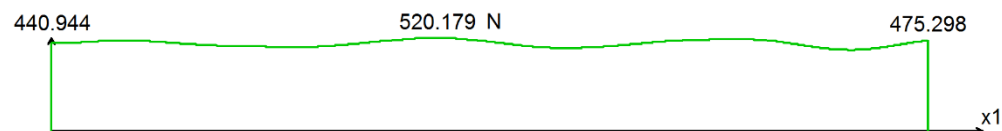


Рис. 4. График изменения максимального усилия в элементе, выявленного в середине опорного ребра

Fig. 4. Maximum force in the element in the middle of the support rib

Интересно отметить, что аналогичная закономерность получена и при изучении процесса деформирования покрытия. В частности, наибольшее перемещение узла определено практически на том же уровне во времени (рис. 5). Однако сравнение с величиной параметра статического расчета показало разницу 46 %.



Рис. 5. График изменения максимального перемещения узла, выявленного в середине нижнего ребра грани, примыкавшей к грани коньковой зоны

Fig. 5. Maximum node displacement in the middle of the lower rib of the edge adjacent to the ridge zone edge

По данным рис. 5 можно заключить, что изменение параметров с учетом действия статических и динамических нагрузок на конструкцию имеет наглядное представление на заданном интервале времени. Таким образом, установлена способность цилиндрического сетчатого покрытия воспринимать и выдерживать динамические нагрузки. Методология, представленная в настоящем исследовании, позволяет получить необходимую числовую и графическую информацию. На основе проведенных исследований появляется возможность выявить экстремальные значения и проследить за траекторией движения.

Выводы

1. Отражена методика приложения динамических воздействий на цилиндрические сетчатые покрытия. Учтены особенности построения конструк-

ций и расположения статических нагрузок. Приведен пример в рамках применения прикладного программного обеспечения.

2. Принята рациональная форма сетки и получены приемлемые соотношения геометрических параметров.

3. Указаны определяющие математические зависимости и показан процесс моделирования динамической нагрузки. Осуществлено прямое интегрирование уравнений движения.

4. Выявлены закономерности влияния колебательных процессов на работу покрытия и получена рациональная визуализация результатов.

5. Зафиксированы экстремальные значения силовых факторов и параметров деформирования конструкции на заданном интервале времени. Установлена способность цилиндрического сетчатого покрытия воспринимать и выдерживать динамические нагрузки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лебедев В.А., Лубо Л.Н. Сетчатые оболочки в гражданском строительстве на севере. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1982. 136 с.
2. Лубо Л.Н. Руководство по проектированию и расчету покрытий нового типа – сетчатых оболочек. Ленинград : ЛенЗНИИЭП, 1971. 63 с.
3. Райт Д.Т. Большие сетчатые оболочки. Ленинград : Стройиздат, 1966. 11 с.
4. Попов И.Г. Цилиндрические стержневые системы. Ленинград ; Москва : Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952. 112 с.
5. Пиеничнов Г.И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок. Москва : Наука, 1982. 352 с.
6. ЛИРА Софт. URL: <https://lira-soft.com/news/novovvedeniya-lira-10-12/>
7. SCAD Office. URL: <https://scadsoft.com/>
8. Ansys. URL: <https://www.ansys.com/>
9. Simcenter Femap with Nastran. 2022. URL: <https://www.cad-is.ru/femap>
10. Свердлов В.Д. Исследование пространственных цилиндрических стержневых систем покрытий : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Киев, 1977. 174 с.
11. 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. P. 365–376.
12. Zhou H., Zhang Y., Fu F., Wu J. Collapse mechanism of single-layer cylindrical latticed shell under severe earthquake // Materials. 2020. V. 13 (11). P. 2519.
13. Siyanov A. Parameters and Ratios of Metal Cylindrical Mesh Shells // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 988. P. 052023.
14. Nie G., Zhang C., Zhi X., Dai J. Collapse of the single layered cylinder shell with model experimental study // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2019. V. 19. P. 883–897.
15. Yan R., Chen Z., Wang X., Xiao X., Yang Y. Calculation Theory and Experimental Study of the K6 Single-layer Reticulated Shell // International Journal of Steel Structures. 2014. V. 14 (2). P. 195–212.
16. Siyanov A., Soshina T. Experimental Studies of the Cylindrical Mesh Shell Model // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. V. 1079. P. 022076.
17. Gotsulyak E.A., Siyanov A.I. Stability and nonlinear deformation of cylindrical grids // International Applied Mechanics. 2004. V. 40 (4). P. 426–431.
18. Siyanov A. Modelling and Stability of Cylindrical Grid Shells // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 661. P. 012036.
19. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Физалко С.Ю., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++. Москва : Изд-во АСВ, 2015. 848 с.

REFERENCES

1. *Lebedev V.A., Lubo L.N.* Mesh coatings in civil engineering in the North. Leningrad: Stroyizdat, 1982. 136 p. (In Russian)
2. *Lubo L.N.* Mesh coating design and calculation guide. Leningrad: LenZNIIEHP, 1971. 63 p. (In Russian)
3. *Rayt D.T.* Large mesh shells. Leningrad: Stroyizdat, 1966. 11 p. (In Russian)
4. *Popov I.G.* Cylindrical rod systems. Leningrad, Moscow, 1952. 112 p. (In Russian)
5. *Pshenichnov G.I.* Theory of thin elastic mesh shells and plates. Moscow: Nauka, 1982. 352 p. (In Russian)
6. LIRA soft. Available: <https://lira-soft.com/news/novovvedeniya-lira-10-12/> (accessed November 16, 2022)
7. SCAD office. Available: <https://scadsoft.com/> (accessed November 16, 2022)
8. Ansys. Available: www.ansys.com/ (accessed November 16, 2022)
9. Simcenter Femap with Nastran 2022. Available: www.cad-is.ru/femap (accessed November 16, 2022)
10. *Sverdlov V.D.* Investigation of spatial cylindrical rod systems of coatings. PhD Thesis. Kiev, 1977. 174 p. (In Russian)
11. *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): 365–376.
12. *Zhou H., Zhang Y., Fu F., Wu J.* Collapse mechanism of single-layer cylindrical latticed shell under severe earthquake. *Materials*. 2020; 13 (11): 2519.
13. *Siyanov A.* Parameters and ratios of metal cylindrical mesh shells. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 988: 052023.
14. *Nie G., Zhang C., Zhi X., Dai J.* Collapse of the single layered cylinder shell with model experimental study. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2019; 19: 883–897.
15. *Yan R., Chen Z., Wang X., Xiao X., Yang Y.* Calculation theory and experimental study of the K6 single-layer reticulated shell. *International Journal of Steel Structures*. 2014; 14 (2): 195–212.
16. *Siyanov A., Soshina T.* Experimental studies of the cylindrical mesh shell model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1079: 022076.
17. *Gotsulyak E.A., Siyanov A.I.* Stability and nonlinear deformation of cylindrical grids. *International Applied Mechanics*. 2004; 40 (4): 426–431.
18. *Siyanov A.* Modelling and stability of cylindrical grid shells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 66: 012036.
19. *Karpilovskiy V.S., Kriksunov Eh.Z., Malyarenko A.A., Fialko S.Yu., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A.* SCAD Office. Version 21. SCAD++ computing system. Moscow: ASV, 2015. 848 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Сиянов Александр Ильич, канд. техн. наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 618900, г. Лысьва, ул. Ленина, 2, vtusiyarov@gmail.com

Ярошевич Данил Константинович, студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 618900, г. Лысьва, ул. Ленина, 2, yaroshe-wach@yandex.ru

Authors Details

Aleksandr I. Siyanov, PhD, A/Professor, Lysva Affiliate of Perm National Research Polytechnic University, 2, Lenin Str., 618900, Lysva, Russia, vtusiyarov@gmail.com

Danil K. Yaroshevich, Student, Lysva Affiliate of Perm National Research Polytechnic University, 2, Lenin Str., 618900, Lysva, Russia, yaroshevach@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.11.2022
Одобрена после рецензирования 22.03.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 16.11.2022
Approved after review 22.03.2023
Accepted for publication 16.05.2023