

## Обоснование методологии расчета цилиндрической сетчатой оболочки

*А.И. Сиянов, Д.К. Ярошевич*

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

**Аннотация:** Проведены исследования цилиндрической сетчатой оболочки с использованием метода разложения на плоские грани и прикладного программного комплекса ЛИРА. Выполнена оценка возможности использования рассмотренных подходов при анализе конкретных участков и в случае полного исследования сетчатой поверхности. Определены необходимые показатели работы конструкции, достоверность, точность и скорость вычисления расчетных параметров. Выявлены характеристики напряженно-деформированного состояния системы, которые позволили рекомендовать приближенный метод расчета для быстрого определения предварительных результатов. Проанализированы способы получения расчетных данных во всех участках оболочки на цилиндрической поверхности. Установлена высокая степень информативности усилий, перемещений и массы пространственной конструкции с помощью прикладного программного обеспечения. Отмечена простота и наглядность визуализации полученных схем в соответствии с требованиями проектирования.

**Ключевые слова:** цилиндрическая сетчатая оболочка, приближенный метод, компьютерный подход, расчетные параметры, усилия, перемещения, масса.

### Введение

В расчетах криволинейных пространственных конструкций необходимо обоснованно подходить к использованию известных инженерных методик. Особенно если речь идет о стержневых системах, элементы которых расположены на цилиндрической сетчатой поверхности [1–3].

Ранее расчет многоэлементных оболочек кругового очертания [4–6] выполнялся с помощью разработанных и проверенных на практике приближенных методов. Сегодня большинство расчетных операций можно доверить прикладному программному обеспечению [7, 8].

Современные вычислительные комплексы позволяют создавать и рассчитывать стержневые модели с заданными нагрузками, необходимыми условиями закрепления и принятыми параметрами жесткости. Однако при вариантном проектировании для определения показателей напряженно-деформированного состояния или в случае расчета массы цилиндрических

сетчатых оболочек [9] можно использовать одну или несколько готовых формул без привлечения сложных программ и дорогостоящей техники. Поэтому в статье проведена оценка целесообразности использования указанных методов.

### Обоснование формы и методологии

В рамках исследований рассмотрена металлическая сетчатая оболочка с продольными, поперечными и диагональными стержнями [10] (рис. 1).

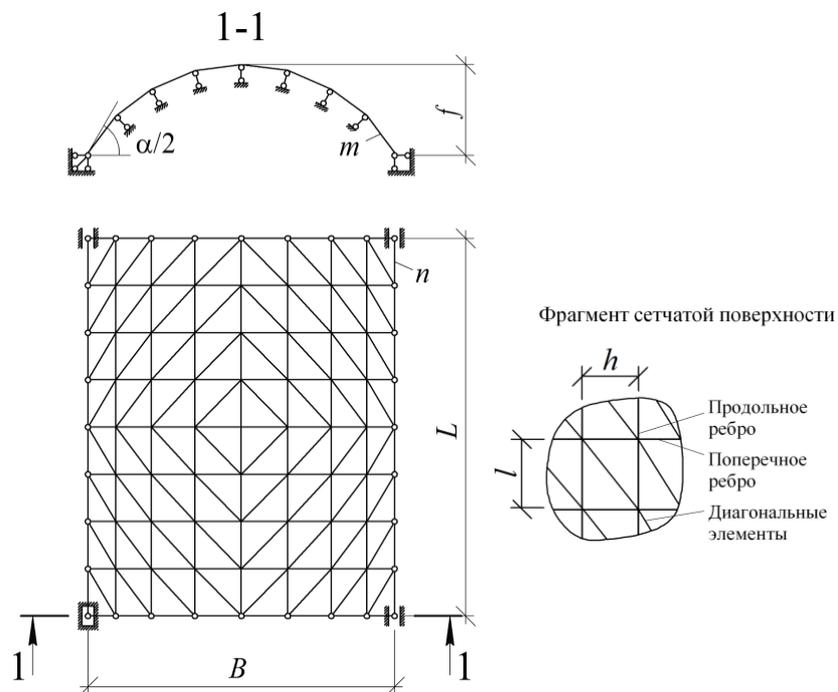


Рис. 1 – Схема конструкции цилиндрической сетчатой оболочки

Соотношения геометрических параметров определены на этапе анализа устойчивости цилиндрической сетки и приняты на основании предварительных расчетов. Основные характеристики приведены в табл. 1.

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 $\alpha$ , в градусах	Количество, шт		Угол между элементами $\varphi$ , в градусах	Сталь
				панелей $n$	граней $t$		

---

24×30	6,93	3,65×3,75	120	8	8	43,97	C245
-------	------	-----------	-----	---	---	-------	------

Эффективность принятого решения оценивалась в рамках методологии.

**Приближенный метод.** Для определения силовых факторов и параметров деформирования использован метод разложения на плоские грани. Приложенная узловая нагрузка представлена в виде составляющих. Усилия определены в продольных, поперечных и диагональных элементах, как функция нагрузок и параметров, характеризующих геометрию:

$$N_i = f(F_i, i, k, n, m, \alpha, \beta, \varphi), \quad (1)$$

где  $F_i$  – сосредоточенные узловые нагрузки;  $i, k$  – индексы расположения узла по направлению дуги и вдоль образующей соответственно;  $n$  – количество панелей вдоль образующей;  $m$  – количество граней по направлению дуги;  $\alpha$  – угол описанной окружности оболочки;  $\beta = \alpha/2m$ ;  $\varphi$  – угол между продольными и диагональными элементами.

Исходя из усилий в элементах и с учетом заданных расчетных параметров, определены перемещения узлов:

$$\Delta = f(N_i, \bar{N}_i, l_i, E, A_i), \quad (2)$$

где  $N_{k,i}$  – усилия от узловой нагрузки  $F_{k,i}$ ;  $\bar{N}_i$  – усилия от единичной нагрузки, приложенной в узле и для которой определяется перемещение;  $l_i$  – длины элементов,  $E$  – модуль упругости материала элементов,  $A_i$  – площадь поперечного сечения элементов.

Масса конструкции оболочки найдена как функция геометрических и физических параметров:

$$G = f(N_i, l_i, \rho, R_y), \quad (3)$$

где  $\rho, R_y$  – плотность и расчетное сопротивление материала соответственно.

Учет жесткости узлов, продольный изгиб сжатых элементов и неполное использование напряжений при подборе сечений учтены введением конструктивных коэффициентов.

При определении массы не требовался расчет элементов и узлов, что существенно ограничивало количество операций.

***Метод расчета, реализованный в программном комплексе ЛИРА.***

Использование ПК ЛИРА позволило получить схемы визуализации исходных данных и результаты расчета.

Основная работа предусматривала создание конечно-элементной модели (рис. 2), основанием для которой являлась геометрия оболочки. Задавалась поверхность вращения и тип ячейки, геометрические параметры и характеристики жесткости пространственной конструкции.

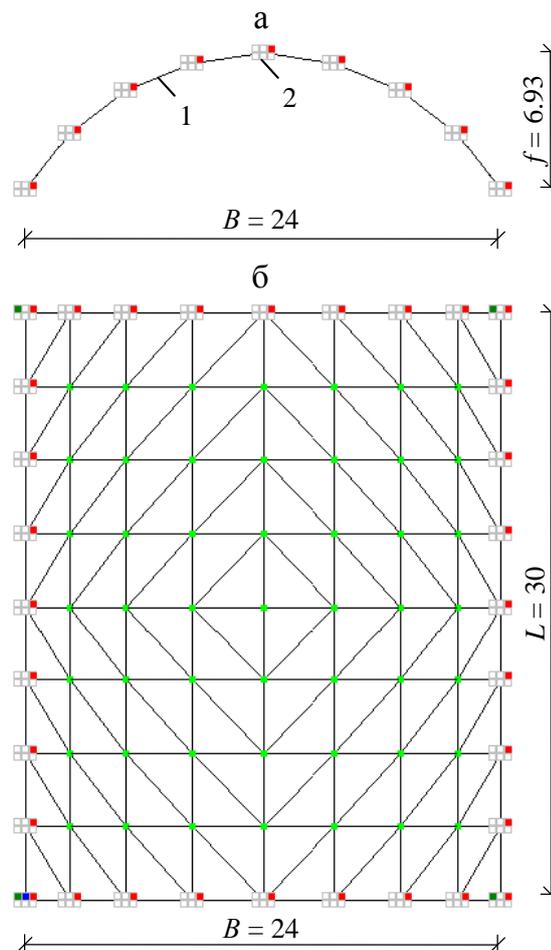


Рис. 2 – Конечно-элементная модель цилиндрической сетчатой оболочки:

а – поперечное сечение; б – горизонтальная проекция;

1 – элемент вдоль дуги; 2 – опорный узел

В местах пересечения поперечных и диагональных элементов с опорным ребром нижних граней накладывались связи. Для элементов приняты бесшовные горячекатаные трубы. Учтены необходимые нагрузки и комбинации усилий.

Наглядность полученных данных позволила определить параметры напряженно-деформированного состояния и проанализировать опасные зоны конструкции.

Результаты расчета представлены в виде стандартных и интерактивных таблиц, деформированных схем, мозаик усилий и перемещений, эпюр внутренних силовых факторов.

С помощью СТК-САПР выполнен подбор сечений элементов. Путем загрузки подсистемы создания чертежей КМ-САПР сформированы ведомости элементов и спецификация металлопроката.

### **Результаты и обсуждения**

По итогам сравнительного анализа рассмотренных методологических подходов установлена последовательность действий, достоверность, точность и скорость расчета. За исследуемую область принята четверть пространственной конструкции, которая состояла из 25 узлов и 56 элементов.

Приближенный метод получения усилий предусматривал использование расчетных формул. Определение общего силового состояния конструкции требовало расчета параметров для более 50 элементов, а с использованием ПК ЛИРА усилия в элементах определены путем визуализации итоговых схем и табличных данных.

Метод разложения на плоские грани позволял выделить область, состоящую из четверти узлов пространственной конструкции. С помощью

---

ПК ЛИРА рассчитывалась вся сетчатая поверхность с визуальной оценкой закономерностей деформирования оболочки.

Использование приближенного метода расчета позволило получить лишь числовые значения параметров напряженно-деформированного состояния и, к сожалению, не было возможности проиллюстрировать наглядные схемы визуализации.

Усилия в элементах и перемещения узлов, установленные по формулам, сравнивались с аналогичными показателями, полученными по данным компьютерного моделирования. В результате проведенных расчетов зафиксировано существенное отклонение указанных значений ближе к контуру (15...20 %) и почти их совпадение (3...8 %) в середине оболочки. Такая разница в показателях, особенно максимальных, объяснялась величиной полученных параметров и несовершенством приближенного метода расчета. Тем не менее, результаты двух методов отразили приемлемую точность и соответствовали условиям проектирования.

Из анализа последовательности выполняемых операций по двум методам расчета выявлены различия количественного характера. Общим оказался только этап формирования исходных данных. Однако и в нем приближенный метод расчета по сравнению с тем, который реализован в ПК ЛИРА, нуждался в разном количестве заданных параметров.

Время, затраченное на расчет и получение конечной информации, определяло целесообразность каждого метода.

Использование формул для выявления силового фактора или параметра деформирования приводило к приближенному результату и не требовало особых знаний. В случае определения массы конструкции устанавливалось значение, которое принималось как предварительный показатель для проектирования. Скорость расчета данным методом зависела только от реакции специалиста. В среднем процесс вычисления составлял около 3...5

---

мин. При работе в ПК ЛИРА ввод исходных данных занимал примерно 6...8 мин., а расчет всей оболочки осуществлялся в пределах 0,1 мин.

Компьютерный подход в целом предоставлял информацию об общем состоянии конструкции и требовал наличия у пользователя специальных теоретических знаний и навыков работы с ПК ЛИРА. Формирование таблиц и моделирование схем визуализации происходило за 6...8 сек. При расчете массы пространственной конструкции с помощью компьютера использовались две программы: СТК-САПР и MS Excel. Для каждого элемента определялся ряд параметров. Устанавливался необходимый профиль из каталога СТК-САПР, удельный вес по электронному сортаменту и длина стержней в ПК ЛИРА. Весовой показатель вычислялся в MS Excel через плотность стали и переводной коэффициент. С помощью функции автосумма определялась масса пространственной конструкции.

Сбор данных двух методов показал разницу в пределах 27 %. Приближенный подход предусматривал значительный запас несущей способности оболочки за счет увеличения расхода материала. Величина точности результатов соответствовала требованиям проектирования. Расчет параметров по формулам занимал примерно 7...8 мин. Создание таблицы в MS Excel требовало около 20 мин.

Несмотря на разницу в скорости получения результатов, принято решение о целесообразности применения компьютерной техники для получения наглядности, высокой точности расчетов и возможности избежать неоправданных затрат материала.

### **Выводы**

1. По результатам расчетов цилиндрической сетчатой оболочки выполнена оценка эффективности метода разложения на плоские грани и программного комплекса ЛИРА.

2. Определены показатели работы конструкции, достоверность, точность и скорость вычисления расчетных параметров. Выявлены характеристики напряженно-деформированного состояния системы, которые позволили рекомендовать приближенный метод расчета для быстрого определения предварительных результатов.

3. Проанализированы способы получения расчетных данных в определенном месте и во всех участках сетчатой поверхности. Установлена высокая степень информативности усилий, перемещений и массы конструкции с помощью прикладного программного обеспечения. Полученные схемы визуализации оказались наглядными и отвечали требованиям проектирования.

### 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](https://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](http://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](http://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. Райт Д.Т. Большие сетчатые оболочки. Л.: Стройиздат, 1966. 11 с.

6. Пшеничников Г.И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластинок. М.: Наука, 1982. 352 с.

7. Программа для проектирования и расчета строительных конструкций // *LiraLand Group*. URL: [liraland.ru/lira/](http://liraland.ru/lira/).

8. *LiraLand Group*. URL: [liraland.ru/lira/systems/km.php](http://liraland.ru/lira/systems/km.php).

9. Сиянов А.И. Влияние криволинейной формы на распределение массы металлических цилиндрических сетчатых оболочек // Инженерный вестник Дона, 2019, №6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6053](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6053).

10. 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](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6166).

### References

1. Zhou H., Zhang Y., Fu F., Wu J. Materials. 2020. Volume. 13 (11). URL: [preprints.org/manuscript/202005.0012/v1](https://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](http://mero.de/index.php/en/construction-systems/references-en/36-space-structures/847-the-carpenter-s-church) (accessed 30/11/21).

3. MERO / ION Orchard. Project Details. Mero Asia Pacific. URL: [mero.com.sg/project\\_references/ion-orchard](http://mero.com.sg/project_references/ion-orchard) (accessed 30/11/21).

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. Rayt D.T. Bol'shie setchatye obolochki [Large mesh shells]. L.: Stroyizdat, 1966. 11 p.

6. Pshenichnov G.I. Teoriya tonkikh uprugikh setchatykh obolochek i plastinok [Theory of thin elastic mesh shells and plates]. M.: Nauka, 1982. 352 p.

7. Programma dlya proektirovaniya i rascheta stroitel'nykh konstruktsiy [Program for the design and calculation of building structures]. LiraLand Group. URL: [liraland.ru/lira/](http://liraland.ru/lira/) (accessed 30/11/21).

8. LiraLand Group URL: [liraland.ru/lira/systems/km.php](http://liraland.ru/lira/systems/km.php) (accessed 30/11/21).

9. Siyanov A.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6053](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6053).



10. Siyanov A.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №9. URL:  
[ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6166](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6166).