

## Выбор формы рационального структурного покрытия

*О.О. Алёшина, М.М.А. Увайс, М.Х.А. Нашер, Я. Хасан, Ж. Чжан*

*Российский университет дружбы народов, Москва*

**Аннотация:** В статье рассматривается задача выбора наиболее рациональной формы пространственного металлического перекрестно-стержневого покрытия. Анализируются математические модели плоского структурного покрытия, покрытия в форме эллиптического параболоида и в форме гиперболического параболоида в программном комплексе SCAD на базе методы конечных элементов. Узловые соединения стержневых элементов покрытий приняты по системе «Кисловодск». Полученные параметры напряженно-деформированного состояния трех различных структурных покрытий позволяют говорить о практически идентичной работе конструкций.

**Ключевые слова:** структурное покрытие, пространственное покрытие, перекрестно-стержневое покрытие, напряженно- деформированное состояние, система «Кисловодск», программный комплекс SCAD, метод конечных элементов, гиперболический параболоид, эллиптический параболоид.

### Введение

За последние полвека во всем мире возрос интерес к пространственным металлическим конструкциям, которые представляют собой эффективное решение для перекрывания больших внутренних пространств.

Новые строительные технологии и материалы делают пространственные стальные структурные конструкции предпочтительными благодаря их легкости, экономичности и скорости монтажа. В ходе разработки таких конструкций был достигнут значительный прогресс благодаря обширным теоретическим и экспериментальным исследованиям, проведенными университетами и научно-исследовательскими институтами по всему миру.

История развития [1], применения и дальнейшего совершенствования стальных пространственно-стержневых конструкций в качестве покрытия общественных и промышленных зданий [2, 3] представлены в статьях научно-практической конференции. Разработаны и применяются различные виды узловых соединений в пространственных структурных покрытиях зданий и сооружений [4, 5]. Одними из наиболее технологичных оказались серийные модули «Кисловодск» и система «МАРХИ».

Современное архитектурно-строительное проектирование все больше использует компьютерные программы, которые постоянно расширяют свои функции, позволяющие разрабатывать сложной конфигурации конструкции, в том числе пространственные металлические стержневые покрытия различной формы. В статье [6] с помощью Grasshopper и Karamba 3D проанализированы три типа криволинейных конструкций металлических стержневых крыш в форме цилиндрической оболочки, коноида и гиперболического параболоида. Была проведена структурная оптимизация, которая позволила определить оптимальную дискретизацию исследуемых поверхностей. В качестве критерия оптимизации принималась минимальная масса конструкции. Наиболее эффективной оказалась конструкция в форме гиперболического параболоида. В работе [7] рассмотрена возможность построения пространственных решетчатых конструкций в форме гиперболического параболоида, купола и конструкции эллиптического вида. В статье [8] приведены результаты влияния унификации элементов структурного покрытия системы «Кисловодск» на напряженно-деформированное состояние покрытия. В статье [9] рассматривается вопрос об экономии металла при производстве структурных систем, в работе [10] исследуется задача выбора конструкции покрытия минимальной массы в зависимости от марки стали и шага опорных колонн. В [11, 12] авторы исследуют работу структурных покрытий при действии сейсмической нагрузки, интересные результаты анализа механизма разрушения трех пространственно-решетчатых конструкций при динамическом воздействии представлены в работе [13]. В статье [14] приведены результаты исследования влияния осадки опор на параметры напряженно-деформированного состояния покрытия системы типа «Кисловодск», в работе [15] выполняется расчет пространственного покрытия типа «Кисловодск» на прогрессирующее обрушение. В статье [16] приведено техническое решение системы «Новокисловодск».

---

В данной статье исследуются пространственные перекрестно-стержневые покрытия в форме гиперболического параболоида, эллиптического параболоида и плоское покрытие с принятыми узлами соединения стержневых элементов по системе «Кисловодск» (рис. 1). Целью исследования является выбор оптимального варианта структурного покрытия.

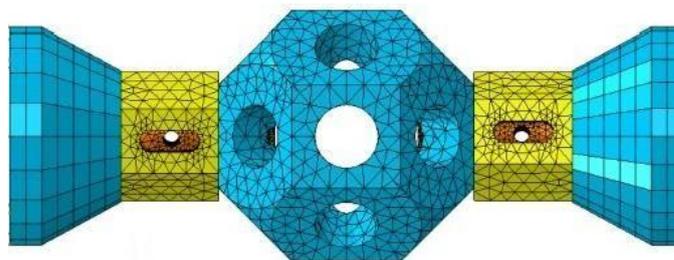


Рис. 1. – Узел соединения элементов перекрестно-стержневого покрытия по системе «Кисловодск»

### Материалы и методы

Моделирование и расчет конечно-элементных схем трех различных покрытий выполняется в вычислительном комплексе SCAD [17] на базе метода конечных элементов. Расчетная пространственная схема плоского покрытия (Вариант 1) представлена на рис. 2, пространственная схема покрытия в форме эллиптического параболоида (Вариант 2) представлена на рис. 3 и пространственная схема покрытия в форме гиперболического параболоида (Вариант 3) представлена на рис. 4.

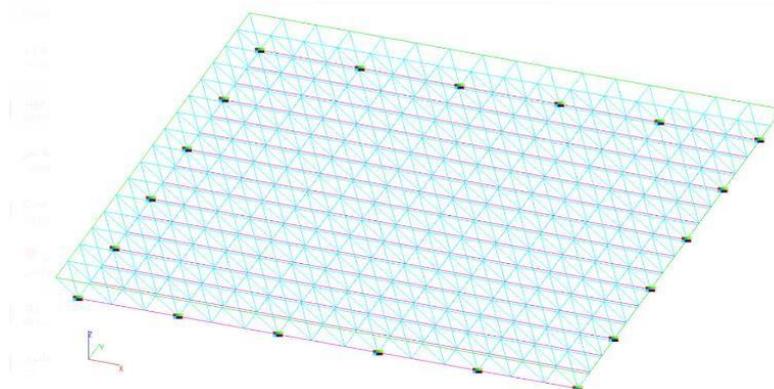


Рис. 2. – Пространственная модель структурного покрытия. Вариант 1

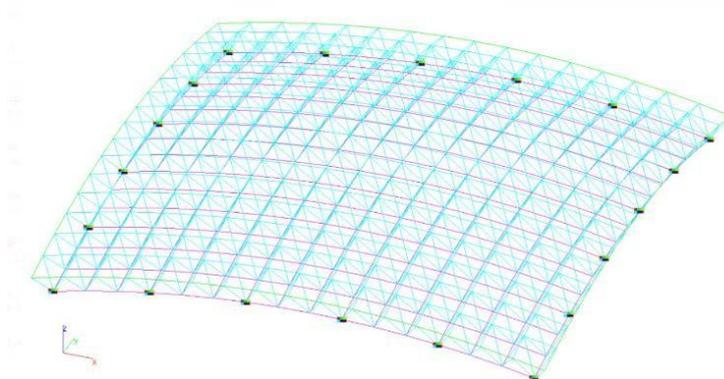


Рис. 3. – Пространственная модель структурного покрытия. Вариант 2

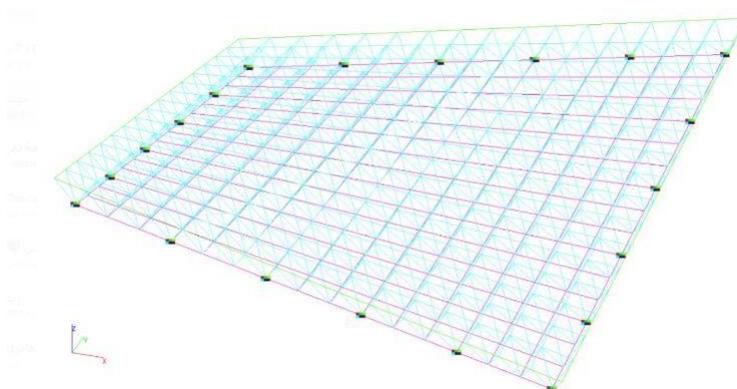


Рис. 4. – Пространственная модель структурного покрытия. Вариант 3

Исходные данные для трех покрытий приняты идентичными (таблица 1). Поперечные сечения элементов покрытий приняты по ГОСТ 8732-78.

Таблица 1

Исходные данные

№ п/п	Элемент конструкции покрытия	Цвет	Сечение
1	Верхний пояс и раскосы	Голубой	Труба 76x3,5 мм
2	Нижний пояс	Фиолетовый	Труба 60x3,5 мм
3	Элементы по контуру	Салатовый	Труба 60x3 мм

Геометрические размеры пространственных стержневых покрытий в плане в уровне верхнего пояса составляют 41,3x41,3 м, в уровне нижнего пояса составляют 38,7x38,7 м. Число квадратов каждого структурного покрытия в уровне нижнего пояса 16x16, при этом длина любого горизонтального стержня

равна 2,58 м. Исследование напряженно-деформированного состояния трех рассматриваемых пространственных структурных покрытий выполняется на действие постоянной нагрузки от собственного веса металлических конструкций с учетом дополнительной нагрузки равной  $0,03 \text{ т/м}^2$ . Поперечные сечения элементов покрытий приняты по ГОСТ 8732-78.

### Результаты исследования

Результаты определения параметров напряженно-деформированного состояния структурных покрытий методом конечных элементов (МКЭ) в программе SCAD представлены на рис. 5–10.

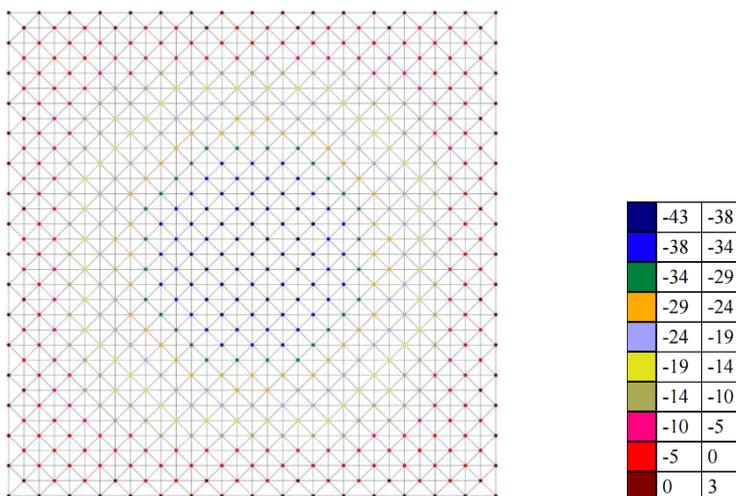


Рис. 5. – Вертикальные перемещения по оси Z, мм. Вариант 1

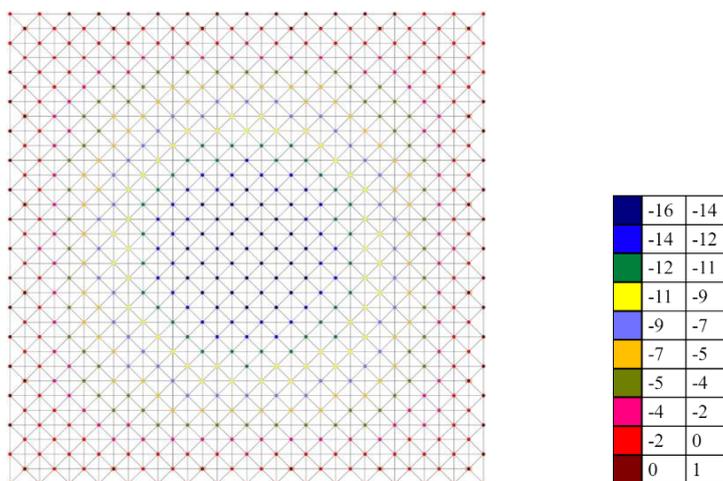


Рис. 6. – Вертикальные перемещения по оси Z, мм. Вариант 2

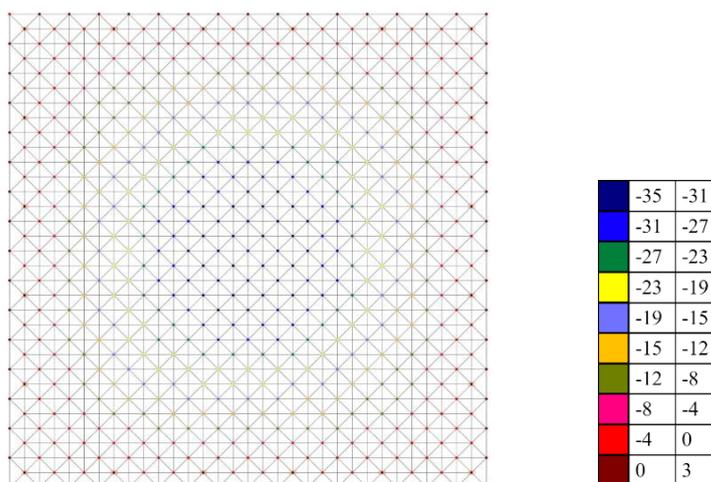


Рис. 7. – Вертикальные перемещения по оси Z, мм. Вариант 3

Как видно из рис. 5–7, максимальное вертикальное перемещение в первом варианте составляет около 43 мм, во втором около 16 мм, а в третьем около 35 мм.

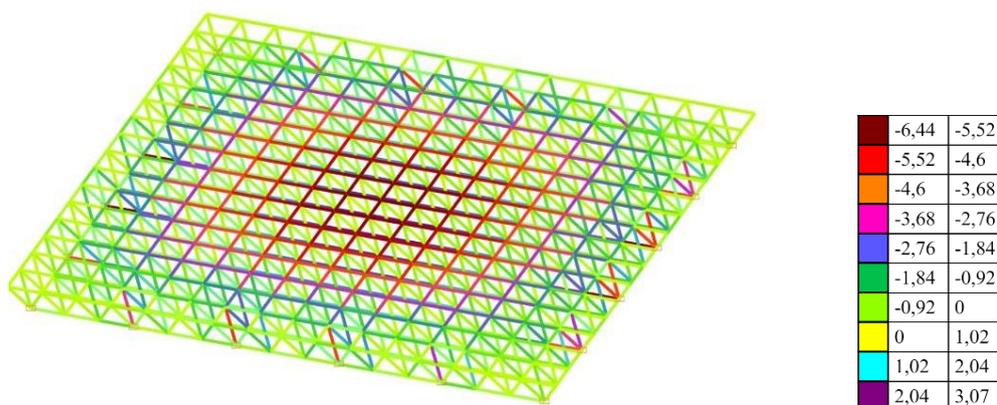


Рис. 8. – Продольная сила N, т. Вариант 1

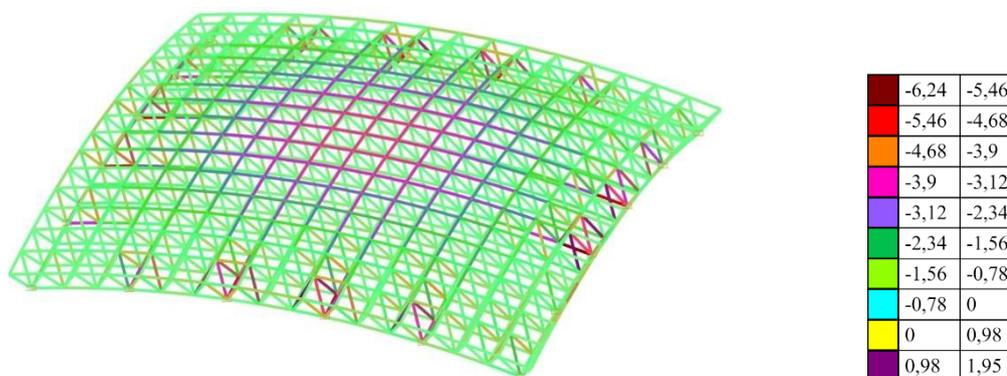


Рис. 9. – Продольная сила N, т. Вариант 2

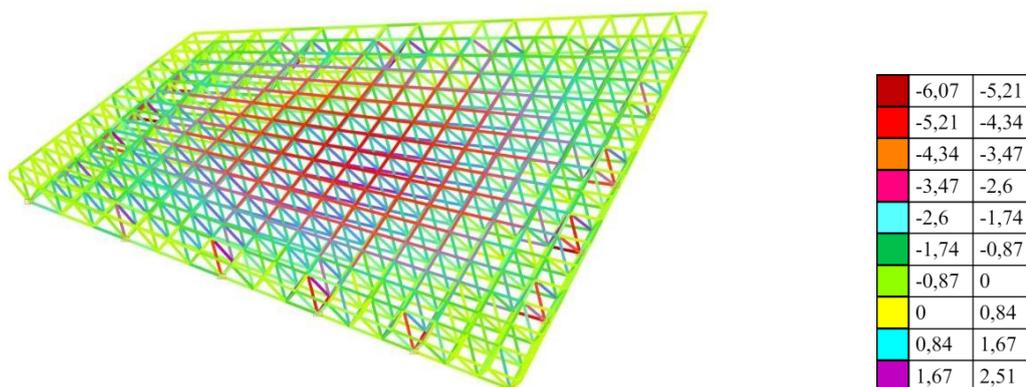


Рис. 10. – Продольная сила N, т. Вариант 3

Из представленных результатов расчётов трех схем покрытий видно, что значения продольной силы N в стержневых элементах в первом варианте колеблется в интервале от -6,44 т до 3,07 т, во втором варианте от -6,24 т до 1,95 т, а в третьем от - 6,07 до 2,51 т.

### Заключение

В статье выполнено исследование напряженно-деформированного состояния трех пространственных стержневых покрытий при действии постоянной нагрузки от собственного веса и дополнительной нагрузки. Рассматриваются перекрестно-стержневые покрытия в форме гиперболического параболоида, эллиптического параболоида и плоское покрытие. Проведён анализ зависимости внутренних усилий и перемещений от выбора формы структурного покрытия. Определено, что максимальный прогиб не превышает допустимое значение. Числовые результаты внутренних усилий и перемещений во всех трех типах исследуемых структурных покрытий практически одинаковы, в связи с чем авторы оставляют выбор формы покрытия на усмотрение архитекторам. Результаты, представленные в данной статье, смогут помочь архитекторам и инженерам в создании и проектировании новых архитектурных проектов большепролетных зданий и сооружений с покрытиями в виде структурных пространственных конструкций.

## Литература

1. Долуханян Г.А., Марутян А.С. Кисловодский завод металлоконструкций и модули типа «Кисловодск» // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «45 лет отрасли легких металлоконструкций: от модуля Кисловодск до модуля Пятигорск». Пятигорск: ПФ СКФУ, 2017. С. 136–143.
2. Крамарев Н.С. Каркасы промышленных и гражданских зданий из перекрестных систем // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «45 лет отрасли легких металлоконструкций: от модуля Кисловодск до модуля Пятигорск». Пятигорск: ПФ СКФУ, 2017. С. 34–38.
3. Неласов В.С., Файбишенко В.К. Основные направления развития системы МАРХИ // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «45 лет отрасли легких металлоконструкций: от модуля Кисловодск до модуля Пятигорск». Пятигорск: ПФ СКФУ, 2017. С. 182–191.
4. Файбишенко В.К. История создания перекрестно-стержневых пространственных конструкций системы МАРХИ (научные исследования, проектирование, строительство) // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «45 лет отрасли легких металлоконструкций: от модуля Кисловодск до модуля Пятигорск». Пятигорск: ПФ СКФУ, 2017. С. 202–218.
5. Митрофанов В.А., Митрофанов С.В. Работа узловых элементов структурной конструкции с стрелками выполненными из круглой трубы // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «45 лет отрасли легких металлоконструкций: от модуля Кисловодск до модуля Пятигорск». Пятигорск: ПФ СКФУ, 2017. С. 79–85.
6. Dzwierzynska J. Integrated Parametric Shaping of Curvilinear Steel Bar Structures of Canopy Roofs. Buildings. 2019. pp. 9, 72.

7. Свентиков А.А., Кузнецов Д.Н. Автоматизированное проектирование пространственных решетчатых стальных конструкций покрытий сложной формы // Строительство и реконструкция. 2021. 1. С. 38–49.

8. Роменский И.В., Мущанов А.В., Войтенко А.С. Влияние унификации элементов на массу структурных конструкций покрытия системы «Кисловодск» // Металлические конструкции. 2021. Т.27. №3. С. 119–134.

9. Шилов А.В., Погорелов А.А., Теняков А.А. Применение структурных покрытий в зданиях каркасного типа // Инженерный вестник Дона. 2018. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5227](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5227).

10. Василькин А.А., Денякова В.В. Регулирование напряженно-деформированного состояния структурной плиты покрытия // Инженерный вестник Дона. 2018. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4868](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4868)

11. Danish Irfan, Varadharajan S., Shahina Mateen, Ashish Kumar, Bishnu Kant Shukla. Assessment of behavior of steel space frames with two-way orthogonal latticed grids and orthogonal square pyramid space grids. AIP Conference Proceedings. 8 September 2023. 2800 (1): 020208.

12. Luo Y.F., Liu Y.P., Hu Z.Y., Z. Xiong. A new method for dynamic analysis of spatial lattice structures based on mode selection and mode construction techniques. International Journal of Steel Structures. 2017. 17(3). pp. 1157-1170.

13. Ye J., Zhang Z., Chu Y. Strength behavior and collapse of spatial-reticulated structures under multi-support excitation. Science China Technological Sciences. 2011. 54. pp. 1624–1638.

14. Роменский И.В., Гладких А.Ю., Тарасенко Н.А. Влияние осадки опор на напряженно-деформированное состояние структурного покрытия типа «Кисловодск» // Металлические конструкции. 2020. Т.26. №3. С. 103–115.

15. Бессонов С.Н., Солодов Н.В. Живучесть пространственных решетчатых конструкций из труб типа «Кисловодск» при расчете на прогрессирующее



modulya Kislovodsk do modulya Pyatigorsk». Pyatigorsk: PF SKFU, 2017. P. 79–85.

6. Dzwierzynska J. Buildings. 2019. pp. 9, 72.

7. Sventikov A.A., Kuznetsov D.N. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2021. 1. P. 38–49.

8. Romenskiy I.V., Mushchanov A.V., Voytenko A.S. Metallicheskiye konstruksii. 2021. T.27. №3. pp. 119–134.

9. Shilov A.V., Pogorelov A.A., Tenyakov A.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5227](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5227)

10. Vasil'kin A.A., Denyakova V.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4868](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4868)

11. Danish Irfan, S. Varadharajan, Shahina Mateen, Ashish Kumar, Bishnu Kant Shukla. AIP Conference Proceedings. 8 September 2023. 2800 (1): 020208.

12. Luo Y.F., Liu Y.P., Hu Z.Y., Z. Xiong. International Journal of Steel Structures. 2017. 17(3). pp. 1157–1170.

13. Ye J., Zhang Z., Chu Y. Science China Technological Sciences. 2011. 54. pp. 1624–1638.

14. Romenskiy I.V., Gladkikh A.YU, Tarasenko N.A. Metallicheskiye konstruksii. 2020, T.26, №3, pp. 103–115.

15. Bessonov S.N. Solodov N.V. Zhivuchest' prostranstvennykh reshchatykh konstruksiy iz trub tipa «Kislovodsk» pri raschete na progressiruyushcheye (lavinoobraznoye) obrusheniye. Naukoyemkiye tekhnologii i innovatsii (XXV nauchnyye chteniya). Belgorod, 2023. pp. 76–80.

16. Nazarova YE.V., Khazhnagoyeva R.A., Avetyan N.YU, Marutyan A.S. Sovremennaya nauka i innovatsii. 2022. №2. pp. 130–136.

17. SCAD Office. Versiya 21. Vychislitel'nyy kompleks SCAD++. [Version 21. SCAD++ computing complex]. M: "SKAD SOFT", 2015. 848 p.

**Дата поступления: 22.04.2024    Дата публикации: 2.06.2024**

---