



ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
METAL CONSTRUCTIONS**

2023, ТОМ 29, НОМЕР 3, 117–127

EDN: [UEKHQM](#)

УДК 624.047.2

(23)-0393-1

ОПТИМИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЙ НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ

**В. Ф. Мущанов¹, А. Н. Оржеховский², И. В. Роменский³,
А. И. Демидов⁴, С. В. Подлепич⁵**

*ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
Российская Федерация, Донецкая Народная Республика,
286128, г. о. Макеевка, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2.*

*E-mail: ¹mvf@donnasa.ru, ²a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru, ³i.v.romenskii@donnasa.ru,
⁴alexdemidov41@gmail.com, ⁵podlepich.s.v-zpgs-52b@donnasa.ru*

Получена 19 сентября 2023; принята 27 октября 2023.

Аннотация. В работе приведены результаты оптимизационного расчёта двух вариантов типовой конструкции структурного покрытия с размера в плане 21×30 метров, состоящей из пентаэдров. Рассматривалось два варианта реализации: с ячейкой 1,5 и 3 метра. Оба варианта шарнирно оперты на жёсткий контур. В качестве нагрузки рассматривается собственный вес конструкции и снег. Нагрузка приведена к узловой с использованием метода площадей. В качестве оптимизационных параметров выступали высота конструкции и стрела подъёма. Поиск оптимального решения производится по методу деформируемого многогранника Нелдера-Мида. Целевой функцией поиска выступает масса конструкции. Оптимизационный расчёт выполняется в авторском программном комплексе, который реализован на языке программирования MATLAB. Особенностью программного комплекса является способность обмениваться данными с системой автоматического проектирования ЛИРА-САПР по средствам выходного текстового файла.

Ключевые слова: оптимизация, метод деформируемого многогранника, пространственные стержневые конструкции, метод конечных элементов, программирование, MATLAB.

ОПТИМІЗАЦІЯ ТИПОВИХ СТРУКТУРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПОКРИТТІВ НА ПРЯМОКУТНОМУ ПЛАНІ

**В. П. Мущанов¹, А. М. Оржеховський², І. В. Роменський³,
О. І. Демидов⁴, С. В. Подлепич⁵**

*ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
Російська Федерація, Донецька Народна Республіка,
286128, м. о. Макіївка, м. Макіївка, вул. Державіна, буд. 2.*

*E-mail: ¹mvf@donnasa.ru, ²a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru, ³i.v.romenskii@donnasa.ru,
⁴alexdemidov41@gmail.com, ⁵podlepich.s.v-zpgs-52b@donnasa.ru*

Отримана 19 вересня 2023; прийнята 27 жовтня 2023.

Анотація. У роботі наведено результати оптимізаційного розрахунку двох варіантів типової конструкції структурного покриття з розміру в плані 21×30 метрів, що складається з пентаедрів. Розглядалося два варіанти реалізації: з осередком 1,5 і 3 метри. Обидва варіанти шарнірно оперті на жорсткий контур. Як навантаження розглядається власна вага конструкції і сніг. Навантаження приведена до вузлової з



використанням методу площ. В якості оптимізаційних параметрів виступали висота конструкції і стріла підйому. Пошук оптимального рішення проводиться за методом деформованого багатогранника Нелдера-Міда. Цільовою функцією пошуку виступає маса конструкції. Оптимізаційний розрахунок виконується в авторському програмному комплексі, який реалізований на мові програмування MATLAB. Особливістю програмного комплексу є здатність обмінюватися даними з системою автоматичного проектування ЛІРА-САПР використовуючи вихідний текстовий файл.

Ключові слова: оптимізація, метод деформованого багатогранника, просторові стрижневі конструкції, метод кінцевих елементів, програмування, MATLAB.

OPTIMIZATION OF TYPICAL STRUCTURAL STRUCTURES OF COATINGS ON A RECTANGULAR PLAN

Volodymyr Mushchanov¹, Anatoly Orzhekhovskiy², Igor Romenskiy³,
Alexander Demidov⁴, Sergey Podlepich⁵

FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture»,
Russian Federation, 286128, Makeevka, Derzhavin st., 2.

E-mail: ¹ mvf@donnasa.ru, ² a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru, ³ i.v.romenskii@donnasa.ru,
⁴ alexdemidov41@gmail.com, ⁵ podlepich.s.v-zpgs-52b@donnasa.ru

Received 19 September 2023; accepted 27 October 2023.

Abstract. The paper presents the results of the optimization calculation of two variants of a typical structural coating design with a plan size of 21×30 meters, consisting of pentahedra. Two implementation options were considered: with a cell of 1,5 and 3 meters. Both variants are pivotally supported on a rigid contour. The own weight of the structure and snow are considered as the load. The load is reduced to the nodal one using the area method. The optimization parameters were the height of the structure and the boom of the lift. The search for the optimal solution is carried out by the method of the deformable Nelder-Mead polyhedron. The target function of the search is the mass of the structure. Optimization calculation is performed in the author's software package, which is implemented in the MATLAB programming language. A feature of the software package is the ability to exchange data with the LIRA-SAPR automatic design system by means of an output text file.

Keywords: optimization, deformable polyhedron method, spatial rod constructions, finite element method, programming, MATLAB.

Введение

Современное проектирование невозможно представить без использования программных комплексов различной степени автоматизации. Все большее распространение получают системы автоматического проектирования (САПР), которые позволяют автоматизировать практически весь цикл работы над проектом, начиная с работы архитектора и заканчивая составлением смет. Благодаря использованию электронно-вычислительных машин в проектировании, появилась возможность отойти от приближенных методов расчёта усилий в элементах сложных пространственных систем. Пространственное моделирование и работа со всей конструкцией в целом, а

не упрощённый расчёт отдельных сегментов (даже с использованием принципа суперпозиции), в большинстве случаев, позволяет значительно уменьшить экономические показатели проектируемого объекта [1, 2]. Дальнейшее уменьшение массы конструкции, при обеспечении требуемого уровня надёжности [3, 4, 5], возможно лишь с использованием методик оптимизации. Учитывая тот факт, что экономические требования к строительным системам значительно ограничивают диапазон используемых сталей, авторы считают рациональным варьировать геометрические параметры конструкции и площади сечений элементов системы [6]. Резюмируя все выше приведенное можно сделать вывод о

целесообразности создания программного комплекса, проводящего оптимизацию конструкции по этим параметрам.

Основная проблема при создании такого комплекса заключается в том, что связь между геометрией, сечениями элементов и массой конструкции не является линейной зависимостью. Следовательно, приходится решать задачу нелинейного программирования. Более того, для многоэлементных конструкций функцию оптимизации в явном виде получить вообще невозможно. Следовательно, использование методов оптимизации, основанных на вычислении производных, невозможно (градиентные методы [7], методы вторых производных [8]). В данном случае целесообразно применить методы поиска, а именно поиск по деформируемому многограннику (метод Нелдера и Мида) [9]. Данный метод относительно просто реализуется в качестве программного кода на ЭВМ. В отличие от других методов поиска (метод Розенброка и Девиса, Свена, Кемпи, Пауэла и ряда других) имеет более быструю сходимость и скорость отыскания минимума целевой функции [10, 11].

Методы исследований

Процесс оптимизации стальных стержневых конструкций рассмотрим на примере пространственной решетчатой системы с размерами в плане 21×30 метров. Конструкция имеет шарнирное оперение по контуру в узлах верхнего пояса. В качестве варьируемых параметров целесообразно принять высоту конструкции и стрелу подъёма над уровнем закрепления. Стремясь охватить большую площадь целевой функции, но и не забывая о критериях целесообразности и опыте проектирования подобных конструкций, высота структуры «Н» варьируется в пределах от $1/5$ до $1/30$ минимального размера в плане (от 0,7 м до 4 м), а стрела подъёма «Z» от 0 до $1/5$ (от 0 м до 4 м). В качестве целевой функции оптимизации выступает масса конструкции, как относительный экономический показатель.

Алгоритм оптимизации реализован в виде программного комплекса написанного на высокоуровневом интерпретируемом языке программирования MATLAB [12]. Блок-схема методики оптимизации представлена на рисунке 1. В качестве переменной «х» алгоритм выступают

одновременно «Н» и «Z». Изначально формируется файл с исходными данными в формате .txt, где указывается нагрузка, координаты узлов, геометрические характеристики сечений и связи. Для обеспечения интеграции разработанного программного продукта с современными комплексами автоматического проектирования предусмотрена возможность загрузки вышеперечисленных данных из текстовых файлов, генерируемых программами «ЛИРА САПР» и «SCAD». Далее насчитывается сетка точек, расположенных на исследуемой поверхности массы (m), где параметры «Н» и «Z» изменяются с заданным шагом. Анализируя полученный массив данных масс конструкции, выбираются три базисные точки для реализации алгоритма Нелдера и Мида. Точка с максимальным значением целевой функции массы (точка 3) отображается через центр отрезка образованного двумя оставшимися точками базиса (точки 1 и 2). Если целевая функция в полученной точке (точка 4) меньше массы в точке 3, то происходит растяжение вычисления (рассчитывается точка 5), отрезок «3–4» удлиняется по направлению точки 4. Если целевая функция массы в точке 4 больше массы в точке 3, но меньше массы в центре отрезка «1–2», выполняется редукция (переопределение точек базиса). Если целевая функция массы в точке 4 больше массы всех предыдущих точек итерации, то выполняется сжатие (точка 5 получается путем отображения точки 4 «внутри» базисного треугольника). После вычисления параметров и массы 5 точки производится анализ полученных вычислений и выбираются три точки с наименьшей целевой функцией массы для следующей итерации. Расчёт ведётся пока изменение целевой функции массы на трёх итерациях подряд не составит менее 5%.

Точка с минимальной функцией массы на последней итерации принимается как наиболее оптимальный вариант конструкции. Далее фиксируются жёсткости элементов, геометрия конструкции и выводятся пользователю. После чего расчёт останавливается.

Следует отметить, что коэффициенты – « γ », « β » и « α » являются коэффициентами как растяжения, сжатия и отражения соответственно. В источнике [13] приводятся их рекомендуемые значения (авторы приняли коэффициенты $\gamma = 2$, $\beta = 0,5$ и $\alpha = 1$).

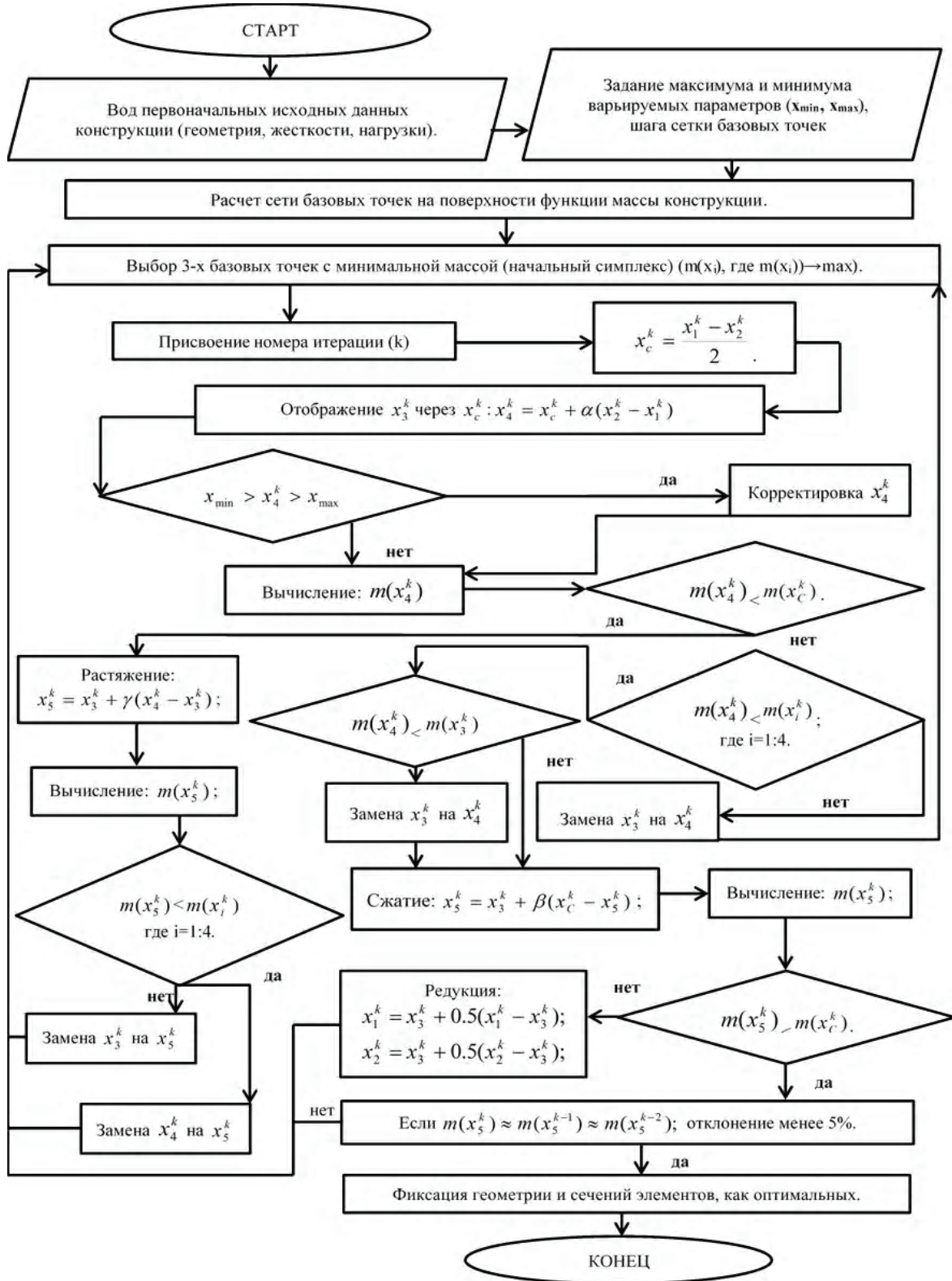


Рисунок 1. Блок-схема оптимизации стержневой конструкции.

Объект исследований

В качестве численного эксперимента были оптимизированы два типовых варианта структурного покрытия с размерами в плане 21×30 метров, состоящих из пентаэдров. Размеры ячеек составили 1,5 и 3 метра (рис. 2). Оптимизация проводилась по двум параметрам – высоте и стреле подъёма, а в дальнейшем по одному – только высоте конструкции. Полученные конструкции представлены на рисунках 1 и 2.

Исходные сечения элементов конструкции подобраны в соответствии с требованиями первого предельного состояния в программном комплексе ЛИРА-САПР.

На конструкцию приложена приведённая к узловой внешняя нагрузка в 240 кг/м², которая включает в себя собственный вес, вес снегового покрова и вес ограждающей конструкции с утеплителем (приблизительно 50 кг/м²). Для определения степени влияния положения исходного базиса (на поверхности целевой функции) на сходимость и точность расчёта, на каждом нагружении

оптимизация производилась на основе сети из 64 и 16 точек. Сетки точек на исследуемой поверхности массы конструкции приведена на рисунке 3. На рисунке 4 изображены целевые кривые функции оптимизации при учёте только одного параметра – высоты структуры. Результаты расчета представлены в таблице.

В столбце «Исходная масса» приведена масса конструкции, вычисленная классическим методом подбора сечений [14], без оптимизации системы.

Результаты исследований

На рисунке 5 показана оптимизированная геометрия структурного покрытия с ячейкой 1,5×1,5 м при нагружении в 240 кг/м².

Анализируя данные приведенные в таблице очевидно, что конструкция с ячейкой 3 м более выгодна с точки зрения экономии материала. Следует отметить, что оптимизация по двум параметрам хоть и даёт больший процент экономии стали, но технически сложнее при производстве и монтаже. В этом случае, фактически,

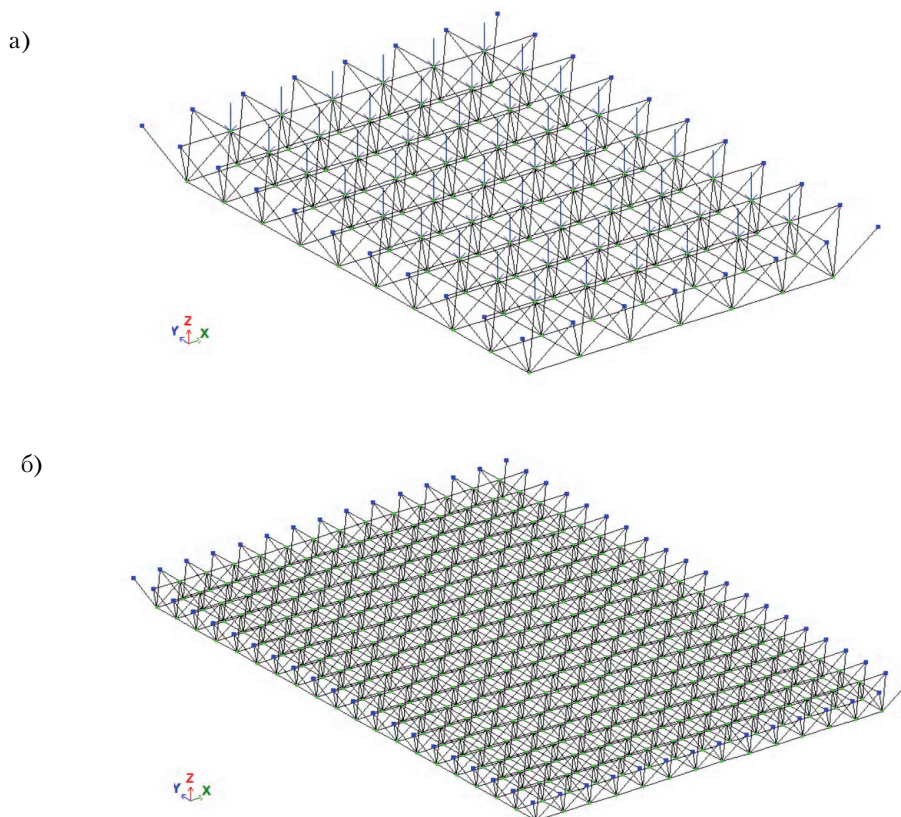


Рисунок 2. Базовая конструкция пространственной стержневой плиты: а) размер ячейки 3×3 м; б) размер ячейки 1,5×1,5 м.

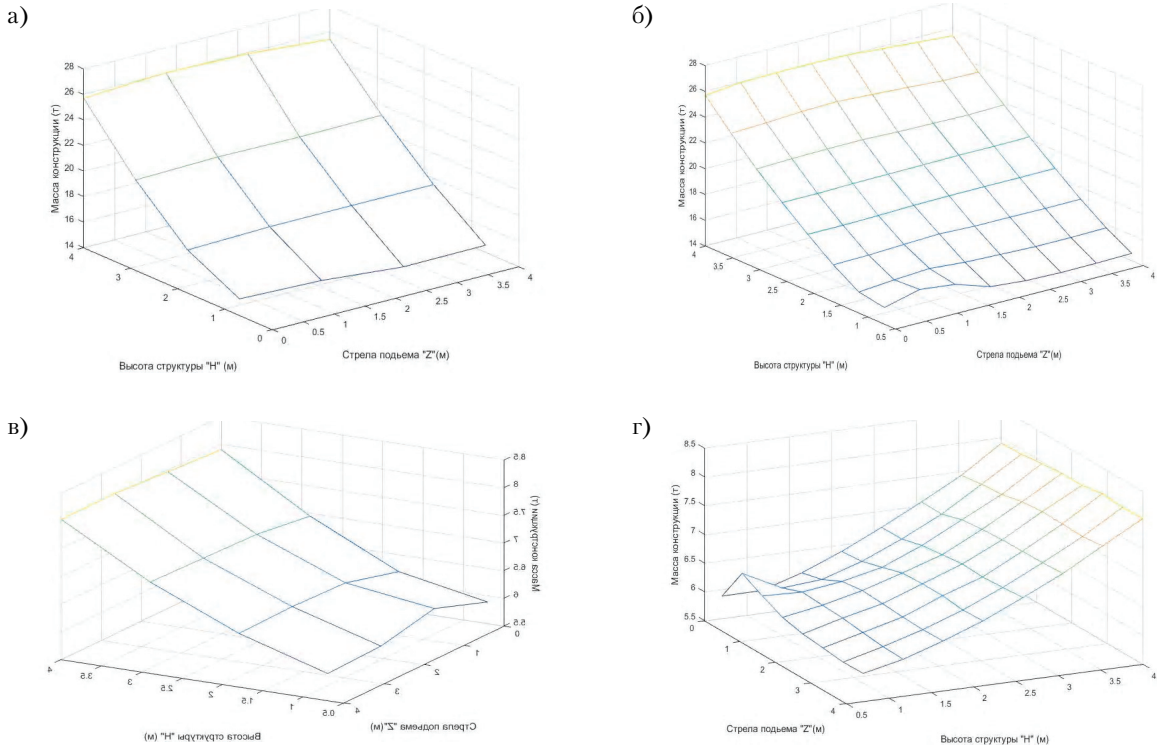


Рисунок 3. Сетки точек на исследуемой поверхности массы конструкции при оптимизации по двум параметрам: а) ячейка 1,5×1,5 м – 16 точек; б) ячейка 1,5×1,5 м – 64 точки; в) ячейка 3×3 м – 16 точек; г) ячейка 3×3 м – 64 точки.

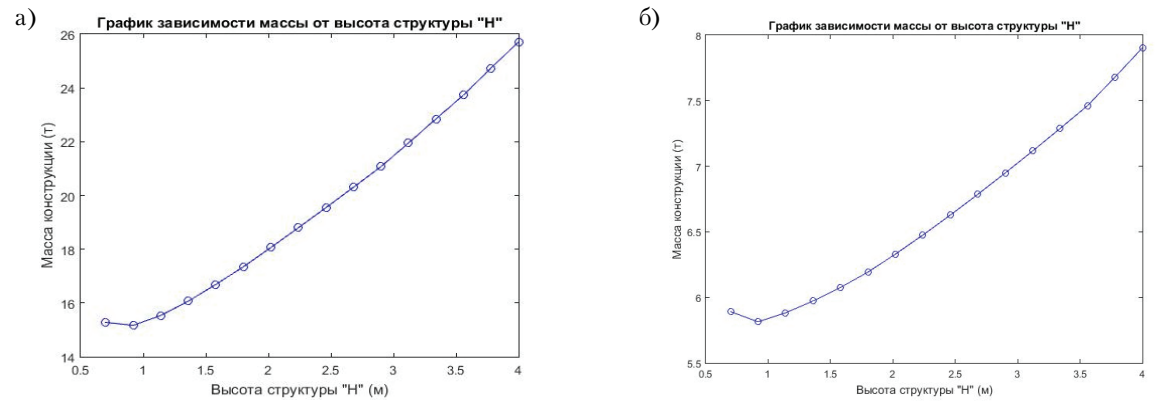


Рисунок 4. Кривые целевой функции массы конструкции при оптимизации по одному параметрам: а) ячейка 1,5×1,5 м – 16 точек; б) ячейка 3×3 м – 16 точек.

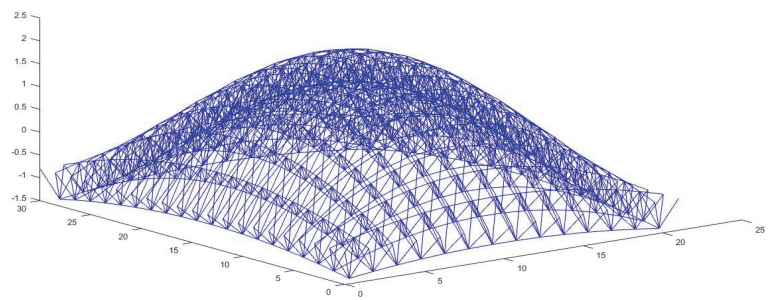


Рисунок 5. Оптимизированная геометрия конструкции рассматриваемого структурного покрытия с ячейкой 1,5×1,5 м.

Таблица. Результаты оптимизационного расчёта стержневой плиты

Размеры структуры	Кол-во точек целевой поверхности (кривой)	Стрела 4 (м), высота 4 – 0,7 (м)			Исходная масса (т)	Высота 0,7 – 4 (м)		% отклонения	
		Масса (т)	Z стрела (м)	H высота (м)		Масса (т)	H высота (м)	2 параметра	1 параметра
21×30×1,5 (м)	64 точек	14,484	2,857	0,7	16,449			11,95	
	16 точки	14,486	3	0,7		15,169	0,865	11,93	7,78
21×30×3 (м)	64 точек	5,891	0	0,7	7,025			16,14	
	16 точки	5,891	0	0,7		5,813	0,92	16,14	17,25

происходит переход от типовой конструкции к индивидуальному проекту или даже уникальному решению.

Анализируя данные приведенные в таблице очевидно, что конструкция с ячейкой 3 м более выгодна с точки зрения экономии материала. Следует отметить, что оптимизация по двум параметрам хоть и даёт больший процент экономии стали, но технически сложнее при производстве и монтаже. В этом случае, фактически, происходит переход от типовой конструкции к индивидуальному проекту или даже уникальному решению.

Выводы

Так как связь между геометрией, сечениями элементов и массой конструкции не является линейной зависимостью, то наиболее эффективным методом оптимизации при оптимальном проектировании структурных конструкций является

метод поиска по деформируемому многограннику, так же известный как метод Нелдера и Мида. При применении предложенной методики оптимизации удалось добиться снижения массы в пределах 12–16 %.

Увеличение количества точек поверхности или кривой целевой функции, в некоторых случаях, может увеличить вероятность определения наиболее оптимальных параметров конструкции.

Вариант с ячейкой в 3 м более экономичен, но при этом степень его надёжности на порядок ниже варианта с ячейкой в 1,5 м.

В случае с ячейкой в 3 м оптимизация по одному параметру может давать более оптимальные результаты, так как расстояние между точками целевой кривой меньше, чем между точками целевой поверхности при одинаковом их количестве. Что позволяет более точно выбрать базисные точки для дальнейшего процесса оптимизации.

Литература

- Schoplocher, D. P. Improvements for building-performance simulations by a comparative finite-element method analysis / D. P. Schoplocher, S. Ettengruber, O. Steffens. – Текст : электронный // *Energy and Buildings*. – 2023. – Volume 278. – Article number 112563. – P. 1–12. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778822007344> (дата публикации: 03.11.2022).
- Shan, W. Automatic structural optimization design using sensitivity-based method. W. Shan, Y. Ding, J. Zhou. – Текст : электронный // *Structures*. – 2022. – Volume 46. – P. 99–108. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012422009602?via%3Dihub> (дата публикации: 23.10.2022).

References

- Schoplocher, D. P.; Ettengruber, S.; Steffens, O. Improvements for building-performance simulations by a comparative finite-element method analysis. – Text : electronic. – In: *Energy and Buildings*. – 2023. – Volume 278. – P. 1–12. – Article number 112563. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778822007344> (date of publication: 03.11.2022).
- Shan, W.; Ding, Y.; Zhou, J. Automatic structural optimization design using sensitivity-based method. – Text : electronic. – In: *Structures*. – 2022. – Volume 46. – P. 99–108. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012422009602?via%3Dihub> (date of publication: 23.10.2022).

3. ГОСТ 27751-2014. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные требования = Reliability of building structures and foundations : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. № 1974-ст : введен впервые : дата введения 2015-07-01 / разработан Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр «Строительство» (ОАО «НИЦ «Строительство»), Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В. А. Кучеренко. – Москва : Стандартинформ, 2015. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности = Building structures. Basic principles of reliability : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 ноября 2016 г. № 1814-ст : введён впервые / подготовлен Акционерным обществом «Научно-исследовательский центр «Строительство» (ОА «НИЦ «Строительство»), Центральным научно-исследовательским институтом строительных конструкций им. В. А. Кучеренко. – Москва : Стандартинформ, 2016. – Текст : непосредственный.
5. Design of stadium roofs with a given level of reliability / A. Orzhekhovskiy, I. Priadko, A. Tanasoglo [et al.]. – Текст : электронный // *Engineering Structures*. – 2020. – Volume 209. – Article number 110245. – P. 1–18. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014102961932512-X?via%3Dihub> (дата публикации: 12.02.2020).
6. Муцанов, В. Ф. Экспериментальное исследование прочностных и геометрических характеристик гнутосварных труб прямоугольного сечения украинских производителей / В. Ф. Муцанов, А. Н. Оржеховский. – Текст : непосредственный // *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*. – 2013. – Випуск 2013-3(101) Будівлі та конструкції із застосуванням нових матеріалів та технологій. – С. 9–12.
7. Черноуцкий, И. Г. Градиентные методы оптимизации больших систем / И. Г. Черноуцкий. – Текст : электронный // *Информатика, телекоммуникации и управление*. – 2014. – № 4(200). – С. 47–56. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gradientnye-metody-optimizatsii-bolshih-sistem> (дата обращения: 20.09.2023).
8. Дмитриева, Т. Л. Концепция многоуровневой оптимизации в выборе вариантов конструктивных решений металлических сооружений / Дмитриева Т. Л., Соболев В. И. – Текст : электронный // *Вестник ИрГТУ*. – 2011. – № 10(57). – С. 1–4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-mnogourovnevoy-optimizatsii-v-vybore-variantov-konstruktivnyh-resheniy-metallicheskih-sooruzheniy> (дата обращения: 15.09.2023).
9. Ouchinnikov, I. G.; Mavzovin, V. S. Trends in the optimal design of metal structures taking into account operating conditions. – Text : electronic. – In: *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. – 2020. – № 1(31). – P. 43–50. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-v-optimalnom-proektirovanii-metallicheskih->
3. GOST 27751-2014. Reliability of building structures and foundations : national standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 11, 2014 № 1974-st : introduced for the first time: date of introduction 2015-07-01 / developed by the Open Joint-Stock Company «Scientific Research Center «Construction» (JSC «SRC «Construction») Central Research Institute of Building Structures named after V. A. Kucherenko. – Moscow : Standartinform, 2015. – Text : direct. (in Russian)
4. GOST R ISO 2394-2016. Building structures. Basic principles of reliability : national standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 28, 2016 № 1814-st : introduced for the first time / prepared by the Joint Stock Company «Research Center «Construction» (JSC «Research Center «Construction»), Central Research Institute of Building Structures named after V. A. Kucherenko. – Moscow : Standartinform, 2016. – Text : direct. (in Russian)
5. Orzhekhovskiy, A.; Priadko, I.; Tanasoglo, A. [et al.]. Design of stadium roofs with a given level of reliability. – Text : electronic. – In: *Engineering Structures*. – 2020. – Volume 209. – Article number 110245. – P. 1–18. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014102961932512-X?via%3Dihub> (date of publication: 12.02.2020).
6. Mushchanov, V. F.; Orzhehovskiy, A. N. Experimental study of the strength and geometric characteristics of the bentwelded pipes of rectangular crosssection of the Ukrainian producers. – Text : direct. – In: *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. – 2013. – Issue 2013 3(101) Buildings and structures using new materials and technologies. – P. 9–12. (in Russian)
7. Chernorutsky, I. G. Gradient methods for optimizing large systems. – Text : electronic. – In: *Computer science, telecommunications and management*. – 2014. – № 4(200). – P. 47–56. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gradientnye-metody-optimizatsii-bolshih-sistem> (date of access: 20.09.2023). (in Russian)
8. Dmitrieva, T. L.; Sobolev, V. I. The concept of multi-level optimization in the selection of options for structural solutions of metal structures. – Text : electronic. – In: *Bulletin of ISTU*. – 2011. – № 10(57). – P. 1–4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-mnogourovnevoy-optimizatsii-v-vybore-variantov-konstruktivnyh-resheniy-metallicheskih-sooruzheniy> (date of access: 15.09.2023). (in Russian)
9. Ouchinnikov, I. G.; Mavzovin, V. S. Trends in the optimal design of metal structures taking into account operating conditions. – Text : electronic. – In: *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. – 2020. – № 1(31). – P. 43–50. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-v-optimalnom-proektirovanii-metallicheskih->

- variantov-konstruktivnyh-resheniy-metallicheskih-sooruzheniy (дата обращения: 15.09.2023).
9. Овчинников, И. Г. Тенденции в оптимальном проектировании металлических конструкций с учетом условий эксплуатации / И. Г. Овчинникова, В. С. Мавзовин. – Текст : электронный // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 1(31). – С. 43–50. – URL: <https://cyberleni-nka.ru/article/n/tendentsii-v-optimalnom-proektirovaniimetallicheskih-konstruksiy-s-uchetom-usloviy-ekspluatatsii> (дата обращения: 15.09.2023).
 10. Дмитриева, Т. Л. Реализация условной задачи нелинейного математического программирования с использованием метода деформируемого многогранника в программе MathCAD / Т. Л. Дмитриева, В. Т. Нгуен. – Текст : электронный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 4(44). – С. 1–7. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/realizatsiya-uslovnouy-zadachi-nelineynogo-matematicheskogo-programmirovaniya-s-ispolzovaniem-metoda-deformiruемого-mnogogrannika-v> (дата обращения: 16.09.2023).
 11. Гребенюк, Г. И. Двухэтапный процесс оптимизации упругих стержневых систем при импульсом нагружении и варьировании параметров сечений элементов и дополнительных узловых масс / Г. И. Гребенюк, В. И. Максак, М. С. Вешкин. – Текст : электронный // Вестник ТГАСУ. – 2022. – № 5. – С. 70–80. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dvuhetapnyy-protsess-optimizatsii-uprugih-sterzhnevyyh-sistem-pri-impulsom-nagruzhennii-i-varirovaniiparametrov-secheniy-elementov-i> (дата обращения: 16.09.2023).
 12. Крысько, А. А. Геометрическое и компьютерное моделирование криволинейных поверхностей мембранных покрытий на прямоугольном плане / А. А. Крысько. – Текст : непосредственный // Строительство и техногенная безопасность. – 2020. – № 18(70). – С. 97–106.
 13. Танасогло, А. В. Численно-аналитическая методика решения задачи устойчивости пространственных решетчатых конструкций / А. В. Танасогло. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции. – 2015. – Том 21, № 3. – С. 107–117.
 14. Дмитриева, Т. Л. Исследование влияния штрафного коэффициента на сходимость алгоритма при решении задачи оптимального проектирования строительных конструкций / Т. Л. Дмитриева, В. Т. Нгуен. – Текст : электронный // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 10(105). – С. 1–9. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-shtrafnogo-koeffitsienta-na-shodimostalgoritma-pri-reshenii-zadachi-optimalnogo-proektirovaniya-stroitelnyh> (дата обращения: 18.09.2023).
 15. Роменский, Д. И. Подбор сечения элементов стальных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов с учетом требований надежности / Д. И. Роменский, А. Н. Оржеховский. – konstruksiy-s-uchetom-usloviy-ekspluatatsii (date of access: 15.09.2023). (in Russian)
 10. Dmitrieva, T. L.; Nguyen, V. T. Implementation of a conditional problem of nonlinear mathematical programming using the deformable polyhedron method in the MathCAD program. – Text : electronic. – In: *Modern technologies. System analysis. Modeling.* – 2014. – № 4(44). – P. 1–7. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/realizatsiya-uslovnouy-zadachilineynogo-matematicheskogo-programmirovaniya-s-ispolzovaniem-metoda-deformiruемого-mnogogrannika-v> (date of access: 16.09.2023). (in Russian)
 11. Grebenyuk, G. I.; Maksak, V. I.; Veshkin, M. S. Two-stage optimization process of elastic rod systems under impulse loading and varying parameters of element sections and additional nodal masses. – Text : electronic. – In: *Bulletin of TGASU.* – 2022. – № 5. – P. 70–80. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dvuhetapnyy-protsess-optimizatsii-uprugih-sterzhnevyyh-sistem-pri-impulsom-nagruzhennii-i-varirovaniiparametrov-secheniy-elementov-i> (date of access: 16.09.2023). (in Russian)
 12. Krysko, A. A. Geometric and computer modeling of curved surfaces of membrane coatings on a rectangular plan. – Text : direct. – In: *Construction and technogenic safety.* – 2020. – № 18(70). – P. 97–106. (in Russian)
 13. Tanasoglo, A. V. Numerical-analytical methodology for solving the problem of stability of spatial lattice structures. – Text : direct. – In: *Metal structures.* – 2015. – Volume 21, № 3. – P. 107–117. (in Russian)
 14. Dmitrieva, T. L.; Nguyen, V. T. Study of the influence of the penalty coefficient on the convergence of the algorithm when solving the problem of optimal design of building structures. – Text : electronic. – In: *Bulletin of ISTU.* – 2015. – № 10(105). – P. 1–9. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-shtrafnogo-koeffitsienta-na-shodimostalgoritma-pri-reshenii-zadachi-optimalnogo-proektirovaniya-stroitelnyh> (date of access: 18.09.2023). (in Russian)
 15. Romensky, D. I.; Orzhekhovskiy, A. N. Selection of the cross-section of elements of steel frame-cantilever coverings over stadium stands taking into account reliability requirements. – Text : direct. – In: *Scientific and theoretical journal «Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov».* – 2017. – № 8. – P. 35–46.

Текст : непосредственный // Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова». – 2017. – № 8. – С. 35–46.

Мущанов Владимир Филиппович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Член международной организации «Институт гражданских инженеров» и международной ассоциации «Пространственные конструкции». Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

Оржеховский Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование действительной работы и показателей надежности стержневых систем в строительстве, численные методы расчета пространственных стержневых конструкций.

Демидов Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: физически линейные и нелинейные задачи теории тонких оболочек постоянной и переменной толщины с большими отверстиями.

Роменский Игорь Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: применение оптимальных конструктивных форм металлических конструкций в гражданском и промышленном строительстве.

Подлепич Сергей Владимирович – магистрант ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: численные методы расчета пространственных стержневых конструкций.

Мущанов Володимир Пилипович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної та прикладної механіки, проректор з наукової роботи ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Член міжнародної організації «Інститут цивільних інженерів» та міжнародної асоціації «Просторові конструкції». Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування і технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

Оржеховський Анатолій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної та прикладної механіки ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження дійсної роботи і показників надійності стрижневих систем в будівництві, чисельні методи розрахунку просторових стрижневих конструкцій.

Роменський Ігор Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій і споруд ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: застосування оптимальних конструктивних форм металевих конструкцій в цивільному і промисловому будівництві.

Демидов Олександр Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної та прикладної механіки ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: фізично лінійні та нелінійні задачі теорії тонких оболонок постійної та змінної товщини з великими отворами.

Подлепич Сергій Володимирович – магістрант ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: чисельні методи розрахунку просторових стрижневих конструкцій.

Mushchanov Volodymyr – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activity of the FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». A member of the international organization «Institute of Civil Engineer» and international organization of «Spatial Structures». Scientific interests: reliability theory, calculation, design and technical diagnostics of spatial metal structures.

Orzhekhovsky Anatoly – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: the study of real work and reliability indicators of pivotal systems in construction, numerical methods for calculating spatial pivotal structures.

Romensky Igor – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Metal Structures and Constructions Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: application of optimal structural forms of metal structures in civil and industrial construction.

Demidov Alexander – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: physically linear and nonlinear problems of the theory of thin shells of constant and variable thickness with large holes.

Podlepich Sergey – master's student FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: numerical methods for calculating spatial rod structures.