This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Research Article
Received: December 26, 2023 Accepted: February 4, 2024 Published: February 29, 2024
ISSN 2658-5553

Designing a nonregular space trusses layout using additive technologies

Sokolov, Nikolay Nikolaevich[1*]
Diakov, Stanislav Fedorovich[1]
Ibragimov, Timur Ravilevich[1]
Melekhin, Egor Markovich[1]
Mohireva, Arina Olegovna[1]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; sokolov.nn@edu.spbstu.ru (S.N.N.); dyakov_sf@spbstu.ru (D.S.F.); timuribragimov.ra@gmail.com (I.T.R.); Egor.melechin@yandex.ru (M.E.M.); mohirevaarina@mail.ru (M.A.O.).
Correspondence: * email sokolov.nn@edu.spbstu.ru; contact phone +79523962077

Keywords:

Optimization algorithm; Space truss; Structural engineering; Steel pipes; Additive manufacturing

Abstract:

The object of research is a prototype algorithm that allows to create space trusses by setting only the initial data and controlling the result. **Method.** Is to develop an algorithm, which creates a space truss by using methods of layout optimization, then optimizes cross-sections of elements and prepares all data for verification calculation and describing characteristics of the design. Then, Using the data from the trial run of the algorithm, compare the results with traditional approaches to the design of spatial trusses. **Results**. An algorithm for the automated design of a space trusses with an optimal layout has been developed and it has been demonstrated on the example of a specific problem that such an approach will significantly reduce the material intensity of structures. However, all this is possible only with full automation of the design process and considering that all nodal connections are also generated automatically and produced additively using industrial printers.

1 Введение / Introduction

Унификация – один из основополагающих принципов, заложенных не только в проектирование зданий и сооружений, но и, в частности, проектирование строительных конструкций [1]. Целью этого давно сложившегося правила являлось оптимизация принимаемых решений по несущим конструкциям и уменьшение количества типоразмеров изделий, что было необходимо для ускорения и упрощения производства.

Благодаря принципу типизации (типового строительства) в СССР были сформированы множественные альбомы серии конструкций, позволяющие использовать готовые решения для быстрого проектирования. Из этого же принципа вытекало то, что в рамках каждого объекта, а также отдельной конструкции применялось минимальное количество различных решений и элементов – унификация. Особенно актуальным данное правило оказалось для сложных конструкций, состоящих из большого множества элементов, как, к примеру, пространственные стержневые конструкции.

Пространственные стержневые конструкции (далее – ПСК) представляют собой трехмерные системы, образованные структурой стержневых элементов. За ними также закрепились такие названия, как трехмерные «решетчатые» или «структурные» конструкции [2]. Их можно рассматривать как пространственные фермы или трехмерные рамы. Соединение стержневых элементов в таких конструкциях обычно принимается шарнирным, а нагрузки прикладываются на

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

узлы элементов, таким образом, что изгибающие моменты и поперечные силы в стержнях становятся пренебрежительно малы относительно продольных усилий [3].

Несмотря на возможность широкого применения пространственных стержневых конструкций, основная проблема проектирования заключается в ручном изучении различных вариантов положения несущих элементов и поиска оптимальной компоновки стержней [4]. В расчетных комплексах применяются процедурные методы получения формы, получившие сильный резонанс в области архитектуры, дизайна и инженерии [5]. Эти методы часто описываются как «generative design» (генеративный дизайн), «параметрический дизайн», «алгоритмический дизайн», «form-finding» (поиск формы) и т.д. [6]. Задачей развития данных методов, а также их анализ и внедрение в программные комплексы приведены в трудах [7], [8]. Задачи автоматизации компоновок стержневых элементов были рассмотрены в работах [9], [10].

Методы оптимизации компоновки ферм позволяют определить эффективное расположение конструктивных элементов, образующих конструкцию, они особенно подходят для решения проблем, когда объем, занимаемый конструкцией, сильно ограничен, что является не редкостью в проектировании, особенно при наличии нестандартной архитектуры [11], [12].

Часто стержневые системы применяются для устройства сложных архитектурных форм и поверхностей. Проектирование таких конструкций может потребовать нетиповых решений. Основные задачи, которые необходимо решить на стадии проектирования уникальных конструкций были описаны в работе [13]. Основная идея – проверка возможности создания рациональных конструктивных решений для сложной поверхности. Работа автора изучает взаимосвязь между формой, геометрией и несущими конструкциями, ставя новые задачи перед проектировщиками по работе с объектами со сложными формами.

Несмотря на то, что стержневые конструкции обычно моделируются с полностью податливыми (шарнирными) узлами, некоторые нормативы проектирования признают, что фактический характер работы металлических узлов находится в интервале между шарнирным и жестким [14]. Другим автором было проведено исследование по определению напряжений в металлических конструкциях с учетом жесткости узловых соединений при динамических нагрузках [15].

В работе [16] представлен метод создания сводчатых сплошных и решетчатых поверхностей с учетом поиска оптимальной формы поверхности, при минимальном расходе материала. Метод разрабатывался для анализа сводчатых конструкций культурно-исторических сооружений, однако за основу использует анализ пространственно-стержневую модель для анализа усилий.

Новые цифровые технологии расширяют диапазон возможностей производства, а, следовательно, и конструкций, которые могут быть изготовлены. Также существующая тенденция к ухудшению климатических условий делают повышение эффективности использования материалов одной из приоритетных задач производства. Тем не менее, многие оптимизированные решения зачастую кажутся слишком сложными для практиков, что натолкнуло авторов [17] на создание интерактивного инструмента, позволяющего искать баланс между сложностью конструкции и её оптимальностью.

Веб-приложение «LayOpt» (https://www.layopt.com), в первую очередь носит образовательный характер и является демонстрацией возможности оптимизации топологии ферм на примере плоских задач, код которого находится в открытом доступе для применения [18].

Однако методы оптимизации компоновки ферм не находили применения на практики [19]. Отчасти это объясняется тем, что решения, полученные с помощью численных методов оптимизации компоновки, обычно кажутся непрактичными, поскольку они состоят из множества тесно расположенных элементов, которые трудно изготовить с использованием традиционных методов [20].

Важно понимать, что традиционные технологии не позволяют применять вышеописанные способы проектирования конструкций – это приведет к лишним затратам и большему времени как проектирования, так и производства конструкций [21]. Для эффективного применения оптимизированных и неунифицированных конструкций необходимо обратить внимание на новые, быстроразвивающиеся технологии – аддитивные. Аддитивными технологиями называют метод послойного наращивания материала для создания определенной трёхмерной формы: детали, объекта (в том числе здания), механизма. Наиболее распространённым синонимом является 3D-печать – термин возник раньше и поэтому распространён шире, однако в промышленных масштабах принято говорить именно об аддитивных технологиях. Наиболее распространенная и популярный способ применять аддитивные технологии в строительстве – это 3D-печать бетона,

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

но стоит также обратить внимание на производство металлических изделий. Способов аддитивного производства металла стало достаточно много, однако далеко не каждый из них может применяться везде. Причина тому являются физико-механические показатели готовых деталей, ведь связующим для металлического порошка в таких деталях используются пластики.

Строительный сектор имеет потенциал для внедрения подобных технологий и рабочих процессов. Академические исследования подчеркивают возможности 3D-печати, но реальных примеров почти не существует. В работе [22] представлены результаты исследований по применению 3D-печати в области структурных конструкций. Представленные проекты структурных систем направлены на улучшение гибкости проектирования, конструктивных характеристик и эстетического вида существующих решений подобного рода конструкций. Важным выводом является то, что подобные проекты стали возможны благодаря тому, что все узловые соединения были напечатаны с помощью технологий 3D-печати. Поскольку 3D-печать позволяет создавать конструкции, в которых нет необходимости в унификации, каждый узел может быть уникальным, обеспечивая, таким образом, оптимальное распределение материала в конструкции.

Важным выводом является то, что подобные проекты стали возможны благодаря тому, что все узловые соединения были напечатаны с помощью технологий 3D-печати. Поскольку 3D-печать позволяет создавать конструкции, в которых нет необходимости в унификации, каждый узел может быть уникальным, обеспечивая, таким образом, оптимальное распределение материала в конструкции. Сборка узлов и стержней в сложных каркасных конструкциях представляет собой три основные задачи:

- систематическая организация информации и физических деталей
- тщательное проектирование соединения стержней и узлов
- продуманное планирование последовательности сборки

Каждому узловому соединению присваивается свой уникальный номер, который печатается прямо на детали – таким образом не получится нарушить строгий порядок сборки конструкции.

В развитие данной темы в исследовании [23] были рассмотрены возможности применения напечатанных соединений для автоматизированной сборки всей конструкции, реализуя механизмы самозамыкающихся узловых соединений, а также исследуя возможности добавления к ним дополнительных функций, включая специальные «коды», которые на строительной площадке может сканировать робот, чтобы определять положение модуля конструкции в пространстве.

Помимо той экономии материала, которую можно получить с помощью 3D-печати узловых соединений, ещё меньшей материалоёмкости можно добиться за счет топологической оптимизации самих соединений [24], [25].

Оптимизация топологии привела к созданию органичной формы с меньшим количеством материала, при этом первоначальные функции соединителей по-прежнему обеспечиваются. Сама полученная деталь соединения оказалась на 15% меньше по весу, а применение более высокопрочных сталей может увеличить этот показатель ещё больше, кроме того, оригинальная и оптимизированная (по критерию массы) деталь не переходит в пластику, а значит её потенциал используется не полностью.

Резюмируя всё вышеописанное, можно сделать предположение, что благодаря аддитивным технологиям мы можем перевести проектирование ПСК с оптимальной компоновкой в практическую плоскость и оценить экономию металла, по сравнению с аналогичными традиционными решениями.

Целью данного исследования является оценка снижения материалоёмкости конструкции при использовании алгоритма оптимизации формы по сравнению с традиционным проектированием. В качестве объекта будет рассматриваться пространственная стержневая система, два варианта которой будут сравниваться. Для этого исследования разрабатывается алгоритм, позволяющий автоматически проектировать оптимальную стержневую систему, ведь без автоматизации процесса реализация подобных решений не является целесообразным.

2 Материалы и методы / Materials and Methods

Благодаря быстроразвивающимся технологиям, позволяющим производить изделия из стали любой геометрии без особых усилий, мы можем с помощью них, в будущем, отказаться от

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

необходимости унифицировать компоновку любой пространственной конструкции, отдавая предпочтение оптимизированным со сложной и нетиповой структурой. Однако, если на заводе без труда смогут произвести детали в любом количестве и любой сложности с применением промышленных принтеров, спроектировать подобную конструкцию традиционными методами будет практически невозможно и в случае пространственных стержневых систем намного проще и быстрее будет обратиться к классическим решениям, например системе МАРХИ. Однако, если получится полностью автоматизировать процесс проектирования, то есть получив готовую конструкцию только задав исходные данные, то мы подойдем ещё на шаг ближе к тому, чтобы иметь возможность отказаться от традиционных решений.

В рамках данной статьи разрабатывается алгоритм (скрипт), который позволит спроектировать по заданным исходным данным ПСК с неунифицированной оптимальной компоновкой практически без вмешательства инженера. Затем, чтобы проверить результат работы алгоритма, будет проведено сравнение двух решений по одним и тем же исходным данным: классического (система МАРХИ) и полученного в ходе работы скрипта.

Для создания прототипа алгоритма была выбрана среда визуального программирования GrassHopper, имплементированная в ПО Rhino (https://www.rhino3d.com/). Разрабатываемый скрипт включает в себя множество задач, каждая из которых может быть рассмотрена как самостоятельная программа. В совокупности рассмотренные отдельные скрипты представляют собой цикл проектирования пространственных стержневых конструкций. В первом приближении алгоритм, условно, можно разделить на четыре составляющие:

- Создание оптимальной стержневой системы
- Корректировка сечений стержней
- Проверка надежности конструкции
- Выгрузка характеристик системы

Вышеописанную структуру удобно представить в виде схемы, приведенной на рисунке 1:

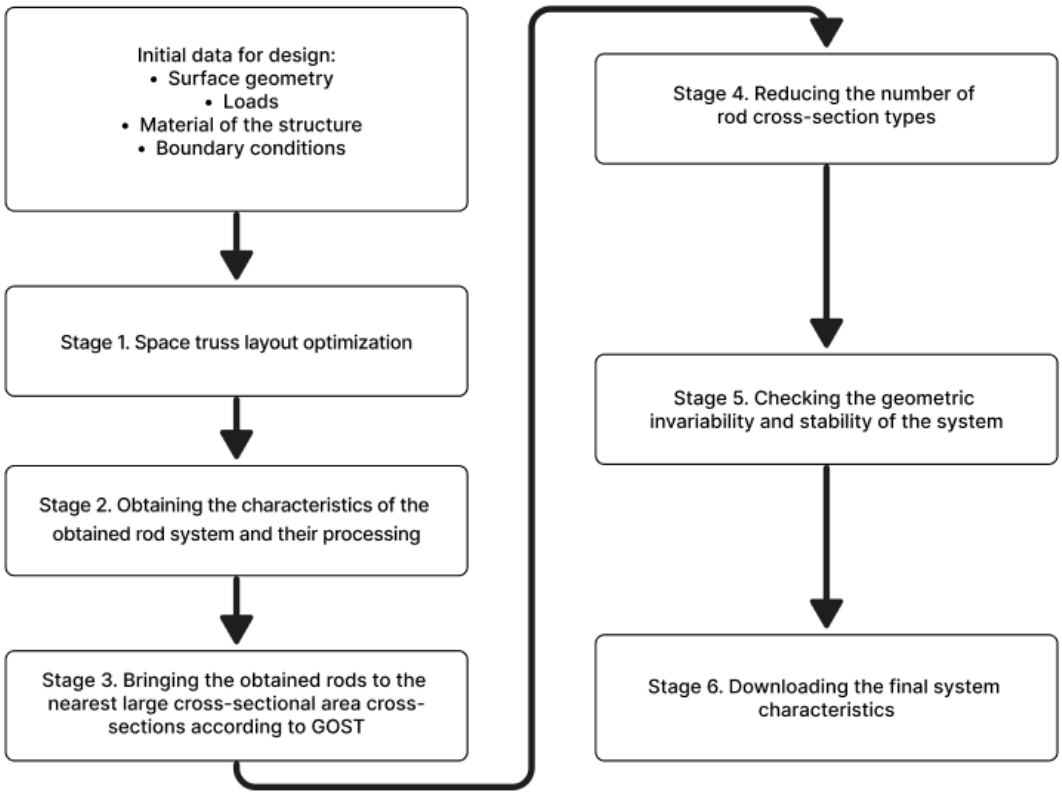

Fig. 1 – Schematic diagram of the algorithm under development
Рис. 1 – Принципиальная схема работы разрабатываемого алгоритма

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Обработка исходных данных задачи проектирования:

В качестве исходных данных, вводимых проектировщиком для работы алгоритма, являются следующие параметры:

- Сетка поверхности, отображающая границы и форму покрытия, поделенная согласно раскладке остекления/панелей (если материал покрытия «сплошной», то можно предоставить поверхность)
- Высота конструкции
- Нагрузки
- Граничные условия
- Марка стали
- Является ли конструкция симметричной (да, 1 плоскость симметрии; да, 2 плоскости симметрии; нет)
- ГОСТ на прокат круглых труб

Важно отметить, что исходные данные, вводимые проектировщиком, отличны от того, что принимает алгоритм на входе при создании геометрии системы. На основе введенных инженером данных алгоритм преобразовывает их согласно тому, какие данные нужны программе, они описаны ниже:

- Границы конструкции (Domain) – объемная область, образованная пространственной сеткой, в пределах которой будет формироваться стержневая система. Все дальнейшие исходные данные также должны быть в пределах данных границ. От того, какой шаг сетки выбран будет зависеть точность и скорость решения задачи. Домен выстраивается на основе введенных сетки поверхности и высоте конструкции
- Опирание конструкции – шарнирные опоры, раскрепляющие конструкцию по линейным координатам, но допуская поворот.
- Нагрузки – есть возможность задавать различные нагрузки, создавая отдельные загружения. В пространстве Rhino за каждый тип нагрузки отвечает свой объект: узловые нагрузки – вектора, линейные нагрузки – кривые, распределенные – сетки.
- Материал – необходимо задать характеристики используемого материала несущих конструкций.

Создание домена:

Для того, чтобы получить пространство запуска оптимизации, необходимо создать объемную сетку с заданными параметрами. Плотность сетки значительно влияет на продолжительность работы алгоритма, но при этом увеличивается точность решения.

Если конструкция является симметричной, то алгоритм запустит процесс формирования и оптимизации геометрии только для одной из симметричных сторон (для одной плоскости симметрии – половина исходной поверхности, для двух – четверть). Это позволит значительно сократить время работы скрипта в случае, если конструкция простая и симметричная.

Также, при моделировании границ конструкции, можно задать 1-мерные границы: линии, которые будут имитировать существующие или заранее предусмотренные конструкции, например колонны. Это нужно для того, чтобы контролировать количество элементов, которые придут в опору.

Задание граничных условий:

Так как в качестве изначальных границ задается только четверть всей конструкции, то и изначально будет задаваться только 1 опора (раскрепляющая X, Y, Z) под опорными стержнями. Так как алгоритмом предусмотрен тот факт, что в итоге точек опирания будет 4, проблем с геометрической изменяемостью не возникает.

Создание нагрузок:

Для того, чтобы создать оптимальную конструкцию без усложнения задачи архитектора разбивки покрытия на ограждающие конструкции, можно воспользоваться тем фактом, что в фермах принято прикладывать нагрузки в узлы. А значит и в нашем случае можно преобразовывать заданные нагрузки в узловые с регулярным шагом, гарантируя, что в плоскости кровли узлы конструкции будут расположены таким образом, чтобы ничто не помешало закреплению ограждающих элементов.

Задание материала конструкции:

Технология, применяемая для 3D-печати изделий из стали (SLM), предположительно применяемая для создания узлов, проигрывает литью тем, что результирует бо̲льшим

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

количеством внутренних дефектов (в данном случае, в основном, пористость) на данном этапе развития технологий. Выявить фактические недостатки готового изделия возможно только с помощью компьютерной томографии. Но, так как подобных исследований для напечатанных строительных конструкций пока не проводилось, в рамках данной статьи и разработки алгоритма материал стали узлов условно принимается равнопрочным материалу стержней.

В таблице 1 представлен набор параметров, определяющих материал конструкции. Пользователю будет достаточно только выбрать марку стали, остальные характеристики автоматически определятся алгоритмом.

Переход от нормативного сопротивления к расчетному осуществляется по формуле из пункта 6.1 СП16.13330.2017 «Стальные конструкции»:

$$R_y = \frac{R_{yn}}{\gamma_m} \tag{1}$$

где:
R_{yn} – нормативное сопротивление стали, МПа
γ_m – коэффициент надежности по материалу
R_y – расчетное сопротивление стали, Мпа

Table 1. Summary table of algorithm results
Таблица 1. Параметры стали, заданные в алгоритме

Марка стали (определяется пользователем)	Плотность стали, кг/м3	Нормативное сопротивление стали Ryn, МПа, в зависимости от толщины стенки трубы, мм		Коэффициент надёжности по материалу γ_m	Расчетное сопротивление стали при растяжении/сжатии Ry, МПа
С235	7850	От 2 до 4 вкл.	235	1.025	230
С245		От 2 до 20 вкл.	245		240
С255		От 2 до 3.9 вкл.	255		250
		От 4 до 10 вкл.	245		240
		Св. 10 до 20 вкл.	245		240
		Св. 20 до 40 вкл.	235		230
С345		От 2 до 10 вкл.	345		340
		От 10 до 20 вкл.	325		320
С355		От 8 до 16 вкл.	355		350
		От 16 до 40 вкл.	345		340
		От 40 до 60 вкл.	335		330
		От 80 до 80 вкл.	325		320
		От 80 до 100 вкл.	315		310
		От 100 до 160 вкл.	295		285

Формирование оптимальной геометрии стержневой системы

Все ранее описанные шаги являются исходными данными для оптимизации стержневой системы.

Результат данной части алгоритма опирается на большую часть того, что задает пользователь. Таким образом, для запуска этой части скрипта, необходимо:

- Объемные и линейные границы проектируемой конструкции, представленные объемной сеткой и линиями, поданные списком
- Нагрузки, представленные плоской или объемной сеткой, а также числовые значения нагрузки на проектируемую конструкцию
- Граничные условия, определяемые точками на границе конструкции и описывающие закрепленные степени свободы
- Материал конструкции, представленный набором текстовых и числовых параметров, описывающих характеристики материала

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Данная часть алгоритма имплементирует функционал, заложенный в плагин для Grasshopper под названием Peregrine. На основании исходных данных плагин находит оптимальную компоновку стержневой системы по критерию минимального объема (и, соответственно, массы) конструкции.

В итоге мы получим оптимальную топологию пространственной стержневой конструкции и набор данных, необходимых для дальнейшей работы алгоритма.

Получение характеристик системы и структура данных

По итогу оптимизации топологии и формирования компоновки стержневой системы мы получаем объемное отображение конструкции, а также предоставляется набор характеристик, представленных списком:

- Объем конструкции (фактический объем всех стержней), м^3.
- Твердые тела (объемная геометрия) каждого стержня.
- Линии стержней (линейная геометрия).
- Количество стержней в системе, шт.
    - Количество узлов в системе, шт.
    - Усилия в каждом стержне, кН.
    - Площадь поперечного сечения каждого стержня, м^2.

Важно отметить, что если мы изначально задавали конструкцию как симметричную, то приведенные характеристики рассчитываются именно для симметричной части, а не всей конструкции.

Для дальнейшей работы алгоритма, полученные характеристики необходимо преобразовать.

Во-первых, все стержни необходимо разделить по характеристике напряженного состояния – растянутые и сжатые. Это важно, потому что сечения сжатых стержней больше растянутых и при сведении количества типоразмеров к заданному минимуму не позволит завысить массу конструкции, назначая сечения сжатых стержней растянутым.

Во-вторых, объем конструкции переводится в массу по формуле (2). Если конструкция симметричная, то учитывается количество плоскостей симметрии.

$$M_1 = \frac{V_1 \rho k_{sim}}{1000} \tag{2}$$

где,

M_1 – масса конструкции после оптимизации компоновки, Т.

V_1 – объем конструкции после оптимизации компоновки, м^3.

ρ – плотность материала стали, кг/м^3.

k_{sim} – коэффициент, учитывающий симметрию (k_{sim}=1, если конструкция не симметрична, k_{sim}=2, если плоскость симметрии одна и k_{sim}=4, если плоскостей две).

В-третьих, список узлов изначально представлен как список узлов каждого стержня. То есть на каждый стержень приходится два узла и в местах соединения множества стержней может наслаиваться несколько узловых точек. Для этого список узлов «чиститься» от совпадающих дубликатов.

Наконец, с помощью полученных линий, отображающих каждый стержень, можно извлечь длину каждого из стержней.

По итогу, полученные характеристики можно разделить на условно две группы, соответственно собранные в таблицах 2 и 3:

Table 2. System characteristics after formation of the truss layout
Таблица 2. Характеристики системы после формирования компоновки конструкции

Характеристика	Обозначение	Единица измерения	Тип данных
Объем конструкции	V_1	м^3	Double
Масса конструкции	M_1	Т	Double
Количество узлов в системе	$N_{узл}$	Шт.	Int
Количество стержней в системе	$N_{ст}$	Шт.	Int

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Table 3. Characteristics of the rod after the formation of the truss layout
Таблица 3. Характеристики стержня после формирования компоновки конструкции

Характеристика	Обозначение	Единица измерения	Тип данных
Номер стержня	i	-	Int
Площадь поперечного сечения	A_{i1}	$м^2$	Double
Длина стержня	L_i	м	Double
Сжатый или растянутый	-	-	Boolean
Усилие в стержне	F_i	кН	Double

Корректировка сечений стержней

Площади поперечных сечений стержней, а также твердотельная геометрия труб, полученные в результате оптимизации компоновки, не соответствуют производимому прокату, а также стержневая система обладает большим количеством типоразмеров, которое усложнит работу завода и удорожит производство. В связи с этим, следующие два этапа алгоритма позволяют откорректировать сечения стержней, а затем свести их количество к заданному минимуму.

Инженеру предоставляется возможность выбрать необходимый или привычный ему ГОСТ для применения в конструкции.

Алгоритм переназначает сечения согласно принципу, при котором поперечная площадь трубы из сортамента минимально превышает исходную площадь. Затем, по значению новой площади подбираются соответствующие есть диаметр и толщина стенки трубы. Назначив все сечения, вычисляется промежуточная масса системы M_2, которая будет референтной при решении задачи унификации

Как ранее упоминалось, большое количество типоразмеров стержней может быть невыгодно для производства, поэтому инженеру необходимо проектировать ограниченное количество типоразмеров. В зависимости от общих габаритов конструкции количество различных сечений может разниться.

В рамках данного алгоритма количество типоразмеров сечений определяется самим пользователем на этапе ввода исходных данных. Чем их больше, тем масса конструкции может быть меньше, в данном случае – стремиться к массе, определенной в предыдущем пункте. Таким образом, алгоритм просит пользователя указать необходимое количество типоразмеров отдельно для сжатых и для растянутых стержней. И, на основании этих вводных алгоритм подбирает набор сечений таким образом, что масса конструкции увеличивается наименьшим образом.

Проверка геометрической неизменяемости и устойчивости системы:

Данный этап является поверочным и одним из завершающих в формировании пространственной фермы. Нужен потому, что получившаяся система, вероятнее всего, статически неопределима, а значит, что, изменив все сечения стержней, мы перераспределим усилия внутри системы. Поэтому необходима проверка, которая покажет, что получившаяся конструкция отвечает требованиям I и II предельных состояний.

В первую очередь, если наша конструкция задавалась как симметричная, то алгоритм её автоматически отзеркаливает один или два раза, в зависимости от количества заданных плоскостей симметрии в исходных параметрах.

Далее, получившуюся геометрию (а именно – линии), условия закрепления, данные о жесткостях стержней и нагрузках алгоритм передает в файл проекта в программе RFEM, в которой на основании всех переданных данных формируется расчетная схема, которую пользователь может отдельно посчитать и убедиться в её прочности, устойчивости и геометрической неизменяемости.

Получение итоговых характеристик пространственной фермы:

Закончив адаптацию и оптимизацию сечений стержней, а также проверив надёжность получившейся конструкции, пользователь получает уже итоговые характеристики каждого стержня и системы в целом, которые можно будет сравнивать с другими решениями, например, при разных вариантах исходных данных для одной задачи. Характеристики, получаемые пользователем, приведены в таблице 4.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Table 4. Final system characteristics
Таблица 4. Итоговые характеристики системы

	Характеристика	Обозначение	Ед.изм.	Тип данных
Пространственная стержневая конструкция	Объем конструкции	V_3	$м^3$	Double
	Масса конструкции	M_3	Т	Double
	Количество узлов в системе	$N_{узл}$	Шт.	Int
	Количество стержней в системе	n	Шт.	Int
Отдельно взятый стержень	Номер стержня	i	-	Int
	Площадь поперечного сечения	A_{i3}	$м^2$	Double
	Длина стержня	L_i	м	Double
	Сжатый или растянутый	-	-	Boolean
	Усилие в стержне	N_i	кН	Double
	Диаметр трубы	D_i	Мм	Double
	Толщина стенки трубы	t_i	мм	Double

3 Результаты и их обсуждение / Results and Discussion

Теперь на примере конкретной задачи будет рассмотрена работа алгоритма, а также проанализированы результаты, полученные по итогу. Так как скрипт сформирован в среде визуального программирования GrassHopper, практически все данные и результаты будут отображены либо в ней, либо в среде программы Rhino (https://www.rhino3d.com/).

Задание исходных данных

В методе был рассмотрен набор параметров, являющихся входными данными для работы алгоритма. Теперь зададимся конкретными значениями, на основании которых скрипт сформирует стержневую систему и её узлы.

Для исследования будет принято плоское покрытие павильона, прямоугольное в плане и габаритами 20х20 метров, опирание на 4 колонны. Пролёт в обоих направлениях 10 метров, в торцах консоли 5 метров. Конструкция дважды симметричная. Граничные условия (опирание) задается входной геометрией (точки + линии). Исходные данные собраны в таблице 5.

Table 5. Initial data
Таблица 5. Исходные данные

Параметр	Ед.изм.	Значение
Размеры конструкции в плане	м x м	20x20
Высота конструкции	м	2.5
Пролёт конструкции	м	10
Консоль конструкции	м	5
Граничные условия	-	4 точки опоры, из которых под углом 45 градусов выходят по 4 предопределенных стержня (линейное граничное условие)
Количество плоскостей симметрии	Шт.	2
Шаг раскладки панелей покрытия	м x м	2
Нагрузка на покрытие	$кН/м^2$	4.68
Марка стали по ГОСТ 27775-2015	-	С345
Сортамент труб	-	ГОСТ 8732-78
Количество типоразмеров	-	2 для сжатых стержней / 2 для растянутых

Результат оптимизации стержневой системы:

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

В первую очередь происходит оптимизация компоновки с получением наименьшего объема конструкции. (Рисунок 2). По результатам данного алгоритма получаем, что полученный объем конструкции равен 1.537 м^3 (что равносильно 12.062 Т массы) - данное значения станет реферальным при дальнейшей обработке. Так как вся конструкция является симметричной, количество уникальных элементов можно считать по четверти конструкции: 179 стержней, 46 узлов.

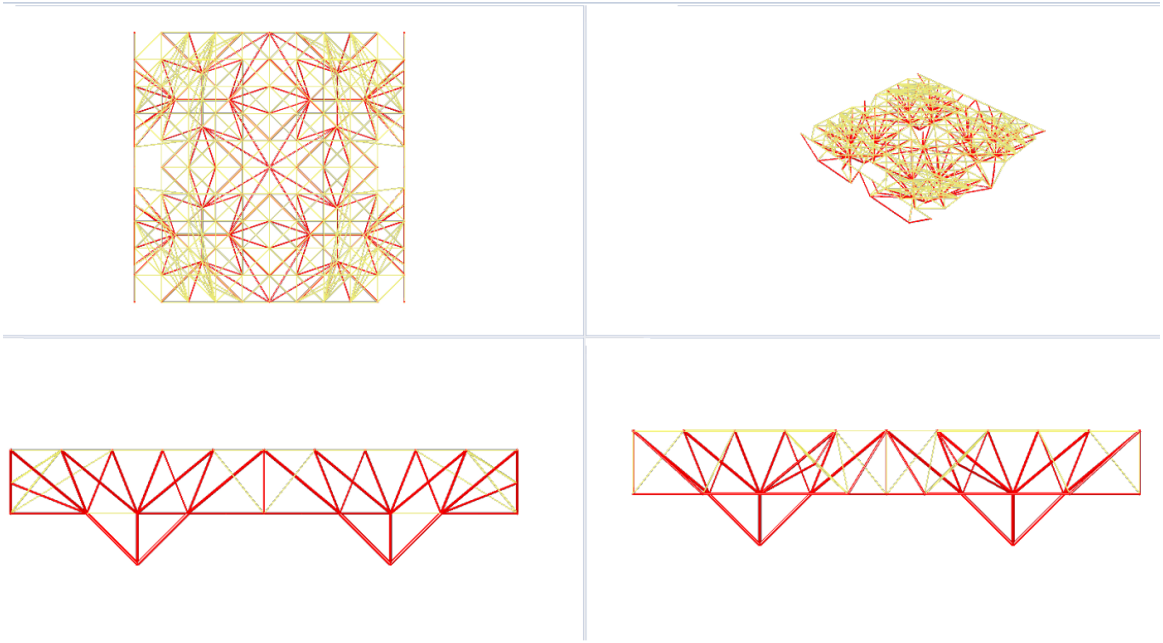

Fig. 2 – The result of layout optimization. Yellow - stretched elements, red - compressed elements
Рис. 2 – Результат оптимизации компоновки. Желтые – растянутые элементы, красные - сжатые

Однако данный результат обладает большим количеством узлов, элементов в этих узлах, а также сечения самих элементов являются слишком маленькими. В связи с этим алгоритм проводит пост-обработку: упрощение решения и оптимизация геометрии с целью получения наименьшего возможного количества элементов, узлов, но ценой возможного увеличения объема. В результате получается оптимизированная конструкция с объемом 1.4309 м^3 (что меньше реферального значения на 6.9%). Количество уникальных узлов осталось неизменным – 46, а стержней стало меньше – 166. (Рисунок 3). Если учесть, что плотность стали принята 7850 кг/м^3, то получаем массу после оптимизации 11.232 Т.

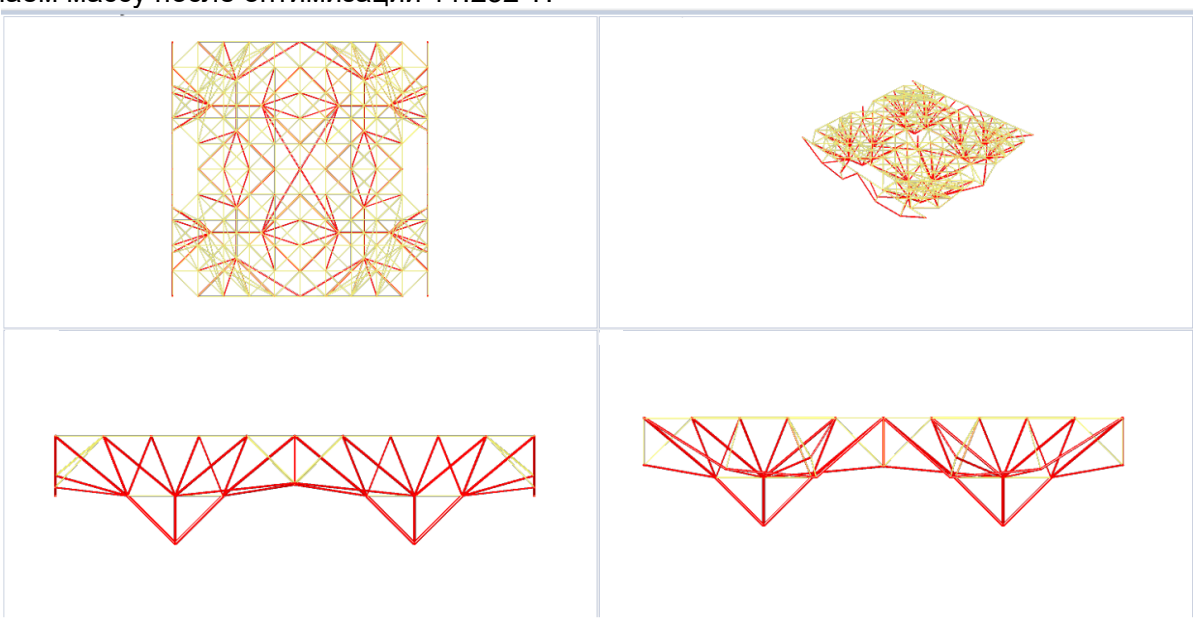

Fig. 3 – View of the construction after post-processing
Рис. 3 – Вид конструкции после пост-обработки

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Переназначение сечений стержней:

Дальнейшая обработка полученной конструкции нужна для того, чтобы уменьшить количество поперечных сечений стержней до возможного минимума без значительного прироста массы конструкции. Этот шаг в сторону унификации, к сожалению, никак не пропустить ввиду того, что производить множество различных сечений проката не значительной длины – очень затратно, а аддитивное производство стержневых элементов пока не рассматривается.

В исходных данных был задан сортамент по российскому государственному стандарту ГОСТ 8732–78 [26], а значит, именно по нему будут подбираться новые сечения стержней, а затем и проводится их унификация.

В результате переназначения сечений каждого стержня получается обновленная конструкция с реальными прокатными трубами, а новая масса конструкции составила 11.388Т, что превышает значение, полученное при оптимизации всего на 1.4%.

Далее алгоритм подбирает по 2 типоразмера на каждую из подгрупп. В результате получаем систему, которая всего в 1.45 раз тяжелее, чем с множеством типоразмеров, но в 1.7 раз легче, чем с двумя типоразмерами, а именно с массой 16.455Т.

Проверка надёжности системы:

Завершая данный этап работы, важным действием, обосновывающим жизнеспособность конструкции – это проверка её стабильности и геометрической неизменяемости.

Алгоритм подготавливает и передает информацию в расчетный комплекс: геометрию, закрепления, жесткости и нагрузки, запускаем расчет. Ошибок не возникло, значит конструкция геометрически неизменяемая и можно проанализировать результаты.

На рисунке 5 мы можем видеть перемещения конструкции от заданных в исходных данных нагрузок. Наибольшее значение вертикального перемещения – 38.2 мм в консольной части конструкции. Согласно приложению Д СП20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия.» предельно допустимый прогиб консоли 5м равен 47.4мм, следовательно, наша конструкция удовлетворяет требованиям по проверке второго предельного состояния.

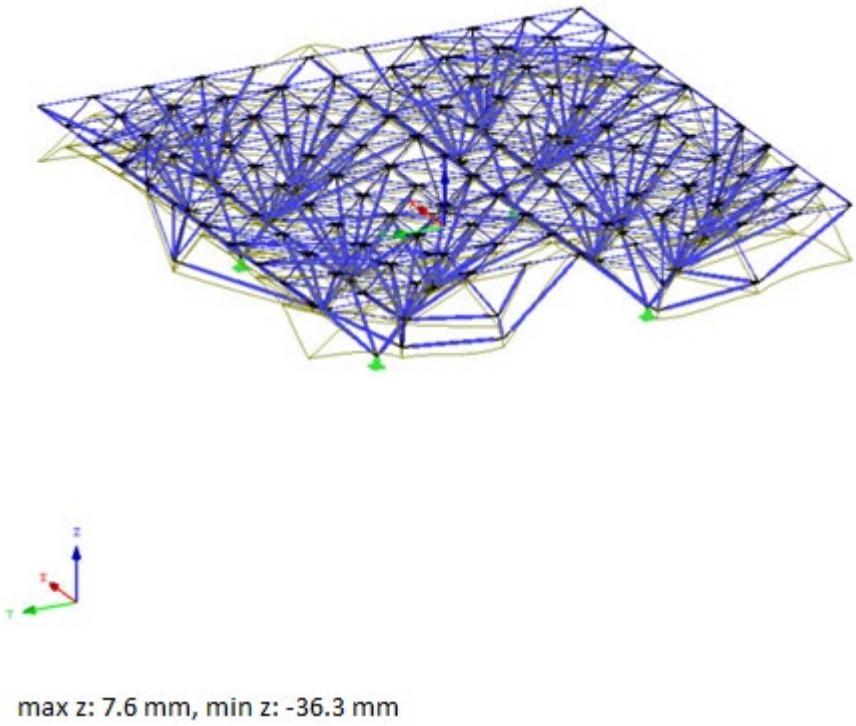

Fig. 4 – Vertical movements in the structure
Рис. 4 – Вертикальные перемещения в конструкции

Также, обращая внимание на картину распределения напряжений (рис.6), можно заметить, что алгоритм верно определил сжатые и растянутые элементы, а значит вся вышеописанная работа была проделана корректно.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

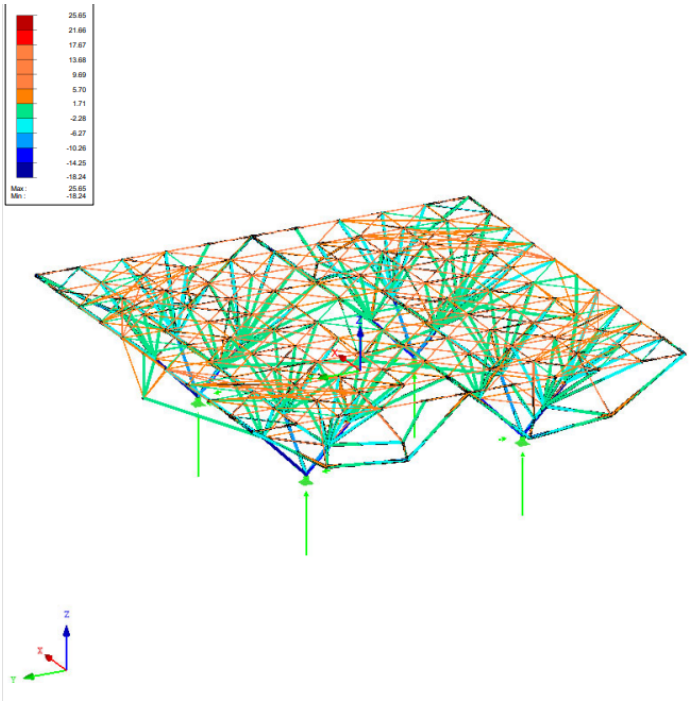

Fig. 5 – Normal stresses in rods based on the results of structural stability testing in RFEM
Рис. 5 – Нормальные напряжения в стержнях по итогам проверки стабильности конструкции в RFEM

Итоговый результат формирования стержневой системы:

В результате проделанных операций, сформирована нетиповая стержневая система с минимальным количеством типоразмеров сечений. Данное исследование не только изучает вопрос эффективности применения печатных узловых соединений для оптимизации компоновки системы, но также обращает внимание на то, как количество типоразмеров стержней сильно влияет на общую массу системы. В сводной таблице 6 собраны данные всех этапов формирования конструкции.

Table 6. Summary characteristics of the space truss at the end of different stages
Таблица 6. Сводные характеристики ПСК по итогам разных этапов

Этап формирования системы	Количество типоразмеров сечений стержней:				Масса конструкции, Т
Оптимизация компоновки	179				12.062
Оптимизация геометрии	166				11.232
Приведение сечений к сечениям по ГОСТ 8732-78	76				11.388
Унификация типоразмеров сечений по 4 группам	4				16.455
	сжатые		растянутые		
	133x20	133x8	89x5.5	54x3	
Прочие характеристики системы					
Итоговое количество элементов в системе					664
Количество уникальных стержней в системе					166
Итоговое количество уникальных узловых соединений					46

Сравнение с традиционным решением

Перед тем, как перейти к этапу с формированием узловых соединений, важно проанализировать полученные промежуточные результаты работы алгоритма. Полученные нестандартные конструктивные решения необходимо обосновать. В данной работе, при

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

разработке и исследовании новой технологии создания стержневых систем мы стремимся сделать так, чтобы полученный результат ни в чем не уступал традиционным: в скорости проектирования, скорости и затратах на создание и сборку на заводе, а также укрупненной сборке непосредственно на строительной площадке. Однако, хотя бы один фактор должен выступать вперед, иначе смысла в алгоритме нет, и, в данном случае, определяющим фактором будет являться масса конструкции. Выше уже была определена масса исследуемой стержневой системы, следовательно, необходимо сравнить полученный результат с традиционными решениями – в них унифицированы не только сечения стержней, но также и их компоновка, образуя самостоятельные пирамидальные сегменты, что упрощает создание таких конструкций, но в жертву приносится металлоёмкость.

Для качественного сравнения двух решений, зададимся идентичными условиями и исходными данными, которые позволят точно сравнить два решения:

- Габариты и опорные элементы совпадают: в плане конструкция также имеет размеры 20х20 метров, а расстановка опор делит конструкцию на пролет 10м и консоли по 5м. Размеры кровельных панелей 2х2м.
- Количество типоразмеров стержней остается таким же, которое было принято ранее в пункте 1.4 – 4 поперечных сечения. Деление на группы и подгруппы аналогично – 2 типа сжатых и 2 типа растянутых элементов
- Нагрузки принимаются согласно исходным данным, описанным ранее

Полученную конструкцию можно увидеть на рисунке 7. Зеленые и синие стержни – растянутые, красные и чёрные – сжатые.

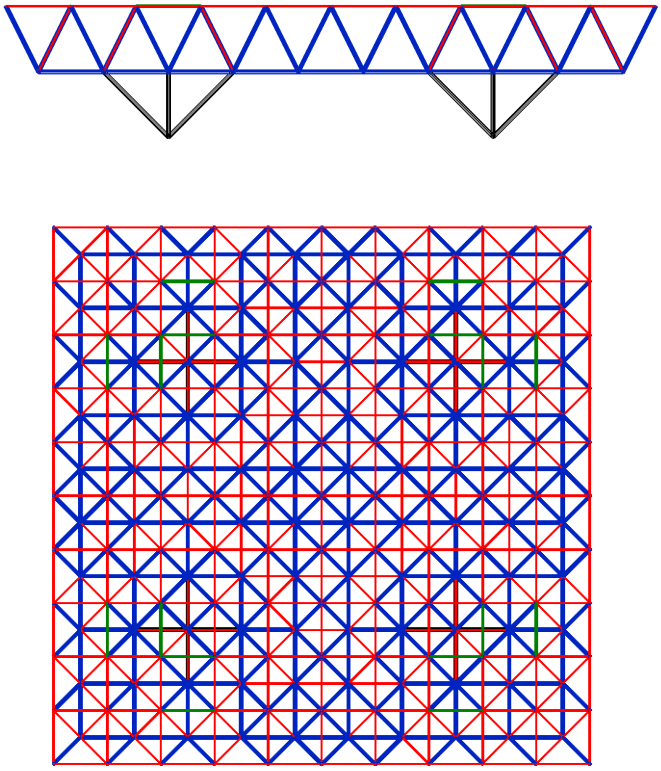

Fig. 6 – Conventional design of a space truss
Рис. 6 – Традиционное исполнение пространственной стержневой конструкции

В таблице 7 приведены весовые характеристики полученной конструкции и сравнение их с искомой стержневой системой.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Table 7. Results of the comparison of the two designs
Таблица 7. Результаты сравнения двух конструкций

	Традиционная конструкция с унифицированной компоновкой	Конструкция с нетиповой оптимизированной компоновкой	Разность результатов
Масса сжатых элементов, Т	24.441	12.523	**11.918 Т**
Масса растянутых элементов, Т	3.770	4.142	**-0.372 Т**
Полная масса конструкции, Т	28.211	16.455	**11.756 Т**
Количество стержневых элементов, шт.	832	680	**152 шт.**

Исходя из данных, приведенных в таблице, можно наблюдать, что оптимизация компоновки привела к увеличению массы растянутых стержней на 9%, но также и уменьшению веса сжатых элементов почти в 2 раза. Совокупное уменьшение массы конструкции за счет оптимизации компоновки составило 58.3% для заданных исходных параметров задачи. Кроме того, количество отдельных стержней также уменьшилось на 18.3% процента.

Таким образом, можно сделать вывод, что, оптимизируя компоновку стержневой системы, мы экономим большое количество материала.

В перспективе дальнейших исследований необходимо будет обратить внимание на несколько вещей, которые оказались не решены в рамках данного алгоритма. Во-первых, так как все узлы подобных конструкций предполагаются аддитивно произведенными, необходимо учитывать качество стали, получаемую при печати с помощью технологии SLM, которая проигрывает литью тем, что результирует бо̲льшим количеством внутренних дефектов (в данном случае, в основном, пористость) на данном этапе развития технологий. Выявить фактические недостатки готового изделия возможно только с помощью компьютерной томографии. Этот факт говорит нам о том, что при задании нормативного значения сопротивления стали, необходимы дополнительные занижающие коэффициенты. Определение данных коэффициентов требует дополнительных исследований с множественными испытаниями напечатанных изделий узлов конструкций, чтобы достоверно говорить о действительной несущей способности каждой детали.

Во-вторых, сам алгоритм оптимизации компоновки учитывает только 1 комбинацию загружений, что не позволяет полноценно оценить работу конструкции и оптимизировать под несколько расчетных ситуаций одновременно.

В-третьих, учитывая сложную компоновку и расположение стержней, при унификации и, соответственном, увеличении поперечного сечения стержней, есть риск их «пересечения». Данную проблему можно решить, введя дополнительные условия в исходных алгоритм оптимизации, контролирующий минимальные расстояние между осями стержней.

4 Заключение / Conclusions

В рамках данного исследования был разработан алгоритм автоматизированного проектирования пространственной стержневой конструкции с оптимальной компоновкой и на примере конкретной задачи продемонстрировано, что подобный подход позволит значительно снижать материалоёмкость конструкций. Однако, все это возможно только при полной автоматизации процесса проектирования, а также с учетом того, что все узловые соединения также генерируются автоматически и производятся аддитивно с применением промышленных принтеров.

Алгоритм способен решать отдельные задачи в рамках одного проекта по разработке конструкции:

- Формировать оптимальную компоновку конструкции на основании исходных данных

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

- Автоматически подбирать сечения стержней по выбранному сортаменту и унифицировать количество типоразмеров до необходимого
- Подготавливать расчетную модель для проверки надёжности конструкции
- Выгружать все необходимые данные по стержневой системе

Подводя итог, можно выделить следующие результаты исследования:

1. Быстроразвивающиеся технологии аддитивного производства открывают новые возможности в строительстве. Так, например, развитие промышленных принтеров, позволяющих печатать металлические изделия, позволяют обратить внимание на проектирование стержневых конструкций с оптимальной неунифицированной компоновкой.
2. Создан алгоритм, позволяющий полностью автоматизировать процесс создания сложных конструкций с оптимальной компоновкой.
3. Подобный подход к проектированию конструкций не только ускорит процесс выпуска документации, но и позволит экономить до 58% материала по сравнению с традиционным подходом.

References

1 Burkhalter, M., Sumi, C. and Schleith, S. (2021) Konrad Wachsmann's Grapevine Structure: Timber Variations on a Pre-Existing Concept. *Architectural Theory Review, Routledge*, **25**, 267–278. https://doi.org/10.1080/13264826.2021.1971840

2 Beckh, M. (2015) Hyperbolic Structures. Hyperbolic Structures: Shukhov's Lattice Towers - Forerunners of Modern Lightweight Construction, Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118932711

3 Haber, R.B. and Abel, J.F. (1982) Initial Equilibrium Solution Methods for Cable Reinforced Membranes Part I—Formulations. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, North-Holland, 30, 263–284. https://doi.org/10.1016/0045-7825(82)90080-9

4 Schek, H.J. (1974) The Force Density Method for Form Finding and Computation of General Networks. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, North-Holland, 3, 115–134. https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90045-0

5 Linkwitz, K. (1976) Combined Use of Computation Techniques and Models for the Process of Form Finding for Prestressed Nets, Grid Shells and Membranes. Proceedings of Internationalen Symposium Weitgespannte Flächentragwerke. https://link.springer.com/article/10.1007/s13296-020-00396-4

6 Barnes, M.R. (1999) Form Finding and Analysis of Tension Structures by Dynamic Relaxation. International Journal of Space Structures, SAGE PublicationsSage UK: London, England, 14, 89–104. https://doi.org/10.1260/0266351991494722

7 Lewis, W.J. (2005) Design of Tension Structures: Challenges and Misconceptions. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer, Thomas Telford Ltd, 158, 231–241. https://doi.org/10.1680/muen.2005.158.3.231

8 Veenendaal, D. and Block, P. (2012) An Overview and Comparison of Structural Form Finding Methods for General Networks. International Journal of Solids and Structures, Pergamon, 49, 3741–3753. https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2012.08.008

9 Haug, E. and Powell, G.H. (1972) Analytical Shape Finding for Cable Nets. Proceedings of the 1971 IASS Pacific Symposyum, 83–92. https://cir.nii.ac.jp/crid/1571980075075585152

10 Lachauer, L. and Kotnik, T. (2010) Geometry of Structural Form. Advances in Architectural Geometry 2010, Springer Vienna, Vienna, 193–203. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0309-8_14

11 Lachauer, L., Jungjohann, H. and Kotnik, T. (2011) Interactive Parametric Tools for Structural Design. IABSE-IASS Symposium 2011, London, United Kingdom, September 20-23, 2011. http://www.schwartz.arch.ethz.ch/Publikationen/Dokumente/InteractiveTools.pdf

12 Tessmann, O. (2008) Collaborative Design Procedures for Architects and Engineers. Cybernetics, KOBRA, Kassel. https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/2008100124162

13 Magna, R. La, Gabler, M., Reichert, S., Schwinn, T., Waimer, F., Menges, A. and Knippers, J. (2013) From Nature to Fabrication: Biomimetic Design Principles for the Production of Complex Spatial Structures. International Journal of Space Structures, SAGE PublicationsSage UK: London, England, 28, 27–39. https://doi.org/10.1260/0266-3511.28.1.27

14 Knippers, J. and Speck, T. (2012) Design and Construction Principles in Nature and Architecture. Bioinspiration & Biomimetics, IOP Publishing, 7. https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/1/015002.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

15 Mueller, C.T. (2016) 3D Printed Structures: Challenges and Opportunities By. Structure Magazine, 54, 54. https://www.structuremag.org/?p=9396

16 Fairclough, H.E., He, L., Pritchard, T.J. et al. (1 more author) (2021) LayOpt: an educational web-app for truss layout optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, 64 (4). pp. 2805-2823. https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-021-03009-8

17 He, L., Gilbert, M. and Song, X. (2021) A Python script for adaptive layout optimization of trusses. Structural and Multidisciplinary Optimization, 60 (2). pp. 835-847. https://doi.org/10.1007/s00158-019-02226-6

18 Jiang, C., Tang, C., Seidel, H.-P. and Wonka, P. (2017) Design and Volume Optimization of Space Structures. ACM Transactions on Graphics, ACMPUB27New York, NY, USA, 36, 1–14. https://doi.org/10.1145/3072959.3073619

19 Suzuki, S. and Knippers, J. (2018) The Design Implications of Form-Finding with Dynamic Topologies. Humanizing Digital Reality, Springer Singapore, Singapore, 211–223. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6611-5_19

20 Born, L., Jonas, F.A., Bunk, K., Masselter, T., Speck, T., Knippers, J. and Gresser, G.T. (2016) Branched Structures in Plants and Architecture. Springer, Cham, 195–215. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46374-2_10

21 He, L., Li, Q., Gilbert, M. et al. (4 more authors) (2022) Optimization-driven conceptual design of truss structures in a parametric modelling environment. Structures, 37. pp. 469-482. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.048

22 Bach, P., Giacomini I., Kladeftira M. (2022) Self-interlocking 3D Printed Joints for Modular Assembly of Space Frame Structures. Towards Radical Regeneration. pp. 427-441. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13249-0_34

23 Díaz Valdés, M., Martínez González, M. F., & Geremia, L. (2023). Rumbo a la construcción sostenible por medio de la madera y el diseño paramétrico: aplicaciones y resultados . Nexo Revista Científica, 36(05), 51–62. https://doi.org/10.5377/nexo.v36i05.17282

24 Behnejad S.A., Parke G.A.R. and Samavati O.A. (2021). Tailored Structures – Parametrics for sustainable Constructions. Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7th International Conference on Spatial Structures. https://www.researchgate.net/publication/358139249_Tailored_Structures_-_Parametrics_for_sustainable_Constructions

25 GOST 8732–78 «Seamless hot-deformed steel pipes. Range of sizes». https://docs.cntd.ru/document/1200001512