

А.А. СВЕНТИКОВ¹, Д.Н. КУЗНЕЦОВ¹¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РЕШЕТЧАТЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Аннотация. Архитектура современных зданий и сооружений, требует применения конструктивных систем в широком диапазоне как геометрических, так и топологических форм. Пространственные стержневые стальные конструкции позволяют создавать одни из самых вариативных, сложных и востребованных видов конструктивных форм покрытий зданий и сооружений.

Рассмотренная в статье методика построения пространственных решетчатых конструкций сложной геометрической формы, основана на автоматизированных методах компьютерного моделирования оболочечной поверхности и последующей разработки отдельной пространственной ячейки решетки определенного типа – «семейства». Структурная ячейка решетки является основой для топологической структуры строительной системы, которая создается с использованием специального программного обеспечения. Результатом указанной разработки является цифровая модель мегаструктуры всей пространственной конструкции. Последующий экспорт построенной геометрии в расчетные программные комплексы позволяет оценить напряженно-деформированное состояние системы и подобрать поперечные сечения всех ее элементов.

Разработанная в статье методология позволяет быстро и точно проектировать пространственные структурные конструкции покрытий произвольной геометрической формы. Скорость и точность моделирования и расчета решетчатых конструкций, достигаются за счет оптимизации последовательности применения современных программ и использования специальных приемов моделирования.

Ключевые слова: строительная конструкция, стержневая система, покрытие, структура, сложная геометрическая форма, моделирование криволинейных покрытий, топология строительной системы.

A.A. SVENTIKOV¹, D.N. KUZNETSOV¹¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

COMPUTER-AIDED DESIGN OF SPATIAL LATTICE STEEL STRUCTURES FOR COATINGS OF COMPLEX SHAPE

Abstract. The architecture of modern structures requires the use of structural systems in a wide range of both geometric and topological forms. Spatial steel structures are one of the most varied, complex and demanded types of structural forms of coatings for buildings and construction structures.

The method of constructing spatial lattice structures of a complex geometric shape considered in the article is based on automated methods of computer modeling of the shell surface and the subsequent development of a separate spatial cell of a lattice of a certain type - a "family". The structural cell of the lattice is the basis for the topological structure of the building system, which is created using special software. The result of this development is a digital model of the megastructure of the entire spatial structure. Subsequent export of the constructed geometry to computational software systems allows one to estimate the stress-strain state of the system and select the cross sections of all its elements.

The methodology developed in the article makes it possible to quickly and accurately design spatial structural structures of coatings of an arbitrary geometric shape. The speed and accuracy of modeling and calculation of shell lattice structures is achieved by optimizing the sequence of application of modern programs, using special modeling techniques.

Keywords: *building structure, core system, covering, structure, complex geometric shapes, modeling of curved surfaces, topology of the building system.*

Введение

Современная архитектура направляет значительные усилия на поиски новых архитектурно-конструктивных решений зданий и сооружений [1, 2]. Геометрия покрытия строительной системы является важным объектом поисковых вариантов решений [3-6]. Одним из наиболее перспективных направлений являются пространственные покрытия со сложной структурно-компоновочной организацией формы [7, 8]. Для зданий со средними и большими пролетами данные формы конструктивных решений наиболее целесообразно выполнять в виде стержневых стальных конструкций [9, 10]. Современные конструктивные решения покрытий характеризуются высокой структурно-компоновочной вариабельностью [11, 12]. В связи с этим при проектировании конструкций покрытий сложной формы возникают большие трудности в создании конструктивных и расчетных решений [13, 14].

На современном этапе в области строительства одним из эффективных инструментов разработки конструктивных решений являются программные комплексы, поддерживающие технологии информационного моделирования зданий – Building Information Modeling (BIM). Указанные технологии позволяют создавать цифровые модели конструктивных решений строительных систем со сложной геометрической и топологической формой.

В результате анализа источников рассматривающих приемы проектирования решетчатых конструкций сложной геометрической формы с использованием технологий информационного моделирования [15-18] выявлено, что практически не изучаются указанные вопросы применительно к стальным конструкциям сложной формы, с объемной структурной решеткой (не принадлежащей одной криволинейной поверхности). Наиболее близка к рассматриваемой тематике работа [19], где изучаются вопросы разработки моделей поверхностей с криволинейными образующими, но на прямоугольном плане в уровне опорной плоскости.

На основании ранее изложенного, представленная статья посвящена разработке автоматизированной методики проектирования пространственных решетчатых стальных конструкций покрытий сложной формы, с использованием современных возможностей BIM-технологий.

Модели и методы

В качестве объекта исследования назначим двухслойные решетчатые пространственные покрытия. Также данные системы носят название пространственных структур.

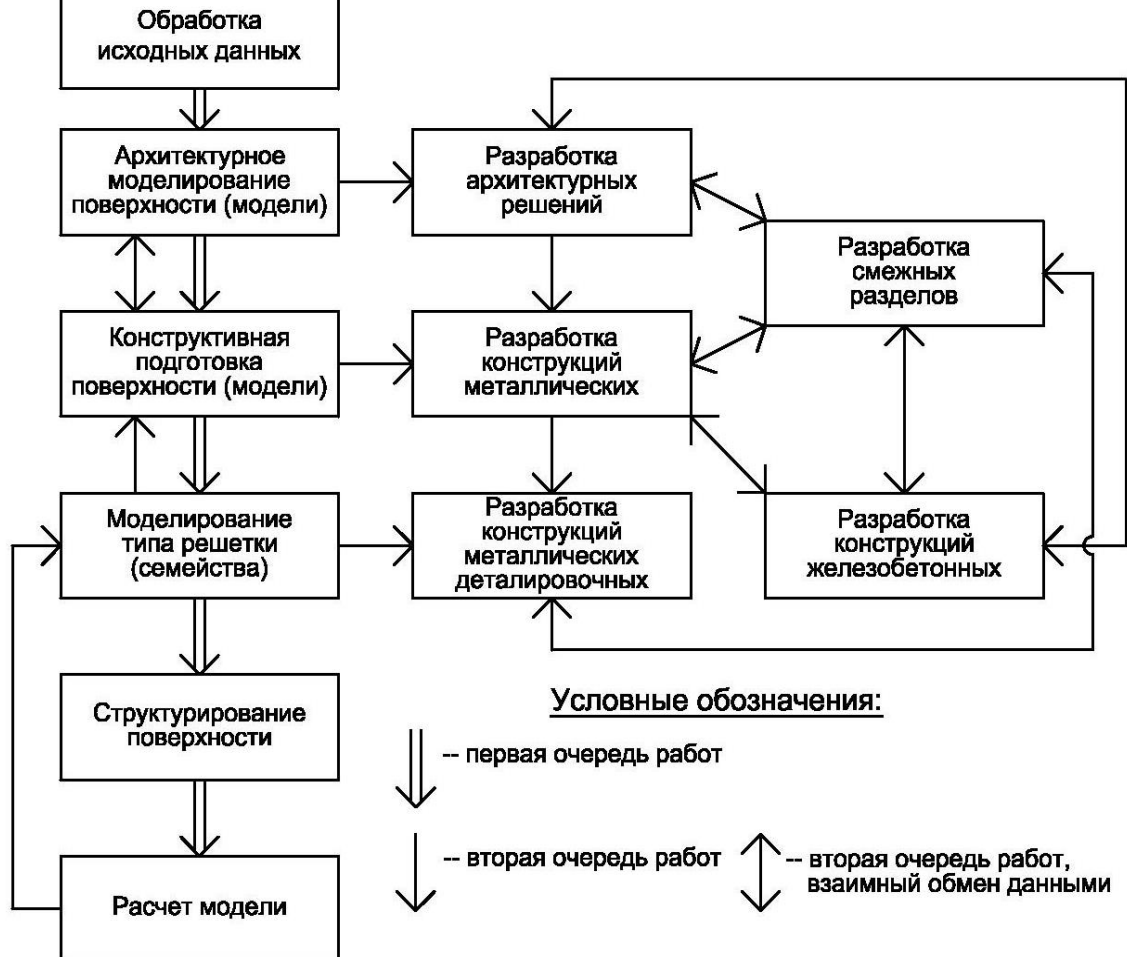
На рисунке 1 показана укрупненная блок-схема последовательности проектирования сложных конструктивных систем с использованием BIM-технологий.

В качестве инструмента для построения цифровых моделей пространственных структурных покрытий мы используем программную среду Revit.

На начальном этапе выполняется построение геометрической поверхности конструктивной системы в соответствии с заданной архитектурной концепцией. После этого конструктор выполняет ее деление на образующие. В программной среде Revit разбиение поверхности в двух направлениях выполняется изопараметрическими линиями. В классической теории оболочек такими линиями принято называть - линии кривизны.

На следующем этапе проектирования подбирается оптимальная структура конструкции покрытия. Для этого используются ранее созданные типы регулярной решетки, в виде отдельного «семейства» или создаются новые «семейства», с решеткой для

☐ ☐



Последовательности логичных действий конструктора из логном этого

После структурирования модели решетчатая конструкция покрытия дополнительно

структурную расчетную модель и рассчитывают внутренние силовые факторы. Последовательность назначения геометрических граничных условий, жесткостных характеристик и нагрузок не отличается от известного алгоритма для более простых систем. Подбор поперечных сечений выполняют аналитическим методом по найденным усилиям, и/или в среде расчетной программы [20, 21].

После унификации подобранных сечений выполняется переназначение параметров решетки пространственной стержневой модели, а также корректировка поперечных сечений в ранее уже созданном «семействе». Затем выполняется изменение параметров структуры модели, и модель направляется для дальнейшей разработки архитектурных и конструктивных решений. В смежных разделах прорабатываются вопросы технологии изготовления и монтажа разработанного конструктивного решения пространственной структурной конструкции покрытия.

Результаты исследования и их анализ

Для иллюстрации описанной методики построим в программной среде Revit цифровую модель покрытия в виде гиперболического параболоида или сокращенно - гипара [22].

1. Проектирование конструктивной формы покрытия

Для моделирования поверхности в вкладке «семейства» выбираем «новые концептуальные формы» и произвольным образом задаем три дуги, расположенные в трех параллельных плоскостях. Выделяем три созданные дуги, и нажимаем команду – «создать форму». В результате получаем оболочечную несимметричную поверхность, построенную через три произвольно заданные дуги (смещенные), лежащие в трех различных плоскостях (см. рисунок 2).

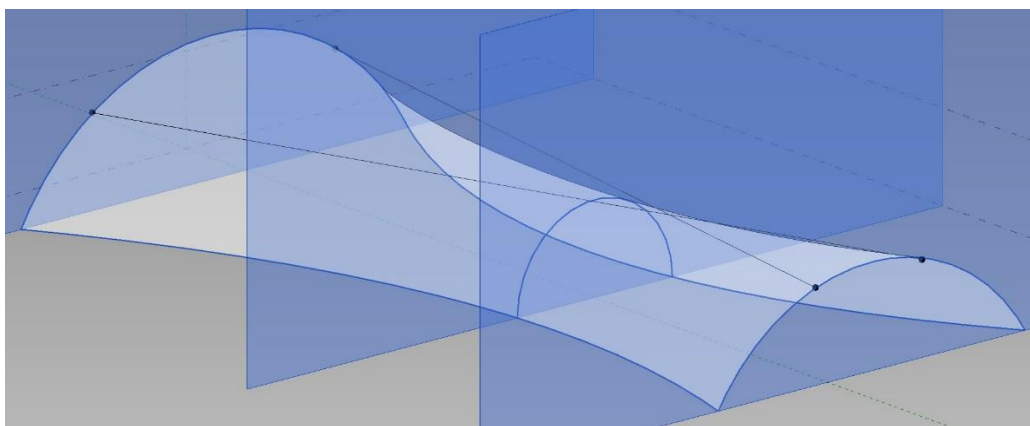


Рисунок 2 - Общий вид поверхности в виде гиперболического параболоида

Отметим, что созданная тестовая поверхность принадлежит к поверхностям с двойной главной кривизной, с разными знаками. Так как центры кривизны расположены по разные стороны относительно поверхности, то произведение двух главных кривизн или гауссова кривизна, имеет отрицательный знак:

$$K = \frac{1}{R_1} \times \frac{1}{R_2} < 0,$$

где K - гауссова кривизна; R_1 - первая главная кривизна поверхности; R_2 - вторая главная кривизна поверхности.

После построения модели поверхности, выполняем ее деление на образующие. В программной среде Revit разбиение поверхности выполняется изопараметрическими линиями.

Созданная сетка образующих линий имеет вид пересекающихся на поверхности парабол и гипербол (см. рисунок 3). В программе Revit параметры сетки образующих возможно задавать числом или геометрическим размером шага. В представленном примере поверхность гипара имеет разбиение, при котором образующие гипербола в продольном направлении поделены поперечными параболом на пятнадцать проекционно равных частей, а каждая образующая парабола в поперечном направлении (гипара) поделена продольными гиперболами на десять равных частей.

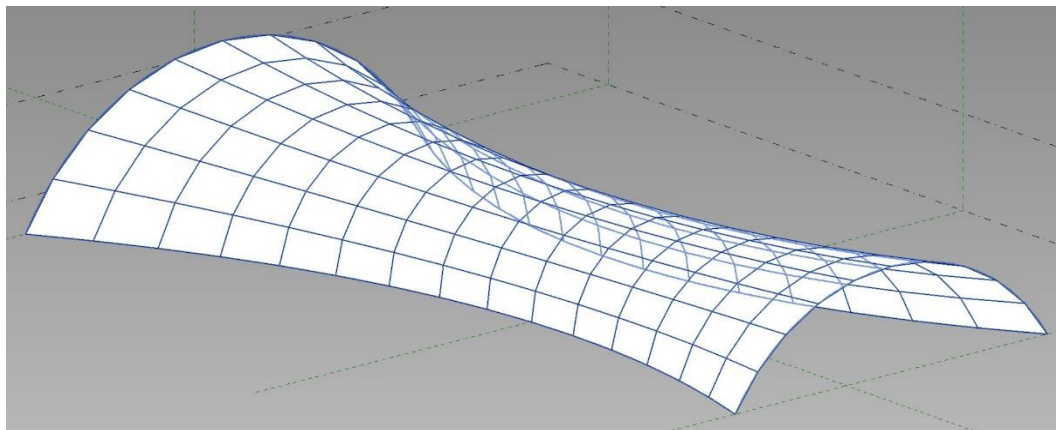


Рисунок 3 - Общий вид деления поверхности на сетку из образующих

2. Построение регулярной решетки конструкции покрытия

В программной среде Revit можно использовать известные (ранее загруженные в комплекс) виды решеток или смоделировать новый тип топологии решетки.

Для создания нового типа решетки конструктивной системы первоначально выбирается подходящее по параметрам стандартное «семейство», в файле которого создается новая конструкция решетки.

На рисунке 4 представлены два типа решетки стержневой структуры. Созданный вид решетки состоит из элементов, с сечениями в виде круглых труб. Элементы из круглых труб возможно сопрягать под разными углами, хотя узловые соединения трубчатых элементов сложны в изготовлении и не всегда надежны [23-25]. Размеры ячейки верхнего контура решетки программа корректирует, вписывая элементы без геометрических разрывов по сетке изопараметрических линий образующих поверхность.

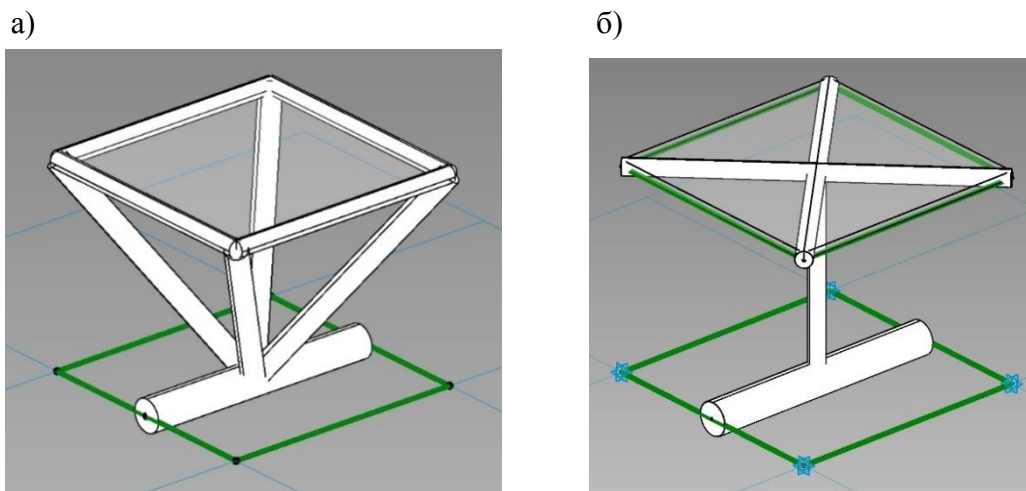


Рисунок 4 - Общий вид решетки двух типов (два «семейства»):

- а) «семейство» № 1, с четырехугольной структурой на верхнем контуре;
- б) «семейство» № 2, с крестовой структурой на верхнем контуре

Создавая представленные виды решетки, одновременно было задано покрытие (по плоскости верхнего контура решетки) в виде стекла. Такой прием позволяет облегчить работу на стадии проработки архитектурных решений и обеспечивает хорошую обзорность мегаструктуры всей конструкции. Отметим, что сложные светопрозрачные покрытия применяемые для криволинейных поверхностей подробно рассмотрены в работе [26].

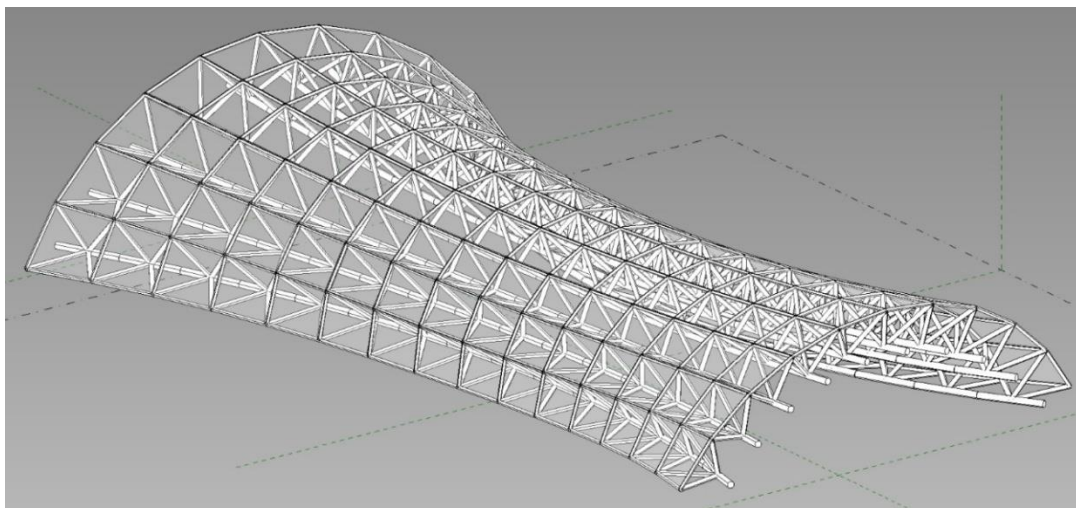
3. Построение мегаструктуры пространственной решетчатой конструкции покрытия

Создание мегаструктуры решетчатой конструкции будем выполнять по всей исходной поверхности.

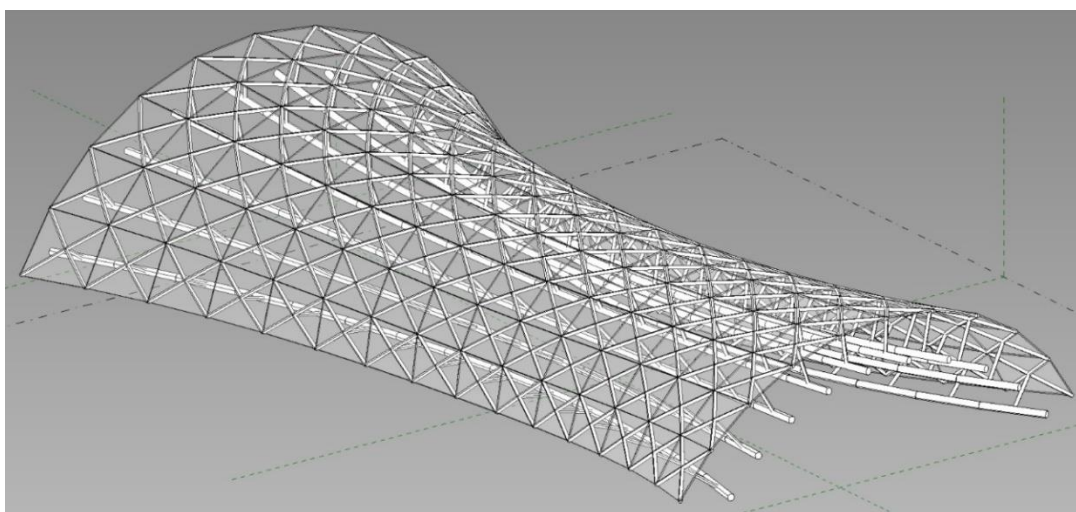
Или, другими словами, конструктивная система будет структурно однородна по всей своей поверхности.

После выделения поверхности исследуемого покрытия назначается тип структуры «семейства» - решетка. При автоматизированном построении верхняя плоскость каждой ячейки структуры «семейства» совмещается без разрывов в геометрии. На рисунке 5 представлены мегаструктуры пространственной решетчатой конструкции, в соответствии с типами решетки («семействами») №1 (см. рисунок 5а) и №2 (см. рисунок 5б).

а)



б)



*Рисунок 5 – Пространственная решетчатая конструкция покрытия
а) с решеткой из «семейства» №1; б) с решеткой из «семейства» №2*

Отметим, что назначенный тип решетки имеет двухстороннюю ассоциативную связь с «семейством», и любые изменения вносимые в «семейство» предоставляют возможность перестроить модель поверхности, с учетом изменений в «семействе». Кроме этого и целую модель возможно перестраивать: удалять отдельные элементы, менять геометрические параметры, добавлять новые элементы.

Для получения надежной конструкции и снижения уровня затрат важно, чтобы усилия в стержневых элементах покрытия были распределены равномерно, без перегруженных участков. Описанная выше последовательность позволяет проектировщику достаточно быстро найти эффективное конструктивное решение для сложной структурно-компоновочной организации формы покрытия.

К числу достоинств разработанной методики относится то, что созданные ранее «семейства» мы можем подгружать в файлы с другими моделями конструкций, и назначать им структуру, соответствующую выбранному «семейству». Таким образом, в системе автоматизированного проектирования создается некоторая библиотека топологии строительных систем. Для примера, назначим структуру решетки «семейства» № 2 модели сферического купола (см. рисунок 6), а также для оболочечной модели эллиптического вида с депланированным опорным контуром (см. рисунок 7), с размещением светопрозрачного покрытия на внутренней поверхности решетки.

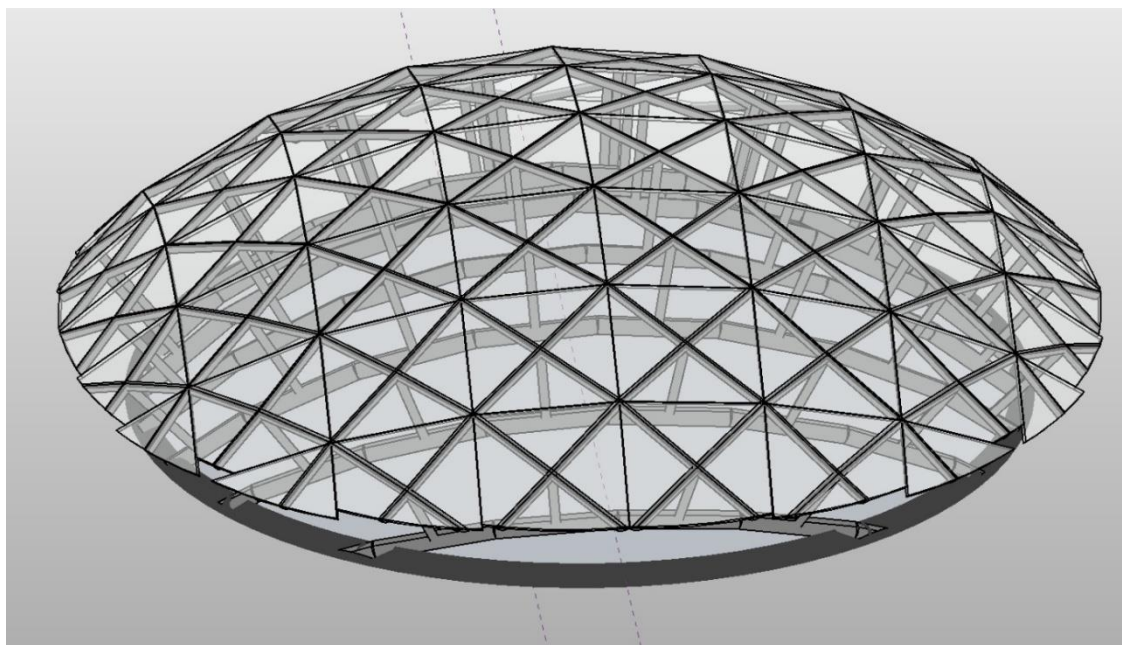


Рисунок 6 - Пространственная решетчатая конструкция покрытия в виде купола, с решеткой из «семейства» № 2

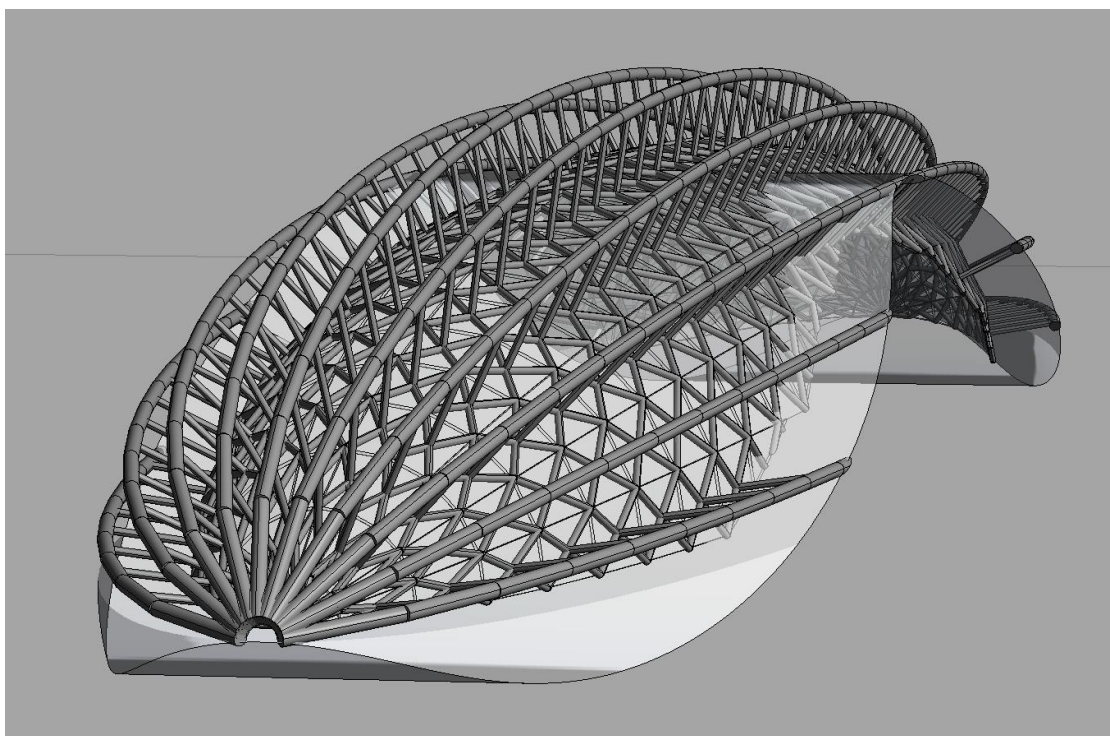


Рисунок 7 - Пространственная решетчатая оболочечная конструкция эллиптического вида, с решеткой из «семейства» № 2

4. Анализ результатов выполненного исследования

В результате выполнения описанной методики создается цифровая параметрическая модель строительной конструктивной системы. Отметим, что хотя действие данной разработки иллюстрировалось для стержневых покрытий сложной формы, она может быть применена для широкого круга различных структурных стержневых систем.

Геометрические параметры конструкции, созданной с применением технологий информационного моделирования, могут быть экспортированы на устройства для изготовления разработанной строительной системы: например, на станки, оборудованные числовым программным управлением (ЧПУ), или устройства, поддерживающие аддитивные технологии (3D принтеры) [27].

Рассмотренная в данной статье автоматизация геометрического построения пространственных решетчатых конструкций предоставляет конкурентное преимущество, которое позволяет решать сложные задачи формообразования не только строительных конструкций [28], но и в прочих важных отраслях: машиностроении, судостроении, авиации и других. Материалы отечественных работ по BIM-технологиям часто носят обзорный характер [29, 30], что требует корректировки, в пользу работ освещающих конкретные приемы моделирования конструкций. Без указанных изменений выполнить обозначенные руководством государства задачи в области применения BIM-технологий в проектировании [31], и перейти на цифровую экономику будет затруднительно.

Выводы

На основании вышеизложенных материалов статьи можно сделать следующие общие выводы:

1. На примере рассмотренных конструкций покрытий сложной геометрической формы, установлено, что проектирование конструктивных систем на одной и той же

структурной основе может иметь высокую точность и производительность, за счет использования современных автоматизированных методик.

2. Установлено, что BIM-технологии предоставляют широкие возможности для оптимизации и вариантного проектирования пространственных решетчатых стальных конструкций покрытий сложной формы.

3. Показано, что с помощью отдельно созданной структуры ячейки - «семейства», возможно построение мегаструктур со сложной структурно-компоновочной организацией формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семикин П.П., Бацунова Т.П. Динамическая архитектура. Кинетические фасады // Изв. вузов. Строительство. 2018. № 6 (714). С. 86-96.
2. Лесневская Р.В., Капустин П.В. Тектоника в архитектуре Захи Хадид до и после дигитальной революции // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 1 (45). С. 125-133.
3. Abramczyk J. Building Structures Roofed with Multi-Segment Corrugated Hyperbolic Paraboloid Steel Shells // Procedia Engineering. 2016. Vol. 161. P. 1545–1550. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.624
4. Hassanein M.F., Elchalakani M., Elkawas A.A. Design of cold-formed CHS braces for steel roof structures // Thin-Walled Structures. Elsevier Ltd, 2017. Vol. 120, № August. P. 249–259. DOI: 10.1016/j.tws.2017.09.002
5. Людковский А.М. Висячие железобетонные монолитные оболочки // Пространственные конструкции в строительстве гражданских и промышленных зданий: Сб. тр. МИСИ. М.: МИСИ, 1992. С. 81-88.
6. Hayashi S., Gondo T. Analysis of the construction of a reinforced-concrete free-form roof formwork and the development of a unit-construction method // Journal of Building Engineering. Elsevier Ltd, 2020. № September. P. 101924. DOI: 10.1016/j.job.2020.101924
7. Кузнецов Д.Н. Малый стальной сферический купол с решеткой из шестигранников // Строительная механика и конструкции. 2020. № 3 (26). С. 53-64.
8. Бирюков В.Э., Беляева С.Ю. Дебаркадер железнодорожного вокзала: основные этапы формообразования // Научный вестник ВГТУ. Серия: Студент и наука. 2016. № 9. С. 38-42.
9. Дыховичный Ю.А., Жуковский Э.З. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): Справочник. М.: Высш. шк., 1991. 543 с.
10. Еремеев П.Г. Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений. М.: Изд-во АСВ, 2009. 336 с.
11. Кривошапко С.Н. Оболочки вращения неканонических форм // Изв. вузов. Строительство. 2018. № 7 (715). С. 66-79.
12. Кривошапко С.Н. Оболочки и стержневые структуры в форме аналитически задаваемых поверхностей в современной архитектуре // Строительство и реконструкция. 2020. № 3 (89). С. 20-30. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-20-30
13. Власов В.З. Принципы построения общей технической теории оболочек и новые конструктивные формы пространственных систем // Второй международный конгресс по тонкостенным покрытиям-оболочкам. Госстройиздат: Москва, 1960. С. 106-130.
14. Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. М.: Гостехиздат, 1956. 419 с.
15. Карпунин В.Г., Голубева Е.А. Компьютерное моделирование строительных конструкций зданий и сооружений // Архитектон: известия вузов. 2019. № 4 (68). С. 1-11.
16. Grunwald G., Hermeking T., Prang T. Kinetic Roof Structure: Msheireb Heart of Doha // Procedia Engineering. The Author(s), 2016. Vol. 155. P. 289–296. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.031
17. Jermoljev D., Bratislava M.R. Štefánik airport terminal hall steel structure // Procedia Engineering. 2012. Vol. 40. P. 165–170. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.074
18. Kociecki M., Adeli H. Shape optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex geometries using evolutionary computing // Engineering Applications of Artificial Intelligence. Elsevier, 2015. Vol. 38. P. 168–182. DOI: 10.1016/j.engappai.2014.10.012

19. Емельянов Д.И. [и др.] Применение BIM-технологий для проектирования криволинейных покрытий на основе пространственных решетчатых конструкций // *Строительная механика и конструкции*. 2019. № 1 (20). С. 71-81.
20. Travush V.I., Belostosky A.M., Akimov P.A. Contemporary digital technologies in construction Part 1: about mathematical (numerical) modelling // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. 2018. P. 1–6. 012029 DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012029
21. Sventikov A.A., Kuznetsov D.N. Numerical study of the effect of the wall thickness of a steel I-beam on the form of loss of local stability // *International science conference Far East Con 2019: Materials Science and Engineering*. Vol. 753. Chapter 2. 2020. P. 1-6. 032035 DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032035
22. Милейковский И.Е., Купар А.К. Гипары. Расчет и проектирование пологих оболочек покрытий в форме гиперболических параболоидов. М.: Стройиздат, 1978. 223 с.
23. Piroglu F. [et al.] Site investigation of damages occurred in a steel space truss roof structure due to ponding // *Engineering Failure Analysis*. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 36. P. 301-313. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.10.018
24. Pieraccini L. [et al.] The role of ductility in the collapse of a long-span steel roof in North Italy // *Engineering Failure Analysis*. Elsevier, 2017. Vol. 82, № March. P. 243-265. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.07.012
25. Chen H., Liu H., Chen Z. Compressive strength of corroded special-shaped welded hollow spherical joints based on numerical simulation // *Thin-Walled Structures*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 149, № May 2019. P. 106531. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106531
26. Еремеев П.Г., Ведяков И.И., Королева Е.А. Светопрозрачные крыши с использованием стекла для большепролетных покрытий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 6. С. 23-28. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.23-28
27. Subrin K. [et al.] Improvement of the mobile robot location dedicated for habitable house construction by 3D printing // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, № 11. P. 716–721. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.403
28. Huang M.Q., Ninić J., Zhang Q.B. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. № October. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103677
29. Пахарева И.В., Синицына О.В. Технология BIM: теория и практика внедрения // *Advanced Science*. 2017. № 3. С. 377-384.
30. Рыбин Е.Н. [и др.] BIM-технологии // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2019. Т. 9. № 1. С. 98-105. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-1-98-105
31. Каган П.Б. Повышение эффективности организационно-технологического проектирования в строительстве за счет его модернизации с использованием современных цифровых технологий // *Интернет-журнал «Отходы и ресурсы»*. 2020. № 1. DOI: 10.15862/09INOR120

REFERENCES

1. Semikin P.P., Batsunova T.P. Dinamicheskaya arxitektura. Kineticheskie fasady` [Dynamic architecture. Kinetic facades] *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2018. Vol. 714. No. 6. Pp. 86-96. (rus)
2. Lesnevskaya R.V., Kapustin P.V. Tektonika v arxitekture Zaxi Xadid do i posle digital'noj revolyucii [Tectonics in architecture of Zaha Hadid before and after the digital revolution] *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2017. Vol. 45. No. 1. Pp. 125-133. (rus)
3. Abramczyk J. Building Structures Roofed with Multi-Segment Corrugated Hyperbolic Paraboloid Steel Shells. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 161. P. 1545–1550. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.624
4. Hassanein M.F., Elchalakani M., Elkawas A.A. Design of cold-formed CHS braces for steel roof structures. *Thin-Walled Structures*. Elsevier Ltd, 2017. Vol. 120, № August. P. 249–259. DOI: 10.1016/j.tws.2017.09.002
5. Lyudkovsky A.M. Visyachie zhelezobetonny`e monolitny`e obolochki [Hanging reinforced concrete monolithic shells] *Prostranstvenny`e konstrukcii v stroitel'stve grazhdanskix i promy'shlenny`x zdaniy* [Spatial structures in the construction of civil and industrial buildings]: *Sb. tr. MISI*. M.: MISI, 1992. Pp. 81-88. (rus)
6. Hayashi S., Gondo T. Analysis of the construction of a reinforced-concrete free-form roof formwork and the development of a unit-construction method. *Journal of Building Engineering*. Elsevier Ltd, 2020. No. September. P. 101924. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101924
7. Kuznetsov D.N. Maly`j stal'noj sfericheskiy kupol s reshetkoj iz shestigrannikov [Small steel spherical dome with hexagon grid]. *Stroitel'naya mexanika i konstrukcii*. 2020. Vol. 26. No. 3. Pp. 53-64. (rus)

8. Biryukov V.E., Belyaeva S.Yu. Debarkader zheleznodorozhnogo vokzala: osnovny'e e'tapy formoobrazovaniya [Landing stage railway station: key stages of forming] *Nauchny'j vestnik VGTU. Seriya: Student i nauka*. 2016. No. 9. Pp. 38-42.
9. Dykhovichny Yu.A., Zhukovsky E.Z. Sovremennyye prostranstvenny'e konstrukcii (zhelezobeton, metall, derevo, plastmassy): Spravochnik. [Modern spatial structures (reinforced concrete, metal, wood, plastics): Manual] Moscow, High school, 1991. 543 p. (rus)
10. Yeremeyev P.G. Sovremennyye stal'nye konstruksii bol'sheproletnykh pokrytiy unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy [Modern large-span steel structures for one of a kind building]. Moscow, ACB, 2009. 336 p. (rus)
11. Krivoshapko S.N. Obolochki vrashheniya nekanonicheskix form [Shells of revolution of non-trivial forms] *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2018. Vol. 715. No. 7. Pp. 66-79. (rus)
12. Krivoshapko S.N. Obolochki i sterzhnevyye struktury v forme analiticheski nezadavaemykh poverkhnostey v sovremennoy arkhitekture [Shells and structures in the form of analytically non-given surfaces in modern architecture]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. Vol. 89. No. 3. Pp. 20-30. (rus). DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-20-30
13. Vlasov V.Z. Principy postroeniya obshhej texnicheskoj teorii obolochek i novyye konstruktivny'e formy prostranstvennyx sistem [Principles of construction of general technical theory of shells and new structural forms of spatial systems]. Second international congress on thin-walled shell coatings. Gosstroizdat: Moskow. 1960. Pp. 106-130.
14. Volmir A.S. Gibkie plastinki i obolochki [Flexible plates and sheaths]. Moscow, Gostekhizdat publ., 1956. 419 p. (rus)
15. Karpunin V.G., Golubeva E.A. Komp'yuternoe modelirovanie stroitel'nyx konstrukcij zdaniy i sooruzhenij [Computer modeling of bulding structures]. *Arhitekton: izvestiya vuzov*. 2019. Vol. 68. No. 4. Pp. 1-11. (rus)
16. Grunwald G., Hermeking T., Prang T. Kinetic Roof Structure: Msheireb Heart of Doha. *Procedia Engineering*. The Author(s), 2016. Vol. 155. P. 289-296. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.031
17. Jermoljev D. Bratislava M.R. Štefánik airport terminal hall steel structure. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 40. P. 165-170. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.074
18. Kociecki M., Adeli H. Shape optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex geometries using evolutionary computing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Elsevier, 2015. Vol. 38. P. 168-182. DOI: 10.1016/j.engappai.2014.10.012
19. Emelynov D.I. [et al.] Primenenie BIM-tekhnologij dlya proektirovaniya krivolinejnykh pokrytij na osnove prostranstvennykh reshchatykh konstrukcij [Application of building information modeling technologies for curvilinear roofs based on grid structure] *Stroitel'naya mexanika i konstrukcii*. 2019. Vol. 20. No 1. Pp. 71-81. (rus)
20. Travush V.I., Belostosky A.M., Akimov P.A. Contemporary digital technologies in construction Part 1: about mathematical (numerical) modelling // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. 2018. P. 1-6. 012029 DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012029
21. Sventikov A.A., Kuznetsov D.N. Numerical study of the effect of the wall thickness of a steel I-beam on the form of loss of local stability // *International science conference Far East Con 2019: Materials Science and Engineering*. Vol. 753. Chapter 2. 2020. P. 1-6. 032035 DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032035
22. Milejkovsky I.E., Kupar A.K. Gipary. Raschet i proektirovanie pologix obolochek pokrytij v forme giperbolicheskix paraboloidov [Hiparas. Calculation and design of shallow shells of coatings in the form of hyperbolic paraboloids]. Moscow, Sroizdat, 1978. p. 223. (rus)
23. Piroglu F. [et al.] Site investigation of damages occurred in a steel space truss roof structure due to ponding. *Engineering Failure Analysis*. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 36. P. 301-313. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.10.018
24. Pieraccini L. [et al.] The role of ductility in the collapse of a long-span steel roof in North Italy. *Engineering Failure Analysis*. Elsevier, 2017. Vol. 82, № March. P. 243-265. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.07.012
25. Chen H., Liu H., Chen Z. Compressive strength of corroded special-shaped welded hollow spherical joints based on numerical simulation. *Thin-Walled Structures*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 149, No. May 2019. P. 106531. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106531
26. Yeremeyev P.G. Vedyakov I.I., Koroleva E.A. Svetoprozrachny'e kry'shi s ispol'zovaniem stekla dlya bol'sheproletnyx pokrytij [Translucent glass roofs for large-span coverings] *Endustrial and Civil Engineering*. 2019. No. 6. Pp. 23-28. (rus). DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.23-28
27. Subrin K. [et al.] Improvement of the mobile robot location dedicated for habitable house construction by 3D printing. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, No. 11. P. 716-721. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.403

28. Huang M.Q., Ninić J., Zhang Q.B. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. No. October. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103677
29. Pakhareva I.V., Sinitsyna O.V. Tekhnologiya BIM: teoriya i praktika vnedreniya [Technology BIM: theory and practice of introduction] *Advanced Science*. 2017. No. 3. Pp. 377-384. (rus)
30. Rybin E.N. [et al.] BIM-tehnologii [BIM technology]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost*. 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 98-105. (rus). DOI: 10.21285/2227-2917-2019-1-98-105
31. Kagan P.B. Povyshenie effektivnosti organizatsionno-tekhnologicheskogo proektirovaniya v stroitel'stve za schet ego modernizatsii s ispol'zovaniem sovremennykh tsifrovyykh tekhnologiy [Improving the effectiveness of organizational and technological design in construction due to its modernization using modern digital technologies]. *Internet-zhurnal «Othody i resursy»*. 2020. No. 1. (rus). DOI: 10.15862/09INOR120

Информация об авторах:

Свентиков Андрей Александрович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры металлических и деревянных конструкций.
E-mail: svarka@vgasu.vrn.ru

Кузнецов Дмитрий Николаевич

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия,
старший преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций.
E-mail: kuznecov82@bk.ru

Information about authors:

Sventikov Andrey A.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,
doctor of technical sciences, professor of the department of metal and wooden constructions of VGTU.
E-mail: svarka@vgasu.vrn.ru

Kuznetsov Dmitry N.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,
senior lecturer of department of metal and wooden construction of VGTU.
E-mail: kuznecov82@bk.ru