



Research Article

Received: July 12, 2022

Accepted: July 14, 2022

Published: July 19, 2022

ISSN 2658-5553

Mesh building of a toroidal shape with various grid schemes

Ashikhmin, Stanislav E. ^{1*} ¹Vyatka State University, Kirov, Russian Federation; ashihminstanislav@gmail.comCorrespondence: * email ashihminstanislav@gmail.com

Keywords:

Structure; Mesh dome; Metal constructions; Wooden structure; Grid; Spatial system

Abstract:

The object of research is a spatial system of a regular toroidal structure with different cell shapes. The purpose of this work is to analyze mesh domes with different design schemes. The considered load, evenly distributed on all elements of the spatial structure. **Method.** Finite element method in the LIRA-SAPR software package used to determine the qualitative and quantitative indicators of the bearing capacity of the spatial coverage. **Results.** The analysis of technical and economic indicators for various options for the shape of a building cell and various materials was carried out, as a result of which it was established that the structure using trapezoidal cells is the most optimal; the smallest material consumption is the design using trapezoidal cells; when comparing the material consumption, the most economical option was made of wood, the weight of the wood structure is 81% of the weight of the metal structure.

1 Introduction / Введение

Системы регулярной структуры бывают разной формы, в данном случае принята торообразная форма, что является частным случаем купола. В статьях [1]-[5], [22] рассмотрены купольные металлические конструкции, показаны геометрические схемы куполов. В [1, 3, 4] приводятся примеры конструкций куполов, с различными формами ячеек. В [6] рассматриваются первые варианты куполов. В [7], [8] анализируется снеговая нагрузка и 2 варианта ветровой нагрузки, а также приводятся несколько расчётов. В статьях [9]-[10] проведены исследования сжато-изгибаемых элементов несущих стержневых элементов сетчатых куполов. В [11] представлен алгоритм расчета купола на местную устойчивость, данный алгоритм позволит более точно определить величину критической нагрузки. Работы [12], [16] рассказывают о достоинствах и недостатках системы регулярной структуры. В [13] разработана эволюционно-имитационная схема структурно-параметрической оптимизации сетчатых куполов, что позволяет значительно сократить время решения задач большой размерности, что приводит к возможности получения новых рациональных проектных решений. В [14] рассматривается ребристо-кольцевой купол с сборно-разборными узлами, выполнены численные и физические эксперименты по исследованию напряженно-деформированного состояния (НДС) пролетного узла. В статье [15] рассматривается совместная работа несущих и ограждающих конструкций, что привело к сокращению сечений на 20%. В [18] проводится анализ влияния несовершенств узловых соединений структурных конструкций покрытия на усилия в стержнях и влияния начальных несовершенств конструкций на несущую способность. В статьях [19, 20] рассматриваются технологии монтажа купольных конструкций. В [21] рассматриваются различные системы регулярной структуры, в том числе и системы куполообразной формы. В статье [23] анализируются аналитические зависимости для назначения основных параметров (относительная высота покрытия h/l , относительный выгиб покрытия f/l) и рассмотрены основные закономерности изменения параметров НДС проектируемого покрытия в зависимости от изменения параметров проектирования. В ходе работы [24] были проведены расчёты конечно-

Ashikhmin, S.

Mesh building of a toroidal shape with various grid schemes; 2022; *AlfaBuild*; 23 Article No 2303. doi: 10.57728/ALF.23.3

элементной модели покрытия, варьировалось значение его высоты и созданы 7 различных компьютерных моделей конструкции. В статье [25] предложен алгоритм оптимизации структурного покрытия.

Целью данной работы является анализ сетчатых куполов с различной конструктивной схемой и решение задачи выбора оптимальной конструктивной схемы решетки.

2 Materials and Methods / Материалы и методы

2.1 Spatial building design

В данной рассматривается здание, которое относится к типу систем с регулярной структурой (СРС), образуемые повторяющимися однотипными ячейками из стержневых элементов. Опоры располагают по контуру здания. Данная система регулярной структуры относится к типу пространственных (оболочки), сетчатые, однослойные. Настил (монолитный поликарбонат) опирают непосредственно на элементы верхнего пояса. Покрытия с применением СРС отличается повышенной надежностью от внезапных разрушений, максимальная унификация элементов и узлов, небольшие транспортные расходы, простота сборки и монтажа. Область применения СРС весьма обширна, начиная от общественных зданий и заканчивая транспортной инфраструктурой. В данном проекте здание предназначено для общественных целей, таких как, например, ботанический сад. В покрытии сооружения сделана воронка, для ската дождевой воды, и создания эффекта водопада в ботаническом саду. Для того, чтобы приступить к построению конструктивной модели в программном комплексе «ЛИРА-САПР», необходимо построить кривую, по которой затем определяются координаты узлов.

Для построения кривой используется программный комплекс «AutoCAD». За основу принимаются два сектора окружности. Первый сектор выделяется из окружности радиусом 15 м, длина сектора 18 м., второй сектор имеет следующие размеры: радиус – 22 м., длина – 42 м. В итоге получена следующая фигура (Рис. 1). Далее поворотом на 30° получена её проекция (Рис. 2). В дальнейшем разделяем кривые на два варианта: в первом будет построена кривая для структуры из трапециевидных ячеек, а во втором – из треугольных.

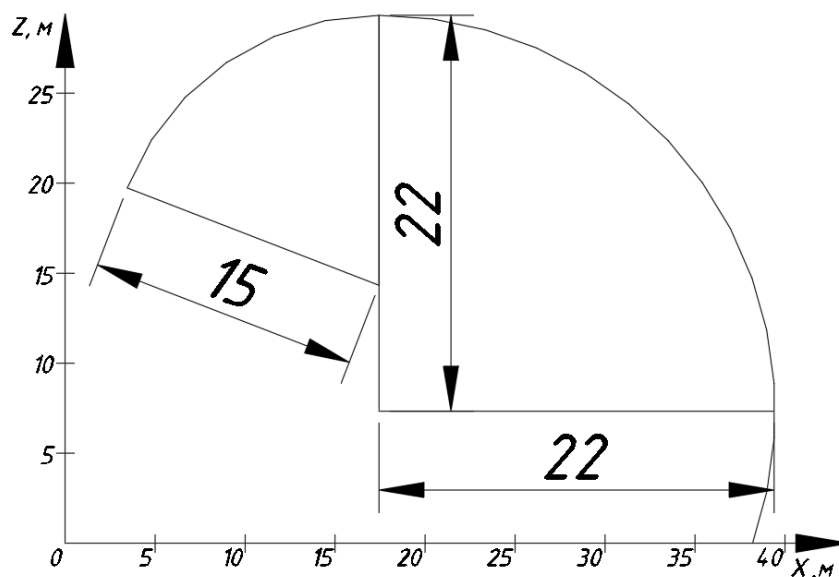


Рис. 1 – Исходная кривая
Fig. 1 – Initial curve

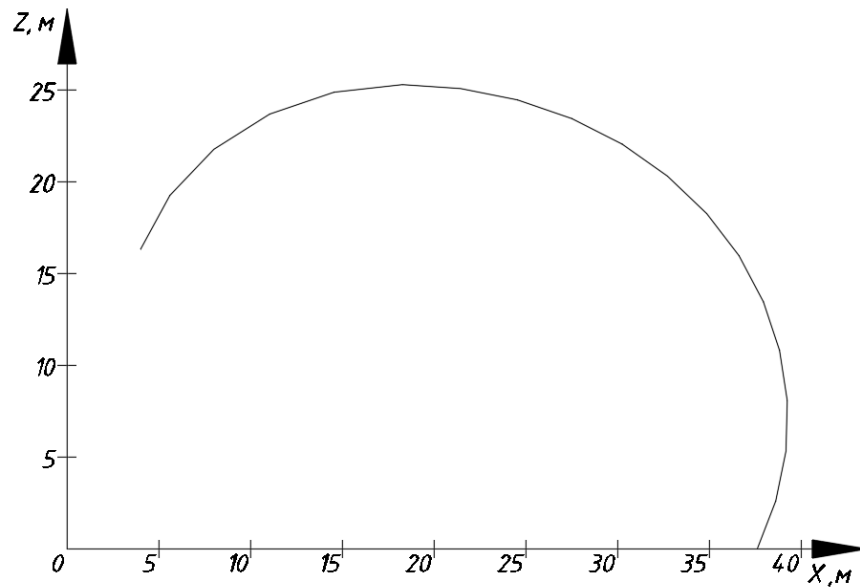


Рис. 2 – Проекция исходной кривой
Fig. 2 – Projection of the original curve

Чтобы определить точное положение узлов, кривая делится на равные отрезки длиной 3 м (Рис. 3). У полученной кривой замеряем координаты узлов X и Z (Рис. 4).

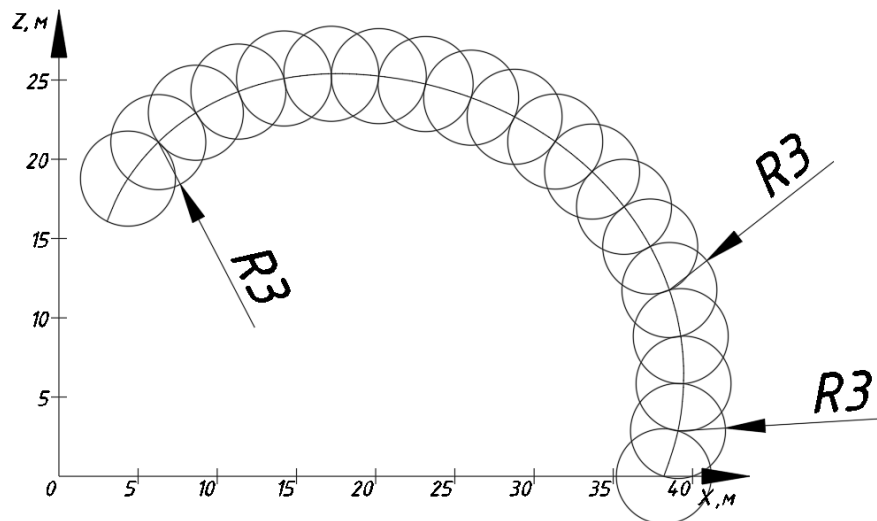


Рис. 3 – Деление кривой на участки по 3 м
Fig. 3 – Division of the curve into sections of 3 m

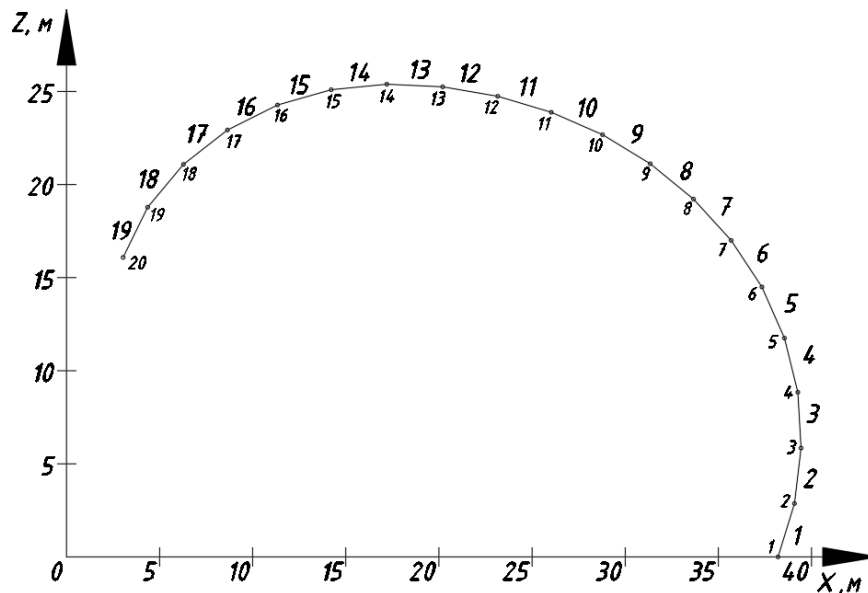


Рис. 4 – Образующая торообразного здания с трапецевидной ячейкой
Fig. 4 – Generator of a toroidal building with a trapezoid cell

В структуре из треугольных ячеек построение аналогично варианту из трапецевидной сетки. Кривая делится на равные отрезки длиной 2,6 м (Рис. 5).

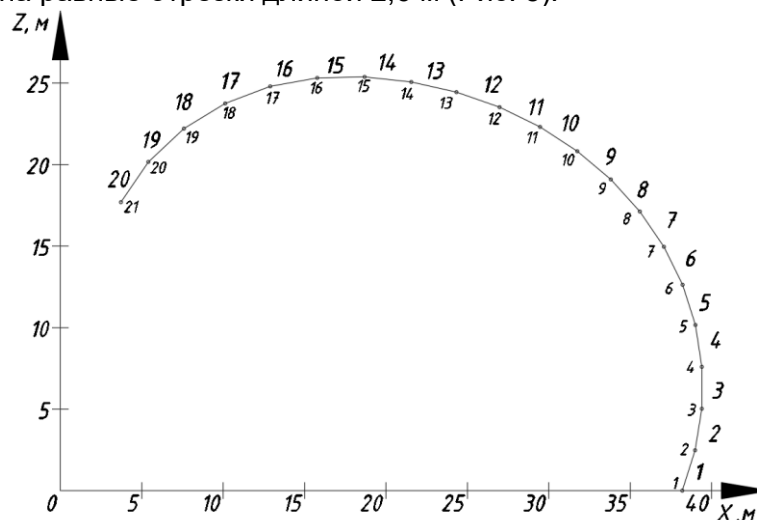


Рис. 5 – Образующая торообразного здания с треугольной ячейкой
Fig. 5 – Generator of a torus-shaped building with a triangular cell

Полученные координаты узлов используются в программном комплексе «ЛИРА-САПР» для построения конечных элементов. Полученную кривую размножаем 1 раз на угол $4,5^\circ$ ($360/80=4,5^\circ$). Затем полученные кривые соединяются горизонтальными стержнями. Далее полученная система размножается поворотом относительно центра на $4,5^\circ$ ещё 79 раз. Далее задаются начальные размеры сечения для стержней в виде металлического профиля «Молодечно» 400 x 200 x 12 мм. Конечно-элементная модель здания показана на Рис 6.

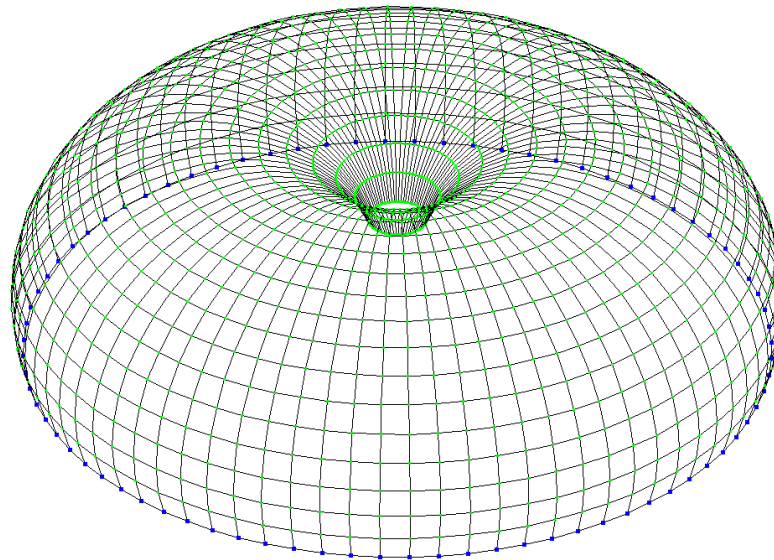


Рис. 6 – Конструктивная схема здания с трапециевидной формой ячейки
Fig. 6 – Structural diagram of a building with a trapezoidal cell shape

Аналогично формируем здание с треугольной решеткой здание (см. Рис. 7).

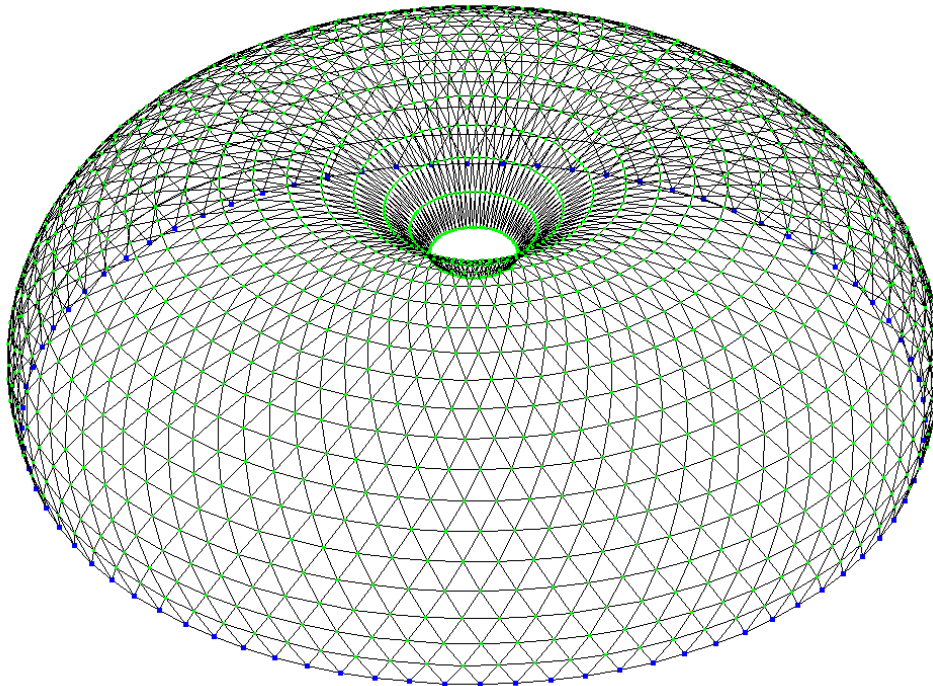


Рис. 7 – Конструктивная схема здания с треугольной формой ячейки
Fig. 7 – Structural diagram of a building with a triangular cell shape

2.2 Статический расчёт

Выполнен сбор всех нагрузок: снеговая (в 2 вариантах), ветровая, собственный вес покрытия (монокристаллический поликарбонат). По результатам расчета стержни разделяются на 4 группы, получаем следующие таблицы.

Таблица 1. Результаты статического расчёта для конструктивной схемы здания с трапециевидной формой ячейки из металла

Table 1. The results of the static calculation for the structural scheme of the building with a trapezoidal metal cell

№ сечения	№ стержня	Расчетная		
		Nmax	M	Q



		N	Mmax	Q
1	2597	253,196	300,288	0,0860872
	1629	16,8903	1019,01	0,190185
2	2833	116,203	3,55059	0,411683
	1787	20,4648	169,984	3,82822
3	691	37,1944	46,7488	0,452173
	1448	5,63905	67,7133	3,12426
4	1007	41,9566	1476,88	0,542588
	742	0,86997	2110,56	5,44875

Таблица 2. Результаты статического расчёта для конструктивной схемы здания с треугольной формой ячейки из металла
Table 2. Results of a static calculation for a structural scheme of a building with a triangular metal cell

№ сечения	№ стержня	Расчетная		
		Nmax	M	Q
		N	Mmax	Q
1	3678	314,402	313,842	0,64079
	3676	121,285	770,249	0,06235
2	4251	132,502	7,77224	0,03384
	2808	3,47365	307,378	0,07305
3	2332	30,3276	213,838	1,0763
	2335	29,6321	621,472	1,65475
4	2883	35,2942	1106,84	0,59683
	3916	2,36831	1914,25	2,25063

Таблица 3. Результаты статического расчёта для конструктивной схемы здания с треугольной формой ячейки из древесины
Table 3. Results of a static calculation for a structural scheme of a building with a triangular shape of a cell made of wood

№ сечения	№ стержня	Расчетная		
		Nmax	M	Q
		N	Mmax	Q
1	3678	266,24	191,868	0,61703
	3676	73,3417	655,094	0,619476
2	2480	111,511	13,5099	0,72285
	2808	2,31664	267,44	0,04502

3	2332	27,1507	549,17	0,99799
	2335	26,5125	550,967	1,47688
4	2883	31,1306	941,098	0,49853
	3720	1,46853	1620,69	1,88435

3 Results and Discussion / Результаты и обсуждение

На основании конструктивного расчёта получены следующие размеры сечения для каждой конструктивной схемы.

Таблица 4. Сечения для конструктивной схемы здания с трапецевидной формой ячейки из металлической профильной трубы

Table 4. Cross-sections for the structural scheme of a building with a trapezoidal shape of a cell made of a metal profile pipe

№ сечения	Bf (мм)	H (мм)	Tw (мм)
1	200	400	9,5
2	120	240	10
3	120	240	9
4	200	400	9

Таблица 5. Сечения для конструктивной схемы здания с треугольной формой ячейки из металлической профильной трубы

Table 5. Cross-sections for the structural scheme of a building with a triangular shape of a cell made of a metal profile pipe

№ сечения	Bf (мм)	H (мм)	Tw (мм)
1	200	400	13
2	120	240	7,5
3	120	240	12
4	150	350	9,5

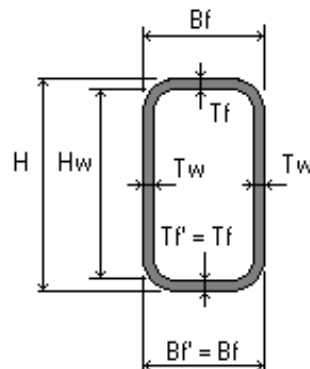


Рис. 8 – Сечение профильной металлической трубы
Fig. 8 – Cross section of a profiled metal pipe

Таблица 6. Сечения для конструктивной схемы здания с треугольной формой ячейки из клеёной древесины

Table 6. Cross-sections for the structural diagram of a building with a triangular shape of a cell made of glued wood

№ сечения	B (мм)	H (мм)
1	300	588
2	200	378
3	200	378
4	250	588

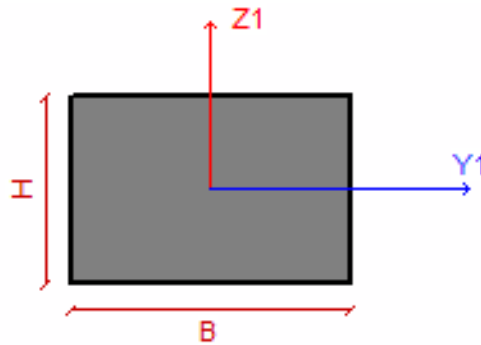


Рис. 9 – Сечение клеёной древесины
Fig. 9 – Cross-section of glued wood

Для сравнения различных схем решетки составлена таблица с технико-экономическими показателями.

Таблица 7. Технико-экономические показатели зданий
Table 7. Technical and economic indicators of buildings

	Трапециевидная решётка, металл	Треугольная решётка, металл	Треугольная решётка, дерево
Длина всех стержней	М 7674,4	М 13010,4	М 13010,4
Длина стержней по сечениям:	М	М	М
1	493,6	672,8	672,8
2	1910,4	2766,4	2766,4
3	2400	5750,4	5750,4
4	2160	3820,8	3820,8
Сечения элементов	мм	мм	мм
1	200*400*9,5	200*400*13	300*588
2	120*240*10	120*240*7,5	200*378
3	120*240*9	120*240*12	200*378
4	200*400*9	150*350*9,5	250*588
Вес 1п.м.	кг	кг	кг
1	84,22	111,46	88,2
2	50,68	39,11	37,8
3	46,14	63,61	37,8
4	80,05	69,31	73,5
Вес конструкции	кг	кг	кг
1	41571	74990	59341
2	96819	108193	104017
3	110736	365783	217365
4	172908	264820	280829
Общий	422034	813786	661552
Площадь сечения	см ²	см ²	м ²
1	107,29	141,99	0,1764
2	64,57	49,82	0,0756
3	58,78	81,04	0,0756
4	101,98	88,29	0,1470
Стоимость 1ед.	85тыс.р.	85тыс.р.	35тыс.р.
Стоимость здания	35,87млн.р.	69,17млн.р.	61,45млн.р.
Стоимость 1м2	7823р	15086р	13402р

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:



- структура из трапециевидных ячеек, выгоднее, чем из треугольных; вес конструкции различается почти в 1,928 раза, соответственно и стоимость тоже в 1,928 раза выше у структуры с треугольными ячейками, это обусловлено тем, что во втором случае длина всех стержней почти в два раза выше;
- важно отметить, что в трапециевидной системе нет раскосов, поэтому их необходимо выполнить из металлического троса, что добавит веса и увеличит стоимость конструкции;
- конструкцией с самой низкой материалоемкостью оказалась конструкция из трапециевидных ячеек (422 т), следовательно, для такой конструкции требуется фундамент с меньшей несущей способностью, что уменьшает стоимость строительства такого здания;
- при сравнении материалов конструкции, более экономичным оказался вариант из дерева: вес конструкции из дерева составляет всего лишь 81 % от конструкции из металла, поэтому потребуются меньше вложений в фундамент; итоговая стоимость здания отличается незначительно: 69,17 млн.р. в металлическом каркасе, против 61,45 млн.р. в деревянном;
- сечения в вариантах здания из металла получились схожи, но в трапециевидной решетке сечение меньше на 8,6 %;
- наиболее выгодным будет вариант здания из трапециевидных ячеек, выполненный из дерева.

4 Conclusions / Заключение

В данной работе рассмотрены различные варианты конструктивных схем торообразного здания с применением нескольких вариантов форм ячеек сетки и определены наиболее выгодные сечения.

Проведен анализ сетчатых куполов с различной конструктивной схемой сетки при использовании металлических профилей и деревянных клееных элементов.

Разработаны варианты здания с различными конструктивными схемами сетки несущих элементов и проведены расчеты в программном комплексе «ЛИРА-САПР».

Выполнен сбор снеговых и ветровых нагрузок применительно к пространственному зданию достаточно сложной конфигурации.

Выполнены конструктивные расчёты, всех разработанных вариантов и определены поперечные сечения элементов сетки здания.

Проведен анализ технико-экономических показателей для различных вариантов формы ячейки здания и различного материала, в результате которого установлено:

- структура с использованием трапециевидных ячеек наиболее оптимальна;
- при сравнении материалоемкости, наиболее экономичным получился вариант из древесины, вес конструкции из древесины составляет 81 % от веса конструкции из металла;

Вывод: наиболее выгодным с точки зрения материалоемкости и стоимости является вариант здания с использованием трапециевидных ячеек, выполненных из древесины.

References

1. Gorbunva V.Ser., Ageeva E.Yu. Large-span metal dome coverings and their construction. Collection of articles of competition laureates. 2021. 6(21). Pp 65-68. ISBN 978-5-528-00463-1.
2. O.L. Marina, O.V. Korogodina, I.Yu. Zakhariyev, National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russian Federation. Investigation of material rheological characteristics influence on the dome shape during free bulging process. Information technologies. Problems and solutions: materials of the international scientific and practical conference. 2018. 1(5). Pp 373-381.
3. I.Yu. Sarukhanyan, A.A. Ryumina, L.I. Khokhlova. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "State University for Land Management", Moscow city. Dome structures. Natural resource potential of the caspian and adjacent territories: problems of rational use. 2019. Pp 78-81. UDC: 504.171(1-925.22):005.745.
4. Ivanova K.A. Gonik E.G. Bearing structures of metal dome roofs. Bulletin of science. 2022. 5(50). Pp 308-313.



5. O. V. Mareeva, A. A. Gaysin. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State University of Environmental Engineering". Analysis of the form formation of structural coatings. Environmental management. 2013. 3. Pp 57-59.
6. Semerikova M.L., Veselova E.A. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. History of the origin of dome structures. Interuniversity collection of articles competition winners. 2010. 1(12). Pp 93-95. ISBN: 978-5-87941-735-7. UDC: 378:001.891.
7. A.P. Konstantinov, I.V. Boriskina, A.A. Plotnikov. Snow cover on the domed glass surfaces of heated buildings (based on moskow). Vestnik MGSU. 2011. 1(1). Pp 120-126.
8. I.S. Sitnikova, A.A. Semenov. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Stress-strain state of the dome taking into account two options of wind load. Bulletin of civil engineers. 2017. 6(65). Pp 79-89.
9. B.V. Miryaev, S.A. Tolushov. Penza State University of Architecture and Construction, Russia. Experimental and theoretical researchs of compressed flexural wooden elements of the dome at the extreme state. University news. Construction. 2014. 1(1). Pp 108-116. ISBN: 0536-1052.
10. A.S. Shekhovtsov. Study of stress-strain state of compressed-curved bearing rod elements of wooden mesh domes and improvement of their nodal connections. Saint Petersburg. 2008. Pp 22.
11. A.A. Kuznetsov. Local stability of wooden mesh domes. Penza. 2006. Pp 22.
12. E.E. Janina, V.A. Repin. Modern spatial constructions of public building coverings. Days of science of students of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolay Grigoryevich Stoletov. 2020. Pp 765-771. ISBN: 978-5-9984-1237-0. UDC: 74.48.
13. Alekseytsev A.V., Serpik I.N. Optimization of steel dome using genetic iteration procedures and simulation. Construction and reconstruction. 2010. 4(30). Pp 3-7. ISSN: 2073-7416
14. O.Y. DERIGLAZOV. Development, design and research wooden ribbed-ring dome with rigidity blocks and assembly-combinable assembly. Tomsk. 2007. Pp 21.
15. K.P. Pyatikrestovsky, B.S. Sokolov. Economic expediency taking into account the joint work of load-bearing and enclosing elements in large-span wooden spatial structures. Structural mechanics of engineering constructions and buildings. 2021. Pp 664-678. ISSN: 1815-5235 (Print), 2587-8700 (Online). DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-6-664-678. UDC: 624.04.012.
16. A.M. Ibragimov, N. V. Popova. Folding mesh dome: statement of the problem and surface construction. Industrial and civil construction. 2018. 5. Pp 18-21.
17. Kameneva K.V., Stepanenko A.N. Influence of imperfections of nodal connections of structural coating structures for forces in rods. New ideas of the new age: materials of the international scientific conference fad togu. 2011. 2. Pp 56-59.
18. A. Y. Attalmanan Abusamra. Influence of initial design imperfections double-strain mesh domes on their carrier ability. Rostov-on-Don. 2006. Pp 23.
19. E. A. Kantaryuk, Yu. A. Bordugova Lipetsk State Technical University. Technology of the device of dome structures. Science and education in the field of technical aesthetics, design and technology of art processing of materials. 2021. Pp 100-104. ISBN: 978-5-7937-1998-8. UDC: 745/749(063).
20. A. M. Yugov, I. V. KILIMENKO SEI HPE "Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture". Choice of rational installation technology metal dome. Bulletin of the Donbas National Academy of Construction and Architecture. 2018. 6(134). Pp 24-29.
21. S.N. Krivoshapko. Rod, lattice structures and all-metal shells of buildings From the 2nd half of the XXth century until the beginning of the XXI century. Architecture and construction of Russia. 2014 1(12). Pp 10-17. ISSN: 0235-7259.
22. P.S. Averyanova, I.O. Demkin, N.E. Fulmes. Ryazan Institute (branch) of the University of Mechanical Engineering. Domes as a method of covering large span buildings and facilities. New technologies in the educational process and production. 2015. Pp 28-31. ISBN: 978-5-00050-017-0.
23. A.V. Mushchanov, V.F. Muschanov, I.V. Romensky. Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, 86123, Ukraine, Donetsk region, Makeevka, Derzhavina st., 2. Rational Geometric and Rigidity Parameters of Long-Span Structural Coating. Construction of unique buildings and facilities. 2016. 2(41). Pp 18-29. eISSN: 2304-6295.
24. S.A. Nefyodov, M.S. Ilyushenko, A.R. Kuzminykh. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 195251, Russia, St.Petersburg, Politekhnikeskaya st., 29. The work of the spatial



- rod system depending on its geometry. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017. 5(56). Pp 33-46. ISSN 2304-6295.
25. Muschanov V.F., Orzhekhovskiy A.N., Muschanov A.V. Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture. Optimal design of structural coatings on non-standard plans. *Science-intensive technologies and innovations*. 2019. 1(2). Pp 75-79. ISBN: 978-5-361-00698-4.