

БОРИС ВАСИЛЬЕВИЧ МИРЯЕВ

кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Инженерно-строительного института, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (Пенза, Российская Федерация)
office@pguas.ru

АННА БОРИСОВНА МИРЯЕВА

студентка VI курса факультета заочного и открытого образования, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (Пенза, Российская Федерация)
office@pguas.ru

ОПТИМИЗИРОВАННАЯ СТРОИТЕЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ СЕТЧАТОГО ДЕРЕВЯННОГО КУПОЛА

Излагается методика решения задачи условной оптимизации сетчатых деревянных куполов по критерию стоимости. Получены оптимальные параметры купола с ребрами из древесины. Рассмотрено применение оптимизированной конструкции в качестве купольного покрытия кафе.

Ключевые слова: сетчатый деревянный купол, оптимизация

Сетчатые купола относятся к пространственным конструкциям покрытий, применение которых в ряде случаев обеспечивает как архитектурную выразительность, так и рациональное использование строительных материалов [5], [9]. Некоторые вопросы прочности, жесткости и устойчивости таких конструкций исследованы в работах [6], [7]. В данной статье рассматривается методика оптимизации данных конструкций с металлическими узловыми деталями по критерию стоимости. При этом геометрическая схема сетчатых деревянных куполов строится на основе правильных многогранников или правильной сети Чебышева по аналогии с металлическими куполами [2; 275–279]. Несущими элементами покрытия являются прямолинейные стержни (ребра). Ребра соединены в узлах на сферической поверхности и образуют сеть, ячейки которой близки к равносторонним треугольникам (рис. 1).

Несущие ребра при сравнительно небольшой их длине изготавливаются из цельной древесины (рис. 2), в остальных случаях применяется клееная древесина [5]. Деревянные ребра соединяются в узлах, как правило, с помощью стальных узловых деталей.

Задача оптимизации по критерию стоимости рассматриваемых сетчатых куполов относится к классу задач условной оптимизации. В данном случае поиск глобального экстремума был выполнен методом сканирования [5], [6]. Исследование проводилось для куполов из цельной древесины при диаметре 20–30 м и для куполов из клееной древесины при диаметре 35–50 м с помощью специальной программы «Optcupol» [5]. Во всех случаях отношение высоты к диаметру купола H/D принималось равным 0,25. Величина снеговой нагрузки соответствовала III снеговому району. Геометрическая схема купольных покрытий формировалась на основе правильной сети Чебышева при количестве ярусов от 4 до 7. В качестве целевой функции была принята стоимость купола $C_{куп} = C_d + C_{уз} + C_m$, где C_d , $C_{уз}$ и C_m – стоимость деревянных элементов, стальных узловых деталей и монтажа купола соответственно. В качестве ограничений приняты условия прочности деревянных элементов и стальных узловых деталей, условия жесткости деревянных элементов и условие местной устойчивости купола [5]. Параметры, характеризующие геометрическую поверхность купола, являются взаимосвязанными величинами. Количество и длина несущих



Рис. 1. Купольное покрытие кафе диаметром 20 м



Рис. 2. Узел соединения ребер купола

элементов будут зависеть от выбранной геометрической схемы купола. Размеры узловой детали определяются размерами несущих ребер. Исходя из этих соображений, в качестве варьируемых параметров были приняты следующие величины: $l_{\text{ср}}/R$ – средняя относительная длина несущих ребер; h – высота сечения несущих ребер; b – ширина сечения несущих ребер.

В ходе исследования количество ярусов варьировалось от 4 до 7, при этом средняя относительная длина ребер менялась от 0,24 до 0,14. Параметры b и h изменялись дискретно, так как регламентируются сортаментом пиломатериалов. Ширина ребер из цельной древесины варьируется от 4 до 15 см, высота – от 5 до 25 см. Для клееных ребер ширина была принята равной ширине доски минус 1 см (припуск на фрезерование) и варьировалась от 6,5 до 24 см. При этом градация изменения высоты сечения принята равной 33 мм, что соответствует толщине фрезерованной доски [5].

В расчетах были приняты следующие значения стоимости материалов конструкций с учетом изготовления: 20000 руб./м³ – для клееной древесины, 7000 руб./м³ – для цельной древесины, 32000 руб./т – для стали. Расчетное сопротивление древесины назначалось как для древесины 2-го сорта с учетом коэффициентов условий работы. Предельная величина относительного прогиба принята: для несущих балок – $l_0/300$, для прогонов – $l_0/200$. По итогам исследования были определены оптимальные геометрические параметры несущих ребер куполов. В частности, среднюю длину ребер из цельной древесины рекомендовано назначать равной $(0,19 \div 0,21) R$ при $h = (1/19 \div 1/21) l_{\text{ср}}$. С момента проведенного исследования существенно возросли цены на материалы и на изготовление конструкций. Так, например, для г. Пензы в настоящее время стоимость цельнодеревянных строганых балок равна в среднем 10500–11500 руб./м³, а стоимость стальных узловых деталей – 72000–80000 руб./т. Учитывая,

что цены на деревянные и стальные изделия возросли в разной степени, было проведено дополнительное исследование, результаты которого были использованы при разработке эскизного проекта купольного покрытия кафе (см. рис. 1). В соответствии с заданием на проектирование кафе диаметр купола был принят равным 20 м. Расчеты выполнялись по вышеописанной методике, дополнительным варьируемым параметром являлось отношение H/D , которое изменялось от 1/6 до 1/4. Стоимости цельнодеревянных ребер и стальных узловых деталей были приняты равными 11000 руб./м³ и 76000 руб./т соответственно.

В результате исследования получены оптимальные параметры купола: $H/D = 0,22–0,24$, количество ярусов 4, средняя длина несущих ребер $l_{\text{ср}} = (0,20 \div 0,21) R$. Высота проектируемого купола была назначена равной 4,5 м при количестве ярусов 4. Поперечное сечение деревянных ребер было принято 45×195 мм. Ребра раскреплялись посередине треугольными связями и соединялись с узловой деталью с помощью фасонных шайб, накладок и приваренных к ним шпилек. Узловая деталь была выполнена из отрезка трубы 159×5 , что позволило соединить ребра под различными углами.

Разработанное узловое соединение прошло экспериментальную проверку при испытаниях крупномасштабной модели и фрагментов купольного покрытия [8]. Новизна соединения подтверждена авторским свидетельством на изобретение № 1652481. Экспериментально-теоретические исследования деревянных элементов купола подтвердили возможность их практического применения [5], [7]. Здание с купольным покрытием (см. рис. 1) может быть рекомендовано, например, для использования в объектах инфраструктуры туристских комплексов [4], а задачи оптимизации могут быть темой научно-исследовательской работы студентов [1], [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев С. Б., Девятникова Л. А., Колесников Г. Н., Симонова И. В. Технологические решения для реализации потенциала ресурсосбережения при переработке круглых лесоматериалов на щепу. Петрозаводск, 2013. 92 с.
2. Горев В. В., Уваров Б. Ю., Филиппов В. В. и др. Металлические конструкции. Т. 2: Конструкции зданий. М.: Высш. шк., 2002. 528 с.
3. Зайцева М. И., Девятникова Л. А., Никонова Ю. В., Колесников Г. Н. Информационные технологии в научно-исследовательской работе студентов технических факультетов // Информационная среда вуза XXI века: Материалы VII Междунар. научно-практ. конф. Петрозаводск, 2013. С. 86–89.
4. Колесников Н. Г., Петрова Н. В., Шевченко В. И. Объекты инфраструктуры туризма как элементы туристских дестинаций // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 9–3. С. 173–174.
5. Миряев Б. В. Методы расчета и конструктивные решения сетчатых куполов из дерева и пластмасс. Пенза, 2005. 150 с.
6. Миряев Б. В., Данилова М. В. Оптимизация основных несущих элементов сетчатых деревянных куполов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2003. № 12. С. 4–7.
7. Миряев Б. В., Толушов С. А. Экспериментально-теоретические исследования сжато-изгибаемых деревянных элементов купола в предельном состоянии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 1 (661). С. 108–116.
8. Миряев Б. В., Толушов С. А., Савенков А. А. Кратковременные испытания модели сетчатого купола // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: Сб. ст. VIII Междунар. научно-техн. конф. / ПГУАС. Пенза, 2008. С. 141–146.

9. Malek S., Wierzbicki T., Ochsendorf J. Buckling of spherical cap gridshells: A numerical and analytical study revisiting the concept of the equivalent continuum // *Engineering Structures*. 2014. Vol. 75. P. 288–298.

Miryaev B. V., Penza State University of Architecture and Construction (Penza, Russian Federation)

Miryaeva A. B., Penza State University of Architecture and Construction (Penza, Russian Federation)

OPTIMIZED CONSTRUCTION DESIGN OF WOODEN DOME GRID

A technique for solving the problem of constrained optimization of mesh wooden domes depending upon their cost is presented. The optimal parameters of the dome are defined. Employment of the dome's optimized design for the purpose of roofing an adjacent catering area is offered. The variable parameter is the ratio of the height to the diameter: from 1/6 to 1/4.

Key words: optimization, mesh wooden dome

REFERENCES

1. Vasil'ev S. B., Devyatnikova L. A., Kolesnikov G. N., Simonova I. V. *Tekhnologicheskie resheniya dlya realizatsii potentsiala resursosberezheniya pri pererabotke kruglykh lesomaterialov na shchepu* [Technological solutions for the realization of potential research in the processing of round timber to chips]. Petrozavodsk, 2013. 92 p.
2. Gorev V. V., Uvarov B. Yu., Filippov V. V. i dr. *Metallicheskie konstruksii. Tom 2: Konstruksii zdaniy* [Metal structures. Volume 2: Construction of Buildings]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 528 p.
3. Zaytseva M. I., Devyatnikova L. A., Nikonova Yu. V., Kolesnikov G. N. Information technology in researches of engineering students [Informatsionnye tekhnologii v nauchno-issledovatel'skoy rabote studentov tekhnicheskikh fakul'tetov]. *Informatsionnaya sreda vuza XXI veka: Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [University Infomedia XXI Century. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference]. Petrozavodsk, 2013. P. 86–89.
4. Kolesnikov N. G., Petrova N. V., Shevchenko V. I. Tourism infrastructure elements as tourist destinations [Ob'ekty infrastruktury turizma kak elementy turistskikh destinatsiy]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2014. № 9–3. P. 173–174.
5. Miryaev B. V. *Metody rascheta i konstruktivnye resheniya setchatykh kupolov iz dereva i plastmass* [Methods of calculation and design solutions of reticulated domes made of wood and plastics]. Penza, 2005. 150 p.
6. Miryaev B. V., Danilova M. V. Optimization of the main load-bearing elements of the mesh wooden domes [Optimizatsiya osnovnykh nesushchikh elementov setchatykh derevyannykh kupolov]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [Proceedings of the higher educational institutions]. 2003. № 12. P. 4–7.
7. Miryaev B. V., Tolushov S. A. Experimental and theoretical studies of compressed-bent wooden elements of the dome in the ultimate limit state [Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya szhato-izgibaemykh derevyannykh elementov kupola v predel'nom sostoyanii]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [Proceedings of the higher educational institutions. building]. 2014. № 1 (661). P. 108–116.
8. Miryaev B. V., Tolushov S. A., Savenkov A. A. Short tests of the model mesh dome [Kratkovremennyye ispytaniya modeli setchatogo kupola]. *Effektivnye stroitel'nye konstruksii: teoriya i praktika: Sbornik statey VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [The collection of articles of the VIII International Scientific Conference: Effective constructions: theory and practice] / PGUAS. Penza, 2008. P. 141–146.
9. Malek S., Wierzbicki T., Ochsendorf J. Buckling of spherical cap gridshells: A numerical and analytical study revisiting the concept of the equivalent continuum // *Engineering Structures*. 2014. Vol. 75. P. 288–298.

Поступила в редакцию 12.01.2015