

АНАЛИЗ ДЕРЕВЯННЫХ КУПОЛОВ

Автор: Всеволод НАЗАРЕНКО

Технический Университет Молдовы

***Резюме:** В статье рассмотрены проблемы большепролетного куполостроения из деревянных элементов. Она посвящена исследованию вопроса устойчивости подобного рода сооружений и исследованию преимуществ древесины по сравнению с иными материалами. Изучены наиболее распространенные виды подобных пространственных конструкций и специфика расчета каждого из них.*

***Ключевые слова:** купол, несущая способность, местная устойчивость, продольный изгиб.*

1. Введение

Купольные конструкции, созданные в древнем Риме, ранее использовались из эстетических соображений для зодчества церквей и мечетей. В наши дни ученые раскрыли потенциал данных конструкций, используя их в качестве выставочных павильонов, складских помещений, просторных сооружений научного, торгового или спортивного характера. В последнее время используются и в качестве жилых домов.

При строительстве купольных конструкций массово используется сталь и железобетон, однако деревянные материалы позволяют строить не менее устойчивые купола, покрывая большие пролеты. В связи с экологическими проблемами, чаще эксплуатируются деревянные конструкции. Для изучения были выбраны конкретно деревянные купольные конструкции, поскольку древесина представляет собой недооцененный, но качественный материал. При ее небольшой массе она обладает значительной прочностью и упругостью. Кроме того, при условии использования коротких элементов в конструкции, можно использовать в том числе и местные материалы.

Купола обладают большой несущей способностью, также они обладают идеальной аэродинамической формой, благодаря чему их можно возводить в ветреных и ураганных районах. Благодаря аэродинамическому эффекту конструкции ветер огибает купол с меньшим сопротивлением.

Крупнейший на сегодняшний день цельно деревянный купол, расположенный в США и используемый как торговый центр, имеет пролет 161 м. Изучение возможностей древесины для создания пространственной конструкции покрывающей пролеты еще большей величины это одна из целей работы.

2. Виды купольных конструкций. Расчет куполов.

Классификация купольных конструкций весьма обширна, однако в зависимости от конструктивного решения они могут быть тонкостенными, ребристыми и сетчатыми. Для пролётов от 12 до 35 м применяют тонкостенные сетчатые купола, при пролётах от 35 до 120 м и более в целях и жёсткости применяют ребристые купола- оболочки.

Основной особенностью тонкостенных куполов-оболочек являются меридиональные арочки, кольцевой и косой настилы, верхнее кружальное и нижнее опорное кольца. Тонкостенные купола могут быть выполнены из крупнопанельных клефанерных элементов, что значительно снижает трудоемкость возведения покрытия.

Расчёт куполов-оболочек с достаточной точностью ведётся по безмоментной теории оболочек. Меридиональные ребра воспринимают сжимающие усилия в оболочке по направлению меридиана и передают их на верхнее и нижнее кольца. Ребра состоят из нескольких слоев клееных или сшитых гвоздями досок общей высотой поперечного сечения не менее $1/250D$, принимаемой из условия жесткости.

При расчёте принимается, что меридианные элементы и рёбра куполов воспринимают меридианальные усилия T_1 , кольцевые настилы – кольцевые усилия T_2 , а косые настилы – сдвигающие усилия S .

Усилия T_1 , T_2 и S находят при трёх схемах загрузки:

- 1 схема – собственный вес купола. Усилия в рёбрах T_1 в левой точке А определится по формуле:

$$T_1 = \frac{Q_p}{m \sin \alpha} \quad (1)$$

где: Q_p – вес всей вышележащей части купола;
 m – число рёбер.

Усилия T_2 в кольцевом настиле на единицу ширины определится по формуле:

$$T_2 = z \cdot R \frac{T_1}{a} \quad (2)$$

где: z – проекция на нормаль равномерно распределённой нагрузки (кровля, косой и кольцевой настилы) и веса рёбер;
 R – радиус сферы купола;
 T_1 – меридиональное усилие в рассматриваемой точке А;
 a – расстояние между рёбрами.

Сдвигающее усилие S при симметричной нагрузке равно нулю ($S=0$)

- 2 схема – снеговая нагрузка на всём пролёте. Она принимается с учётом изменения интенсивности по поверхности купола по закону косинуса, что даёт равномерную нагрузку по плану интенсивностью p_0 . Меридианные усилия:

$$T_1 = p_0 \cdot \frac{R}{2} \cdot a, \quad (3)$$

Кольцевые усилия:

$$T_2 = p_0 \cdot \frac{R}{2} \cdot c \cdot \alpha, \quad (4)$$

Сдвигающие усилия:

$$S = 0 \quad (5)$$

- 3 схема – ветровая нагрузка. Действительная эпюра давления ветра заменяется более простыми эпюрами: симметричной и кососимметричной. Усилия от симметричной эпюры определяется по следующим формулам:

1. меридианальные усилия:

$$T_1 = \frac{R e q_0 a^2}{3 l e q_0} \quad (6)$$

2. кольцевые усилия:

$$T_2 = \frac{R c q_0 a^2}{3 l e q_0} \quad (7)$$

3. сдвигающие усилия:

$$S = 0 \quad (8)$$

Усилия от кососимметричной эпюры определяются по таблицам книги Дишингера «Оболочки, тонкостенные железобетонные купола и своды».

Кососимметрическая нагрузка даёт сдвигающие усилия, на который рассчитывается косой настил.

Проверка сечений элементов.

- Определив расчётное значение T_1 на одно ребро (как максимальное при различных сочетаниях усилий при трёх перечисленных схемах загрузки) проверяют его на сжатие и смятие торцов в опорных кольцах;
- Кольцевой настил проверяют на смятие (в сжатой зоне) по полной площади. В растянутой зоне проверка на растяжение ведётся по площади;
- Верхнее кружальное кольцо проверяют на сжатие и смятие в стыке;
- Нижнее опорное кольцо проверяют на растяжение силой:

Рёбристые купола также состоят из рёбер в меридиональном направлении. Рёбра опираются на нижние и верхние опорные кольца. Нижнее опорное кольцо работает на растяжение и выполняется стальным или железобетонным, а верхнее - на сжатие и может быть деревянным. При расчете купола на горизонтальную ветровую нагрузку или несимметричную вертикальные нагрузки конструкцию расчленяют на диаметрально расположенные арки. Арка, получающая от нагрузки наибольшее горизонтальное смещение, испытывает упругий отпор остальных арок. Для простоты считают, что горизонтальные сечения купола не деформируются, а только смещаются в горизонтальном направлении одно относительно другого. Тогда упругий отпор на рассматриваемую арку можно считать приложенным в ее ключе (Рис. 1) и усилия определяются из условия совместности деформаций всех арок в ключевом шарнире, используя при этом уравнение метода сил.

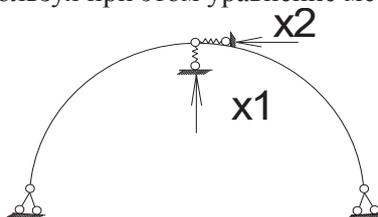


Рис. 1 Расчетная схема арки ребристого купола

Сетчатые купола рекомендуются к использованию при проектировании куполов больших пролетов, поскольку они наиболее устойчивые, поэтому получили широкое распространение. Сетка может быть треугольной, ромбической, из трапеций, шестиугольников, узлы решены на врубках или болтах. Рассчитываются сетчатые купола по безмоментной теории. Суммарные усилия в стержнях купола определяют умножением меридиональных T_1 и кольцевых T_2 усилий на соответствующие расстояния между стержнями в рассматриваемых сечениях купола, и проектировании этих усилий в направлении стержней (Рис. 2б).

При треугольной разносторонней ячейке усилия в стержнях равны:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= (l / 2\sqrt{3}) * (3T_1 - T_2); \\
 N_2 &= (l / \sqrt{3}) * (T_2 - \sqrt{3}S); \\
 N_3 &= (l / \sqrt{3}) * (T_2 - \sqrt{3}S);
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

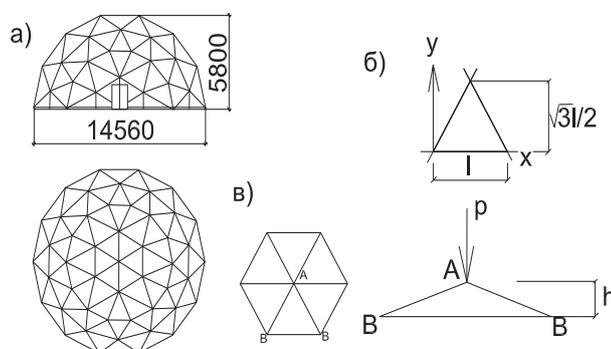


Рис. 2 Многогранный сетчатый купол: а- фасад и план, б- определение усилий в стержнях, в- расчет на местную устойчивость сетчатого купола.

Кроме осевых усилий в стержнях могут возникать и изгибающие моменты от местной и равномерно распределенной нагрузки, которые необходимо учитывать при расчете стержней на внецентренное сжатие. Местная потеря устойчивости сетчатого купола состоит в явлении продавливания узла к центру сферы (Рис. 2в). Для расчета на местную устойчивость следует проверить на продольный изгиб стержень узла при расчетной длине равной:

$$l_p = (\pi r_c \sqrt{l\sqrt{3}/h^3}) * l, \quad (13)$$

где r_c - радиус инерции стержня, l - длина стержня, h - величина превышения вершины узла пирамиды над примыкающим к нему соседним узлам. Устойчивость обеспечена, если обеспечена эффективная длина стержня.

3. Выводы

По итогам исследования можно сделать выводы, что:

- Купола обладают весомой несущей способностью
- Позволяют реализовать новые архитектурные идеи
- Дерево – экологически чистый материал, который позволяет за счет своих свойств вести быстрое строительство, не сказывающееся на прочности и устойчивости конструкции
- Применение коротких брусков из круглого леса, значительно экономит средства на монтаж и транспорт материалов. За счет совершенной аэродинамической формы нагрузки от ветра и снега уменьшаются в разы
- Деревянные купола обладают большой долговечностью

Библиография

1. Гринь И.П. *Строительные конструкции из дерева и синтетических материалов*. К.:Изд-во «Вища школа», 1975.-281 с.
2. Иванов В.А. *Конструкции из дерева и пластмасс*. К.: Изд-во «Вища школа», 1981- 393 с.
3. Слицкоухов Ю.В. *Конструкции из дерева и пластмасс*. М.: Изд-во «Стройиздат», 1986- 271 с.
4. Лебедева Н.В. *Фермы, арки, тонкостенные и пространственные конструкции*. М.: Изд-во «Архитектура-С», 2006. - 122 с.
5. Хрулев В.М. *Деревянные конструкции и детали*. М.: Изд-во «Стройиздат», 1983- 289 с.
6. СП 64.13330.2011 *Проектирование деревянных конструкций*. М: ЦНИИСК им.Кучеренко, 2011- 157 с.
7. Еврокод 5. *Проектирование деревянных конструкций*., М: СЕН, 2011-107 с.
8. E. Ertastan. *The performance of medium and long span timber roof structures: a comparative study between structural timber and steel*, 2005

Ссылка:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.634.1876&rep=rep1&type=pdf>