

КОНСТРУИРОВАНИЕ СБОРНОГО РЕБРИСТОГО КУПОЛА

Гошевец А.А., Михайлов А.А., Стоянов В.В. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

Среди многообразия деревянных пространственных конструкций купольные покрытия занимают особое место благодаря совершенной геометрии формы, высокой несущей способности и надежной работе на различные виды симметричного и несимметричного нагружения.

В работах [1-3] подробно раскрыты основные подходы конструктивных решений купольных покрытий — это ребристые, ребристо-кольцевые и сетчатые конструкции. К числу обязательных элементов купола, вне зависимости от выбранного решения, являются ребра из клееной древесины (система полуарок) и кольца (опорное и фонарное) на которые опираются полуарки, а также элементы ограждения — настилы, обшивки или панели, причем последние могут включаться в совместную работу. Опыт конструирования свидетельствует, что высоту сечения меридиональных ребер следует назначать из условия $1/60 \dots 1/20$ диаметра купола.

Современные технологические требования к сборным покрытиям предполагают максимальное заводское изготовление всех элементов покрытия включая элементы ограждения. Максимальная сборность конструкции одновременно предполагает, что основа купола — меридиональные ребра при умеренном собственном весе обладают высокой несущей способностью. Такие требования можно выполнить при вовлечении в совместную работу элементов оболочки, использовании современных материалов, а также численного расчета купольного покрытия.

Рекомендуемый ныне расчет куполов-оболочек по безмоментной теории [2], [3] устанавливает, что ребра-арки воспринимают меридиональные усилия T_1 , кольцевые усилия T_2 — кольцевые ребра или связи, а сдвигающие усилия S — элементы ограждения. Считается, что при соблюдении определенных конструктивных регламентов расчет по безмоментной теории обеспечивает достаточную прочность и жесткость куполов.

Определение усилий в куполе при любом виде загрузки обязательно связано с величинами центрального угла φ и радиусом купола R (рис. 1)

Например, меридиональное усилие на единицу длины кольцевого сечения, определяемого углом φ равно:

$$T_1^{c.в.} = \frac{Q_\varphi}{\sin r_\varphi \cdot \sin \varphi} \quad (1)$$

где: Q_φ — вес всей вышележащей части купола;

r_φ — радиус круга кольцевого сечения.

Меридиональное усилие, воспринимаемое одной аркой в выбранном горизонтальном сечении:

$$T_{1a}^{c.в.} = T_1^{c.в.} \cdot a = \frac{Q_\varphi}{m \sin \varphi} \quad (2)$$

где: a — расстояние между арками по длине рассматриваемого сечения

m — число арок-ребер купола.

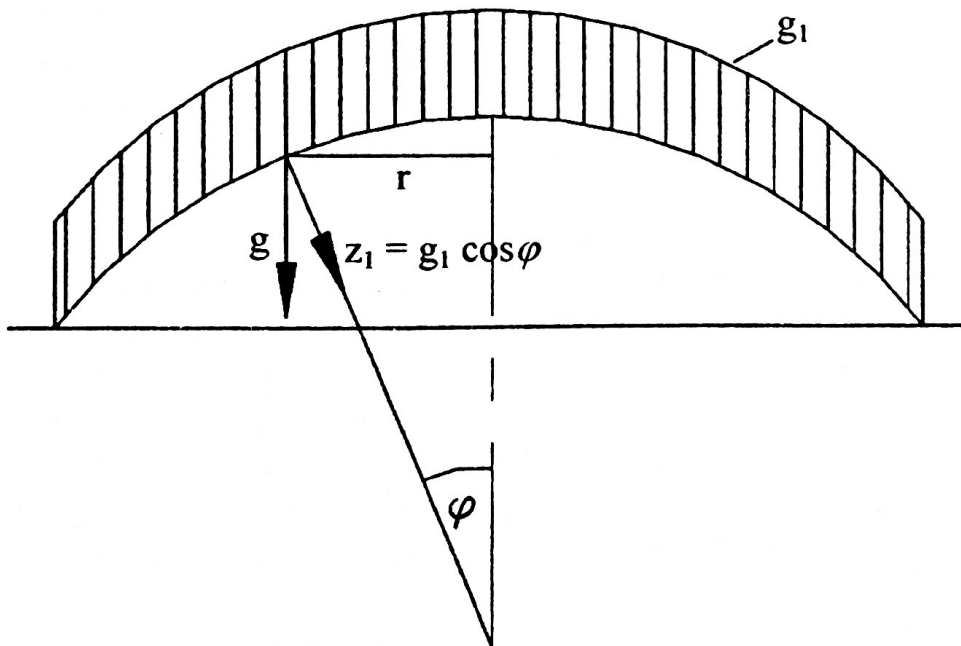


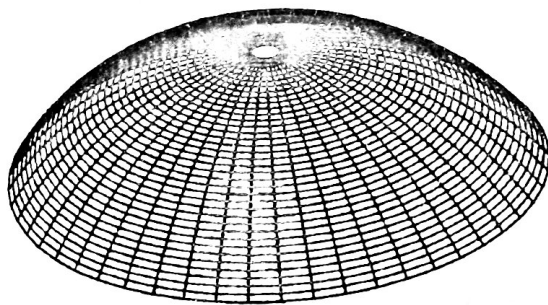
Рис. 1. К определению усилий от собственного веса в сферическом куполе.

С подробностями расчета по безмоментной теории можно познакомиться в работе [3].

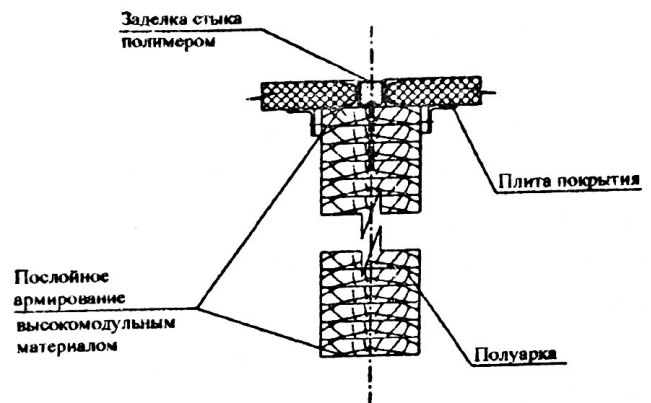
Однако, при всей простоте расчета по безмоментной теории, она

может быть рекомендована лишь как предпосылка к численному расчету с использованием метода конечных. В этом случае может быть произведен развернутый анализ напряженно-деформированного состояния всех конструктивных элементов оболочки по всему ее полю на различные комбинации внешних воздействий. Кроме того, численный расчет обеспечивает возможность оптимизации выбора поперечного сечения арок, связей, ограждения и др. в режиме достаточной несущей способности.

а)



1 - 1



б)

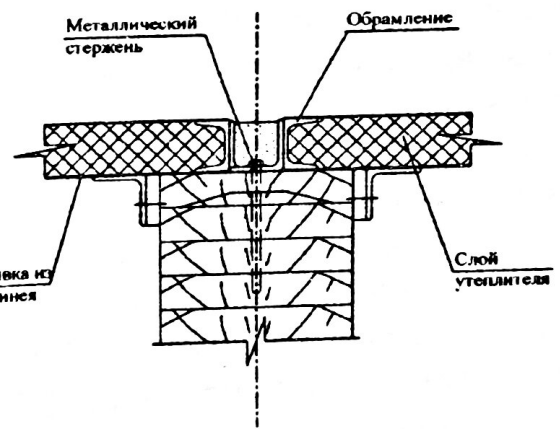
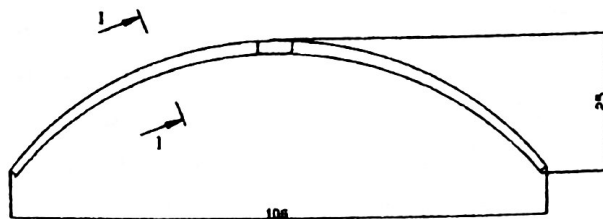


Рис. 2. Конструктивное решение купола
а) Общий вид; б) Поперечный разрез.

Рассматривая перспективные конструктивные решения ребристых куполов на базе отмеченных выше современных технологических требований, представляется необходимым реализовать несколько новых подходов в конструировании куполов.

В первую очередь это касается арок. Следует отметить, что сейчас арки-ребра в куполах выполняются из клееной древесины, что достаточно эффективно, но существенные резервы повышения несущей

способности есть — это послойное армирование арок высокомодульным материалом (например углепластиком). При этом появляется возможность осуществлять усиление сечения армированием только в местах наибольших нормальных напряжений.

Во-вторых, на базе вклеенных стержней осуществляется жесткое соединение элементов покрытия с аркой.

Реализация этих двух положений была поставлена в основе разработки конструктивного решения купола пролетом 100м и стрелой подъема 25 м. Расчет купола производился численным способом с использованием проектно-вычислительного комплекса SCAD [5], в основу расчета которого положен метод конечных элементов. Идеализация купола выполнена набором двух тел стандартного типа — оболочечного и стержневого.

Основной несущей конструкции купола (его скелетом) являются клеенные полуарки, воспринимающие меридиональные усилия и трехслойные плиты покрытия, сопротивляющиеся кольцевым усилиям и препятствующие усилиям сдвига. Полуарки с шагом 6,0м опираются на кольца — нижнее железобетонное (сечением 50x50см) и верхнее металлическое из швеллера №40. Диаметр верхнего кольца составляет 5 м. На рис. 2 показано конструктивное решение купола.

Поперечное сечение полуарок прямоугольное размером 32x150см. причем в отдельных местах полуарки усилены постановкой послойного армирования из высокомодульного материала. Трехслойные плиты покрытия составлены из алюминиевых обшивок и среднего слоя из жесткого пенополиуретана. Панель обрамлена по контуру ребрами из алюминиевых профилей. При этом предусматривается жесткое крепление плит покрытия к полуаркам (рис. 2). Конструктивное решение купола может варьироваться путем выбора других обшивок или качества обрамления, назначением продольных ребер и др., но эффективный теплоизолирующий слой из пенополиуретана остается неизменным.

Характер распределения внутренних усилий (меридиональных и кольцевых) достаточно близко совпадает с полученными значениями по безмоментной теории (Рис. 3). Вместе с тем, появилась возможность установить несущую способность меридиональных ребер в соответствии с распределением изгибающих моментов (Рис. 4). Это весьма важно, так как ребра-арки купола, в соответствии с рекомендациями СНиП II-25-80 (Деревянные конструкции. Нормы проектирования) должны быть рассчитаны на устойчивость плоской формы деформирования и это может быть сделано только при известных величинах внутренних усилий и моментов, т.е. при численном расчете купола.

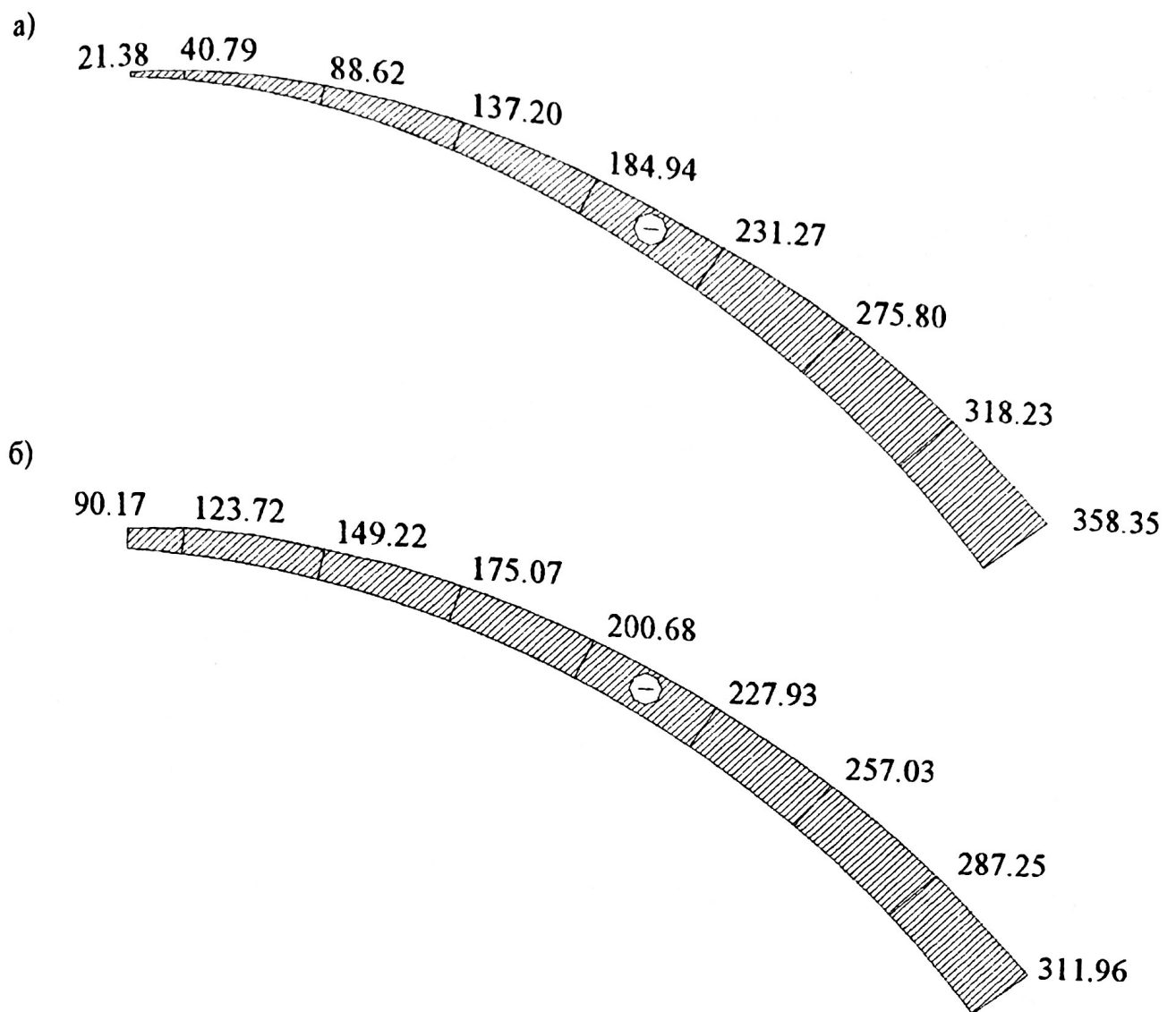


Рис. 3. Эпюры нормальных усилий в полуарке купола (кН)
 а) Безмоментная теория; б) Численный расчет.

Выбранные размеры поперечного сечения могут быть изменены в зависимости от толщины послойного армирования и вида высококомодульного материала. Например, в предложенном в [4] куполе диаметром 60 м меридиональные арки из клееной древесины имеют поперечное сечение 20х66 см. Послойное армирование этих арок углепластиком толщиной 2 мм позволяет в 1,5-2 раза увеличить изгибную жесткость принятого сечения.

В нашем случае, когда распределение внутренних усилий и моментов по длине арки установлено численным способом, появляется возможность повышать несущую изгибную жесткость сечения высококомодульным материалом только в опасных сечениях.

В перспективе послойное армирование можно будет вводить и для армирования кольцевых ребер, что значительно увеличит несущую способность ребристого купола (без существенного повышения собст-

венного веса) и кроме того улучшить его степень сборности в виде крупных трапецевидных блоков.

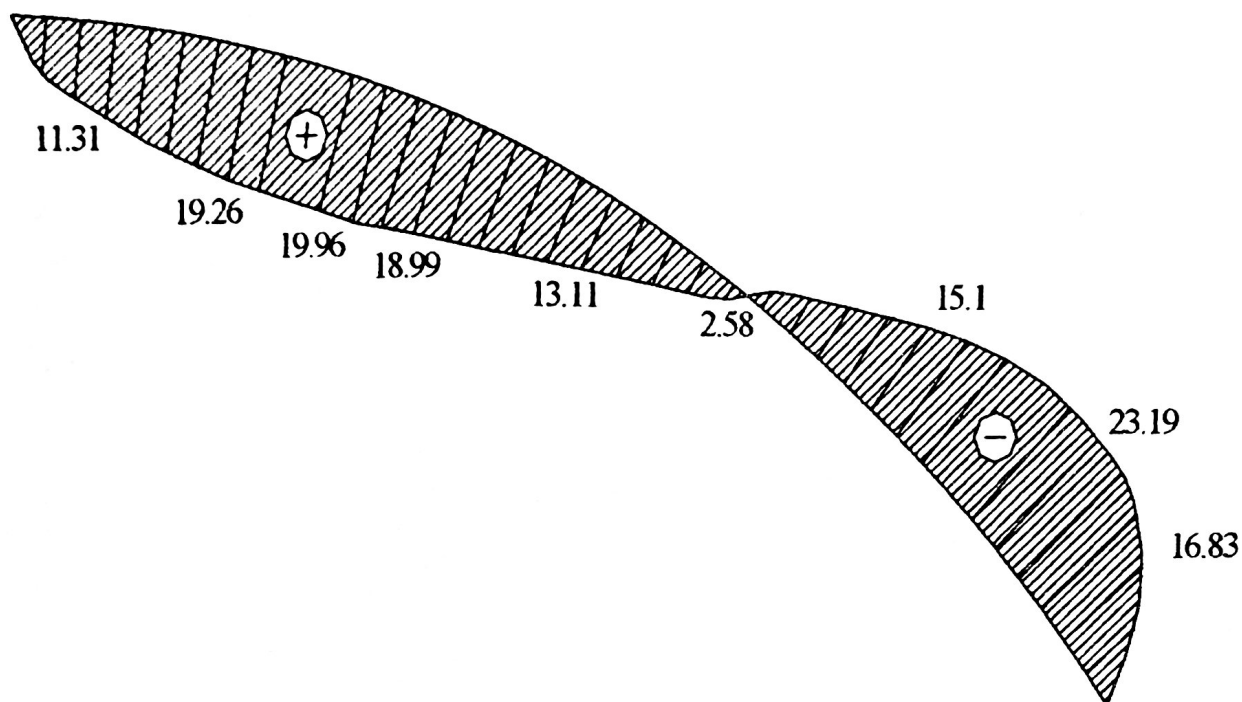


Рис. 4. Эпюра изгибающих моментов в полуарке купола (кН·м)

Литература

1. Колкунов Н.В. Основы расчета упругих оболочек — М.: Высшая школа, 1972. — 272 с.
2. Конструкции из дерева и пластмасс/ Под ред. Проф. Г.Г. Карлсена. — М.: Стройиздат, 1986. — 542 с.
3. Справочник. Современные пространственные конструкции. — М.: Высшая школа, 1991. — С. 423-433.
4. Индустриальные деревянные конструкции. Примеры проектирования/ Под ред. Ю.В. Слицкоухова. — М.: Стройиздат, 1991. — 256 с.
5. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа — К.: Компас, 2001. — 448 с.