

УДК 624.074.2

**А. М. ЮГОВ, И. В. КИЛИМЕНКО**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ МОНТАЖА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КУПОЛА**

**Аннотация.** В данной статье приведен обзор существующих купольных покрытий, классификация методов монтажа купольных покрытий в зависимости от их конструктивной схемы. Рассмотрен вопрос о зависимости способа возведения большепролетного металлического купола от геометрической схемы его каркаса и о выборе рациональной технологии монтажа купольного покрытия, которая позволит удовлетворить технологические требования и обеспечить заданную надежность конструкции и ее оптимальную стоимость.

**Ключевые слова:** металлические конструкции, большепролетный металлический купол, геометрические схемы каркасов, конструктивные схемы куполов, способы возведения, монтаж купола, монтаж конструкций.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ**

В современном промышленном производстве часто используются технологические схемы, предполагающие размещение технологического процесса в зданиях с купольным покрытием большого диаметра. Поскольку возведение такого покрытия достаточно трудоемкий процесс, стоит вопрос о выборе рациональной технологии монтажа купольного покрытия, которая позволит удовлетворить технологические требования и одновременно обеспечить заданную надежность конструкции и ее оптимальную стоимость.

Технология монтажа купольных покрытий зависит от конструктивной схемы купольного покрытия и имеет свою область применения.

Технологические и функциональные требования обуславливают постоянное увеличение пролетов конструктивных элементов зданий и сооружений. Улучшение конструктивных решений и методов монтажа куполов во многом способствует более широкому их применению в строительстве.

Купольные покрытия в зависимости от их конструктивной схемы (купол-оболочка, ребристые, ребристо-кольцевые, сетчатые) используют различные схемы и методы монтажа – от навесного путем поэлементной сборки конструкции до монтажа укрупненными блоками, существенно снижающими сроки возведения данного сооружения.

Поэтому целью статьи является определение более эффективного метода монтажа металлического купола, который удовлетворит технологические требования.

### **ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КУПОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Купола представляют собой конструкцию с криволинейным или многоугольным планом и имеют криволинейное очертание в вертикальной плоскости.

По конструкционным схемам они подразделяются на: ребристые купола; ребристо-кольцевые; сетчатые купола; радиально-балочные купола.

#### *Ребристые купола*

Конструкции ребристых куполов состоят из отдельных плоских или пространственных ребер в виде балок, ферм или полуарок, расположенных в радиальном направлении и связанных между собой прогонами.

© А. М. Югов, И. В. Килименко, 2018

Верхние пояса рёбер образуют поверхность купола (обычно сферическую). По прогонам устраивают кровлю.

В вершине для перестыковки рёбер устраивают жёсткое кольцо, работающее на сжатие. Рёбра к центральному кольцу могут крепиться шарнирно или иметь жёсткое закрепление. Пара рёбер купола, расположенных в одной диаметральной плоскости и прерванных центральным кольцом, рассматривается как единая, например арочная, конструкция (двухшарнирная, трёхшарнирная или бесшарнирная).

Ребристые купола являются распорными системами. Распор воспринимается стенами или специальным распорным кольцом в форме окружности или многогранника с жёсткими или шарнирными сопряжениями в углах.

Между рёбрами с определённым шагом укладывают кольцевые прогоны, на которые опирается кровельный настил. Прогоны, помимо своего основного назначения, обеспечивают общую устойчивость верхнего пояса ребер из плоскости, уменьшая их расчётную длину.

Для обеспечения общей жёсткости купола в плоскости прогонов устраиваются с определённым шагом скатные связи между рёбрами, а также вертикальные связи для развязки внутреннего пояса арки – между вертикальными связями устраивают распорки.

Расчётные нагрузки – собственный вес конструкции, вес оборудования и атмосферные воздействия.

Расчётными элементами купольного покрытия являются: рёбра, опорное и центральное кольцо, прогоны, скатные и вертикальные связи.

Если распор купола воспринимают распорным кольцом, то при расчёте арки кольцо может быть заменено условной затяжкой, находящейся в плоскости каждой пары полуарок (образующих плоскую арку).

#### *Ребристо-кольцевые купола*

В них прогоны с рёбрами составляют одну жёсткую пространственную систему. В этом случае кольцевые прогоны работают не только на изгиб от нагрузки на покрытие, но и от реакций промежуточных рёбер и воспринимают растягивающие или сжимающие кольцевые усилия, возникающие от распоров в месте опирания многопролётных полуарок.

Вес рёбер (арок) в таком куполе уменьшается благодаря включению в работу кольцевых прогонов как промежуточных опорных колец. Кольцевые рёбра в таком куполе работают так же, как и опорное кольцо в ребристом куполе, и при расчёте арок могут быть заменены условными затяжками.

При симметричной нагрузке расчет купола можно вести, расчленив его на плоские арки с затяжками на уровне кольцевых рёбер (прогонов).

#### *Сетчатые купола*

Если в ребристом или ребристо-кольцевом куполе увеличить связность системы, то можно получить сетчатые купола с шарнирным соединением стержней в узлах.

В сетчатых куполах между рёбрами (арками) и кольцами (кольцевыми прогонами) располагают раскосы, благодаря которым усилия распределяются по поверхности купола. Стержни в этом случае работают в основном только на осевые силы, что уменьшает вес рёбер (арок) и колец.

Стержни сетчатых куполов выполняют из замкнутых профилей (круглого, квадратного или прямоугольного сечения). Узлы соединений стержней как и в структурах или сетчатых оболочках.

Расчёт сетчатых куполов производят на ЭВМ по специально разработанным программам.

Приблизительно их рассчитывают по безмоментной теории оболочек – как сплошную осесимметричную оболочку по формулам из соответствующих расчётно-теоретических справочников.

#### *Радиально-балочные купола*

Представляют собой ребристые купола, составленные из сегментных полуферм, расположенных радиально. В центре сегментные полуфермы присоединяются к жёсткому кольцу (решётчатому или сплошнотенчатому с диафрагмами жёсткости).

В целом большепролётные купола являются пространственными стержневыми системами с многочисленными элементами, поэтому их проектирование и строительство сопряжено с решением сложных задач. К основным задачам относятся: конструирование и расчет пространственного каркаса, выбор способа и последовательности монтажа элементов каркаса. Геометрическая схема каркаса большепролётного металлического купола определяет его конструктивное решение и характер монтажа его отдельных элементов. Оба этих фактора влияют на выбор способа возведения, схемы и

последовательности монтажа конструкций. Монтаж каркасов большепролетных металлических куполов представляет собой технически сложную задачу. Это обусловлено значительными пролетами, изменяющейся высотой, множеством по-разному ориентированных в пространстве конструктивных элементов и необходимостью соединения их под разными углами. Возведение каркасов большепролетных металлических куполов выполняется самыми разными способами, из которых наибольшее распространение получили следующие:

- 1) монтаж с применением временной центральной опоры;
- 2) монтаж с применением нескольких временных опор (в центре и (или) вокруг него);
- 3) сборка или монтаж со строительных лесов или специальных временных подмостей;
- 4) установка подъемом и (или) перемещением целиком после поэлементной сборки на земле;
- 5) монтаж навесным способом поэлементно, конструкциями или укрупненными фрагментами (блоками);
- 6) комбинированный из вышеуказанных.

Первые два способа применяются в основном при монтаже каркасов ребристых и ребристо-кольцевых куполов, а также циклически симметричных сетчатых куполов. Третий и четвертый – при монтаже каркасов сетчатых куполов в случае их относительно небольших пролетов. Пятый способ применяется только для каркасов двухсетчатых высоких куполов больших пролетов. При комбинированном возведении обычно сочетают первый или второй способы с третьим. Например, при помощи временных опор устанавливают собранные на земле меридиональные конструкции каркаса, а затем с использованием подмостей монтируют остальные элементы. Возможна также сборка на земле секториальных частей купольного каркаса отдельно друг от друга с последующей их установкой на временную центральную опору. В зависимости от предполагаемого способа монтажа купольные каркасы при проектировании разбиваются на крупные пространственные части (сектора), объемные стержневые монтажные блоки (фрагменты каркаса), плоские решетчатые конструкции (ребра), отдельные элементы конструкций (фрагменты ребер или колец) и отдельные стержневые элементы каркаса. Монтаж купольных каркасов первым и вторым способами производится цельными меридиональными ребрами или их крупными частями. В качестве временной центральной опоры применяются решетчатые башни (сквозного сечения) из четырех и более ветвей, а также мачты сквозного сечения, которые поддерживаются в вертикальном положении системой оттяжек. Для промежуточных опор применяют башни и мачты сквозного сечения. В случае применения башни для временной центральной опоры она может быть использована в качестве нижней части стационарного (башенного) подъемного крана или служить опорой для поворотных стреловой или Г-образной опорной частей крана. При монтаже каркасов большепролетных металлических куполов как крупными конструкциями, так и их небольшими частями применяются подвижные башенные краны на рельсах или самоходные стреловые краны на гусеничном ходу. Высота башенного крана или длина стрелы гусеничного, как и их грузоподъемность, зависят от размеров и конструкции купольного покрытия.

С использованием временной центральной опоры возведены большепролетные купола следующих зданий:

Колизей в Шарлотте в США, построенный в 1955 г. Покрытием Колизея служит однопоясной каркас ребристо-кольцевого купола пролетом 100 м и высотой 16,4 м [3], установленный на высокие, немного наклоненные наружу колонны. В каждой ячейке купольного каркаса имеются гибкие крестовые связи, что отчасти способствует его работе по схеме Шведлера.

Московский цирк на проспекте Вернадского, построенный в 1971 г. Покрытие из складчатого двухпоясного ребристого купола (ребра-складки из наклонных ферм переменной высоты) пролетом 65 м и высотой 20,7 м, опирающегося на металлические колонны. Ко всем складчатым ребрам у опорного кольца прикреплены длинные консоли, образующие широкий контурный навес угловатого очертания.

Спортивно-оздоровительный комплекс «Динамо» в Москве, построенный в 2006 г. Купольное покрытие двухслойное. Верхний слой поддерживает кровельные конструкции и через систему стоек опирается на нижний. Нижний несущий слой представляет собой однопоясной ребристо-кольцевой купол пролетом 72 м и высотой 14 м, установленный на железобетонный контур. Опорным контуром служит верхний и самый большой по диаметру кольцевой ярус круглого четырехэтажного здания из железобетона.

Учебно-тренировочный центр «Фристайл» в Минске, построенный в 2015 г. Покрытие основной части здания выполнено в виде двухпоясного ребристо-кольцевого купола пролетом 90 м и высотой 24 м, опирающегося на короткие колонны. Ребра купола выполнены из плоских криволинейных ферм

серповидного очертания внизу, а между отдельными кольцами по всему контуру устроены связи. К основной части здания примыкает закрытый трамплин для фристайла с опорной башней.

С использованием нескольких временных опор возведены большепролетные купола следующих зданий:

Аквипарк «Аквасфера» в Донецке, построенный в 2012 г. Покрытием Аквасферы служит двухъярусный каркас ребристого купола пролетом 85 м и высотой 25 м, установленный на короткие колонны. Половина опирающихся на них меридиональных ребер доходят до верхнего кольца, а остальные заканчиваются в средней части купола. В верхней части покрытие оснащено четырьмя подвижными лепестками (в виде секторов по 1/8 сферы).

Стадион для бейсбола и американского футбола Астродам (Astrodome) в Хьюстоне в США, построенный в 1965 г. Покрытием Астродама служит двухъярусный каркас секториально-сетчатого купола (схема Чивитта) пролетом 196 м и высотой 28,4 м, установленный на высокие вертикальные колонны. Элементы купольного каркаса выполнены в виде ферм с параллельными поясами, которые при возведении устанавливались на временные опоры – в центре и по двум окружностям вокруг него.

Склад Серебрянского цементного завода в Рязанской области, построенный в 2013 г. Покрытие склада выполнено в виде двухъярусного купола Шведлера пролетом 102 м и высотой 33 м, установленного на короткие металлические колонны. Каркас купола характеризуется чередованием одиночных плоских и парных пространственных ребер из ферм криволинейного очертания с параллельными поясами. Между всеми ребрами по всей высоте купола установлены связи.

С использованием строительных лесов или подмостей возведены большепролетные купола следующих зданий:

Торгово-развлекательный центр Глобал Сити в Москве, построенный в 2007 г. Покрытием основной части ТРЦ служит одноярусный каркас секториально-сетчатого купола (схема Чивитта) пролетом 60 м. Купол опирается на пространственное решетчатое кольцо (четырёхугольного сквозного сечения), установленное на высокие решетчатые колонны. Сначала с использованием временной центральной опоры устанавливались собранные вместе стержни, расположенные на границах секторов купола (ребра), а остальные элементы монтировались со строительных лесов.

Концертный зал Москва-Сити, построенный в 2017 г. Покрытием зала служит ребристый купол пролетом 64 м и высотой 14 м. Решетчатые пространственные ребра опираются на верхний контур многоярусного круглого здания из железобетона и поддерживают центральную сетчатую верхушку купола. Покрытие имеет подвижную (трансформирующуюся) оболочку. Монтаж купольного каркаса выполнялся со специальных поддерживающих строительных лесов.

Сборка каркасов куполов на земле с последующим подъемом их на проектную высоту производилась при возведении следующих покрытий:

Покрытия цилиндрических резервуаров для хранения нефти в Нижнем Новгороде, построенные в 2002 г. Покрытием каждого резервуара служит одноярусный сетчатый купол пролетом 40 м и высотой 8,2 м. Каркас купола выполнен по звездчатой схеме и опирается на кольцо по верху цилиндрической стенки.

Электродепо Московской монорельсовой транспортной системы, построенное в 2004 г. Покрытием здания трансбордера электродепо служит одноярусный сетчатый купол пролетом 46 м и высотой 8 м. Каркас купола выполнен по звездчатой схеме. Для подъема полностью собранного на земле каркаса использовались лебедки, закрепленные на опорном контуре, установленном на металлические колонны.

Монтаж купольных каркасов навесным способом применялся при возведении следующих зданий и сооружений:

Американский павильон (теперь Канадский музей водных экосистем) «Биосфера» в Монреале в Канаде, построенный в 1967 г. и ставший мировой туристической достопримечательностью. Павильон запроектирован Р. Б. Фуллером как геодезический купол в виде усеченной сферы двухсетчатого вида диаметром 76 м и высотой 62 м. Внутри сферы расположены несколько зданий и сооружений.

Арена «Глобус» (Ericsson Globe Arena) в Стокгольме в Швеции, построенная в 1989 г. Покрытие арены представляет собой двухъярусный купол в виде полусферы диаметром 110 м и высотой 55 м. Каркасом купола служит стержневая система структурного типа, которая опирается на высокие, искривленные во-внутрь (под сферу) мощные металлические колонны, соединенные друг с другом кольцевыми элементами. Снаружи к куполу прикреплены меридиональные рельсы для подъема двух обзорных сферических кабин.

Приведенные примеры сооружений свидетельствуют о многообразии способов возведения построенных большепролетных купольных покрытий.

Все эти способы соответствуют представленной ранее классификации.

Из примеров видно, что огромное влияние на способ и характер возведения купола оказывает схема каркаса и его конструктивное решение, включая число поясов. Монтаж ребристых куполов существенно отличается от возведения сетчатых куполов. Определяющим фактором для сетчатых куполов при выборе способа возведения служат размеры купола – его пролет и высота. Таким образом, выполненный обзор возведенных металлических купольных покрытий зданий и сооружений больших пролетов позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Металлический купол как конструктивная форма покрытия имеет большое распространение в практике мирового строительства зданий и сооружений различного назначения.

2. Монтаж большепролетных куполов представляет собой трудоемкий процесс, связанный с соединением друг с другом большого количества конструкций разной пространственной ориентации.

3. Способ возведения каркасов куполов во многом зависит от геометрической схемы и конструктивного решения их каркасов, от размеров пролета, от соотношения высоты и пролета.

4. При строительстве большепролетных относительно невысоких двухпоясных или высоких однопоясных куполов применяются способы возведения с временными опорами всех видов или сборка на земле с последующим перемещением в проектное положение.

5. При строительстве высоких двухпоясных большепролетных куполов, геометрически приближающихся к полусфере или более ее, предпочтение отдается навесному способу монтажа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тур, В. И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности [Текст] / В. И. Тур. – М. : АСВ, 2004. – 96 с.
2. Зверев, А. Н. Большепролетные конструкции покрытий общественных и промышленных зданий [Текст] / А. Н. Зверев. – Л. : Санкт-петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 1998. – 142 с.
3. Каталог рекомендуемых пространственных конструкций для общественных зданий с большими пролетами [Текст] / Б. А. Миронков. – Л. : Стройиздат, Ленинград. отд-ние, 1977. – 160 с. (Гос. ком. по гражд. стр-ву и archit. при Госстрое СССР, Ленинград. зон. науч.-исслед. и проект. ин-т типов. и эксперимет. проектир. жилых и обществ. зданий. ЛенЗНИИЭП).
4. Федорцев, И. В. Технология возведения конструкций покрытия большепролетных зданий [Текст] : учебное пособие / И. В. Федорцев, Е. А. Султанова. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2008. – 134 с.
5. Снарский, В. И. Технология возведения большепролетных конструкций [Текст] : учебное пособие / В. И. Снарский, С. В. Снарский. – Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. – 167 с.
6. Технология и организация монтажа строительных конструкций [Текст] : справочник / Под ред. В. К. Черненко, В. Ф. Баранникова. – К. : Будивэльник, 1988. – 276 с.

Получено 11.10.2018

#### А. М. ЮГОВ, І. В. КИЛИМЕНКО ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОНТАЖУ МЕТАЛЕВОГО КУПОЛА ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У даній статті наведено огляд існуючих купольних покриттів, класифікація методів монтажу купольних покриттів залежно від їх конструктивної схеми. Розглядається питання про залежність способу виготовлення багатопрольотного металевго купола від геометричної схеми його каркаса та вибору раціональної технології монтажу купольного покриття, яка дозволить задовольнити технологічні вимоги та забезпечити задану надійність конструкції та її оптимальну вартість.

**Ключові слова:** металеві конструкції, металевий купол, геометричні схеми каркасів, конструктивні схеми куполів, способи зведення, монтаж купола, монтаж конструкцій.

ANATOLIY YUGOV, IRINA KYLYMENKO  
SELECTION OF RATIONAL TECHNOLOGY OF INSTALLATION OF METALLIC  
COPPER

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** This article provides an overview of existing dome coatings, classification of dome cover mounting methods depending on their design scheme. The question of the dependence of the method of constructing a large-span metallic dome on the geometric scheme of its frame and on the choice of rational dome cover installation technology, which will satisfy the technological requirements and ensure the specified reliability of the structure and its optimal cost, is considered.

**Key words:** metal constructions, metal span metal dome, geometric schemes of skeleton, constructive schemes of domes, methods of erection, installation of a dome, installation of structures.

**Югов Анатолий Михайлович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: проектирование, монтаж, эксплуатация, техническая диагностика, оценка технического состояния, реконструкция и усиление строительных металлических конструкций, технология и организация работ при строительстве и реконструкции зданий и сооружений.

**Килименко Ирина Валериевна** – студент ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: технология и организация работ при возведении металлического купола.

**Югов Анатолій Михайлович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології і організації будівництва ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: проектування, монтаж, експлуатація, технічна діагностика, оцінка технічного стану, реконструкція та підсилення будівельних металевих конструкцій, технологія та організація робіт при будівництві та реконструкції будівель та споруд.

**Килименко Ірина Валеріївна** – студент ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: технологія та організація робіт зі зведення металевого купола.

**Yugov Anatoliy** – D. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Technology and Management in Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: planning, editing, exploitation, technical diagnostics, estimation of the technical state, reconstruction and strengthening of build metallic constructions, technology and organization of works, at building and reconstruction of buildings and buildings.

**Kylymenko Irina** – student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: technology and organization of work during the erection of a metal dome.