



Аналитические обзоры

УДК 624.074.2:624.014:693.8

DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-1-4-16

БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КУПОЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ И ИХ ВОЗВЕДЕНИЕ

Е.В. ЛЕБЕДЬ, А.Ю. АЛУКАЕВ

Национальный исследовательский

Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Приведены основные виды геометрических и конструктивных схем каркасов купольных покрытий из металла. Показано, что по геометрической схеме каркаса купола разделяют на три основных вида: ребристые, ребристо-кольцевые и сетчатые. А сетчатые купола разделяются на циклически симметричные с повторяющимися секториальными геометрическими схемами и геодезические, которые получаются на основе вписанных в сферу многогранников. По своему конструктивному исполнению каркасы ребристых и ребристо-кольцевых металлических куполов могут быть одноясными и двухясными. Геометрическая схема каркаса большепролетного металлического купола определяет способ его возведения, от которого зависит конструктивное решение элементов каркаса и последовательность их монтажа. Перечислены способы возведения куполов: с временными опорами, подъемом целиком или навесным монтажом. Выполнен краткий обзор возведенных большепролетных металлических куполов. С акцентом на использованный способ возведения большепролетного металлического купола приведены примеры построенных зданий и сооружений в разных странах мира. Дана общая характеристика конструктивной схемы купольного каркаса каждого из них. На этих примерах показана зависимость способа возведения большепролетного металлического купола от геометрической схемы его каркаса.

Сделан вывод о большом распространении купола как конструктивной форма покрытия из металла в практике мирового строительства в зданиях различного назначения. При строительстве относительно невысоких двухясных или высоких одноясных куполов применяются способы возведения с временными опорами всех видов или сборку на земле. Отмечена предпочтительность монтажа двухясного каркаса навесным способом при значительной высоте большепролетного купола.

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

В мире построено множество большепролетных купольных покрытий с металлическим каркасом. Это объясняется их выразительной архитектурой, экономичностью расхода металла, небольшой трудоемкостью изготовления и монтажа [1, 2]. Купола, благодаря положительной Гауссовой кривизне, характеризуются большей жесткостью по сравнению с пространственными покрытиями другой геометрической формы. Купола занимают также лидирующее положение среди других выпуклых покрытий двойкой кривизны из-за повышенной пространственной жесткости, связанной с замкнутым опорным контуром круглой формы в плане и большой высотой в сравнении с пролетом. Купола по очертанию могут быть сферическими, параболическими и эллипсоидными. Они относятся к оболочкам вращения. Ось вращения вертикальна и проходит через вершину такого купола.

По геометрической схеме каркаса купола разделяют на три основных вида: ребристые, ребристо-кольцевые и сетчатые [3, 4]. Ребристые купола состоят из отдельных меридиональных ребер, расположенных в радиальных направлениях, опирающихся на нижнее (опорное) кольцо и соединенных в вершине верхним кольцом (рис. 1, а). В ребристо-кольцевых куполах, кроме нижнего и верхнего

колец, меридиональные ребра опоясываются еще несколькими промежуточными кольцами (рис. 1, б). С увеличением пролета ребристо-кольцевые купола становятся экономичнее ребристых благодаря лучшей пространственной работе. Для повышения пространственной жесткости каркаса, в ребристо-кольцевых и ребристых куполах между меридиональными ребрами в четырех равноудаленных друг от друга секторах в плоскостях четырехугольных ячеек, ограниченных, соответственно, промежуточными кольцами или кровельным прогоном, устанавливаются связи крестового вида.

Если в каждой четырехугольной ячейке каркаса ребристо-кольцевого купола установлены крестовые связи, то такой каркас называют куполом схемы Шведлера (рис. 1, в). Вся оболочка (для стержневых систем понятие условное) этого купола разбивается стержнями на треугольные ячейки, благодаря которым каркас приобретает большую жесткость в касательной к оболочке плоскости.

В сетчатых куполах каркасы разбиваются на треугольные ячейки с целью обеспечения геометрической неизменяемости образуемой пространственной стержневой системы. В большепролетных куполах сетчатые каркасы благодаря повышенной пространственной жесткости экономичнее ребристых и ребристо-кольцевых. Сетчатые купола характеризуются близкими по размерам ячейками и их разделяют на два типа: циклически симметричные и геодезические.

Циклически симметричные купола отличаются повторяемостью геометрического строения каркаса по секторам. Этим свойством обладает и купол Шведлера, но его ребра и кольца имеют несравнимо более мощное сечение по отношению к связям. Среди сетчатых куполов циклически симметричного типа наибольшее распространение получили звездчатый (схемы Фёппля - рис. 1, г) и секториально-сетчатый (схемы Чивитта - рис. 1, д) купола.

Геодезические схемы каркасов геодезических куполов получаются на основе вписанных в сферу многогранников (схема Фуллера) с правильными треугольниками, пятиугольниками и шестиугольниками (рис. 1, е). Наибольшее применение среди многогранников имеют икосаэдр (20 треугольных граней), додекаэдр (12 пятиугольных граней) и усеченный икосаэдр (12 пятиугольных и 20 шестиугольных граней) [3]. Вершины многоугольников и спроецированные на сферу центры граней соединяют дугами большого круга или геодезическими линиями, получая сетку с треугольными ячейками. Такими же дугами соединяют середины сторон треугольных ячеек и так далее.

Проектируются также купола, каркасы которых характеризуются переменной регулярности и комбинированными схемами геометрического построения от опорного контура к вершине. Например, в ребристо-кольцевых куполах, из-за уменьшения расстояния между ребрами в верхней части купола, количество ребер может уменьшаться по мере приближения к его вершине. Могут применяться каркасы ребристо-кольцевого вида с чередующимися по высоте связями между кольцами по всей окружности купола. Существуют также каркасы с различными геометрическими схемами построения сетчатых куполов у опорного контура и у вершины, с изменением регулярности и геометрической формы ячеек от опорного контура к вершине, а также другими комбинациями схем.

По своему конструктивному исполнению каркасы ребристых и ребристо-кольцевых металлических куполов могут быть однопоясными и двухпоясными, а каркасы сетчатых металлических куполов могут быть односетчатыми и двухсетчатыми. Ребра и кольца однопоясных купольных каркасов проектируют, в основном, из элементов двутаврового сечения. Для двухпоясных каркасов, применяют, как правило, элементы в виде плоских ферм с параллельными поясами, стержни которых изготавливают из профильного металла. Элементы односетчатых купольных каркасов изготавливают, в основном, из двутавров. Стержневые элементы двухсетчатых куполов проектируют, в основном, из труб, хотя применяют также и другие виды профилей.

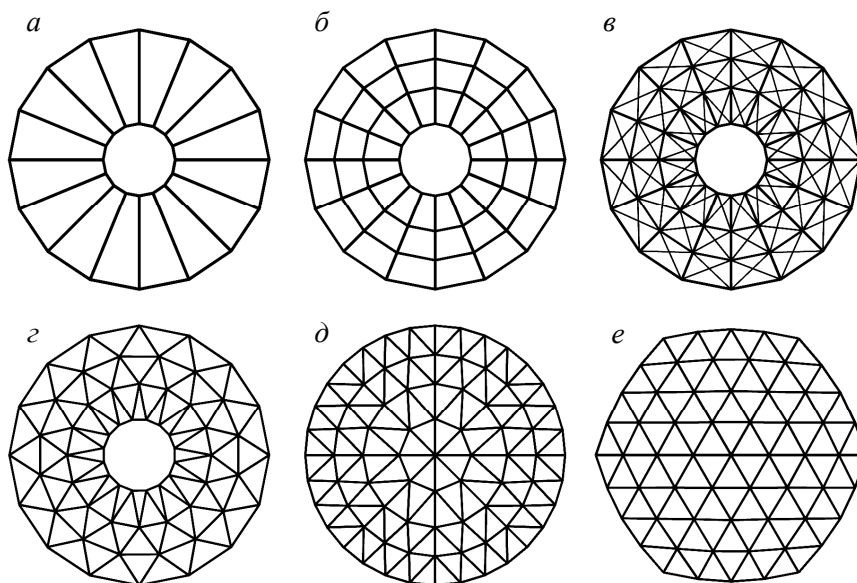


Рис. 1. Геометрические схемы каркасов металлических куполов

a — ребристый купол; *б* — ребристо-кольцевой купол; *в* — купол Шведлера;
г — звездчатый купол; *д* — секториально-сетчатый купол; *е* — геодезический купол

В однополюсных или односетчатых куполах конструктивные элементы вместе с продольной силой (в большинстве стержней сжимающих) испытывают изгиб, поэтому их соединения в нормальном направлении осуществляется через жесткие узлы. В касательных к купольной оболочке плоскостях узлы шарнирные. В двухполюсных или двухсетчатых куполах конструктивные элементы становятся похожими на фермы, даже если ячейки каркаса сверху и снизу не расположены непосредственно друг над другом или имеют разные геометрические очертания (геодезические сетчатые купола). Поэтому узловые соединения стержней таких каркасов проектируют шарнирными в нормальном к оболочке купола направлении.

В целом, большепролетные 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 большепролетного 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 [3, 5—7]:

- 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);
- б) 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 Шарлотте¹ в США (рис. 2, а), построенный в 1955 г. Покрытием Колизея служит одноярусный 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 Вернадского² (рис. 2, б), построенный в 1971 г. Покрытие из складчатого двухъярусного ребристого купола (ребраскладки из наклонных ферм переменной высоты) пролетом 65 м и высотой

¹ Charlotte Coliseum. Charlotte, NC. Режим доступа: <http://scottymoore.net/charlotteColiseum.html>. Дата обращения: 18.03.2017.

² Государственный цирк на проспекте Вернадского // СОВАРХ. Советская архитектура. Режим доступа: <http://www.sovarch.ru/catalog/object/649/> Дата обращения: 17.07.2017.

20,7 м [5, 6], опирающегося на металлические колонны. Ко всем складчатым ребрам у опорного кольца прикреплены длинные консоли, образующие широкий контурный навес угловатого очертания.

Ледовый дворец «Арена-Север»³ в Красноярске (рис. 2, в), построенный в 2011 г. Покрытие в виде двухпоясного ребристого купола пролетом 80 м, ребра которого выполнены из плоских ферм ломаного очертания. Ребра попарно объединены между собой связями по всей высоте купола⁴. Каркас купола опирается на металлические колонны.

Спортивно-оздоровительный комплекс «Динамо»⁵ в Москве (рис. 2, з), 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 железобетона⁶.

Учебно-тренировочный центр «Фристайл»⁷ в Минске (рис. 2, д), 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 колонны⁸. 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.

Здание штаб-квартиры НОК⁹ в Минске (рис. 2, е), построенное в 2014 г. В качестве опоры купола вместо башни использовались специальные строительные леса в виде многоярусной стержневой поддерживающей системы под центральной частью купола. Каркас купола пролетом 40 м выполнен двухпоясным в виде стержневой системы структурного типа¹⁰, который опирается на высоко расположенный опорный контур. Монтаж каркаса купола выполнялся отдельными секториальными частями.

С использованием нескольких временных опор возведены большепролетные купола следующих зданий:

Аквапарк «Аквасфера»¹¹ в Донецке (рис. 3, а), построенный в 2012 г. Покрытием Аквасферы служит двухпоясной каркас ребристого купола пролетом

³ Арена Север. // АЕРОСТО. Красноярск с высоты 2014. Режим доступа: <http://aerosto.ru/portfolioitem/1113-2/> Дата обращения: 15.07.2017.

⁴ «Арена-Север» // ЗАО Стальмонтаж. Режим доступа: <http://www.stalmon.ru/nashi/57>. Дата обращения: 14.03.2017.

⁵ Дворец спорта «Динамо» в Крылатском р-не в г. Москве // ASTIR. Construction design architecture. Режим доступа: <http://www.astirm.ru/construction/sport/dinamo/dinamo.html>. Дата обращения: 20.11.2017.

⁶ Спортивно-оздоровительный комплекс «Динамо» в Москве // ЦНИИПСК им. Мельникова. СТАКО. Режим доступа: <http://www.stako.ru/catalog/14/>. Дата обращения: 14.03.2017.

⁷ Учебно-тренировочный центр фристайла со спортивно-оздоровительным комплексом по ул. Сурганова // Минскпромстрой. ОАО. Режим доступа:

http://www.minskpromstroy.by/ru/our_facilities/admin_buildings/uchebno-trenirovochnyy-centr-fristayla-so-sportivno-ozdorovitelny-m-kompleksom-po-ul-surganova.html. Дата обращения: 25.03.2017.

⁸ Каким будет минский центр фристайла? // NEST.by. Недвижимость и строительство. Режим доступа: <http://www.nest.by/content/kakim-budet-minskii-tsentr-fristayla>. Дата обращения: 25.03.2017.

⁹ Топ-10 зданий Минска с куполами: от штаб-квартиры НОК до монастыря // TUT.BY. Недвижимость. Режим доступа: <https://realty.tut.by/news/offtop-realty/482078.html>. Дата обращения: 15.07.2017.

¹⁰ Здание штаб-квартиры Национального Олимпийского Комитета, Минск, Беларусь // PERI. Успешно строить с PERI. Режим доступа:

http://www.peri.by/projects.cfm/fuseaction/diashow/reference_ID/2222/currentimage/6/referencecategory_ID/65.cfm. Дата обращения: 25.03.2017.

¹¹ Аквапарк Аквасфера. Фотографии путешественников // Planet of Hotels. Украина (Донецк). Режим доступа: <http://www.planetofhotels.com/ukraine/doneck/akvapark-akvasfera>. Дата обращения: 25.03.2017.

85 м и высотой 25 м, установленный на короткие колонны¹². 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).

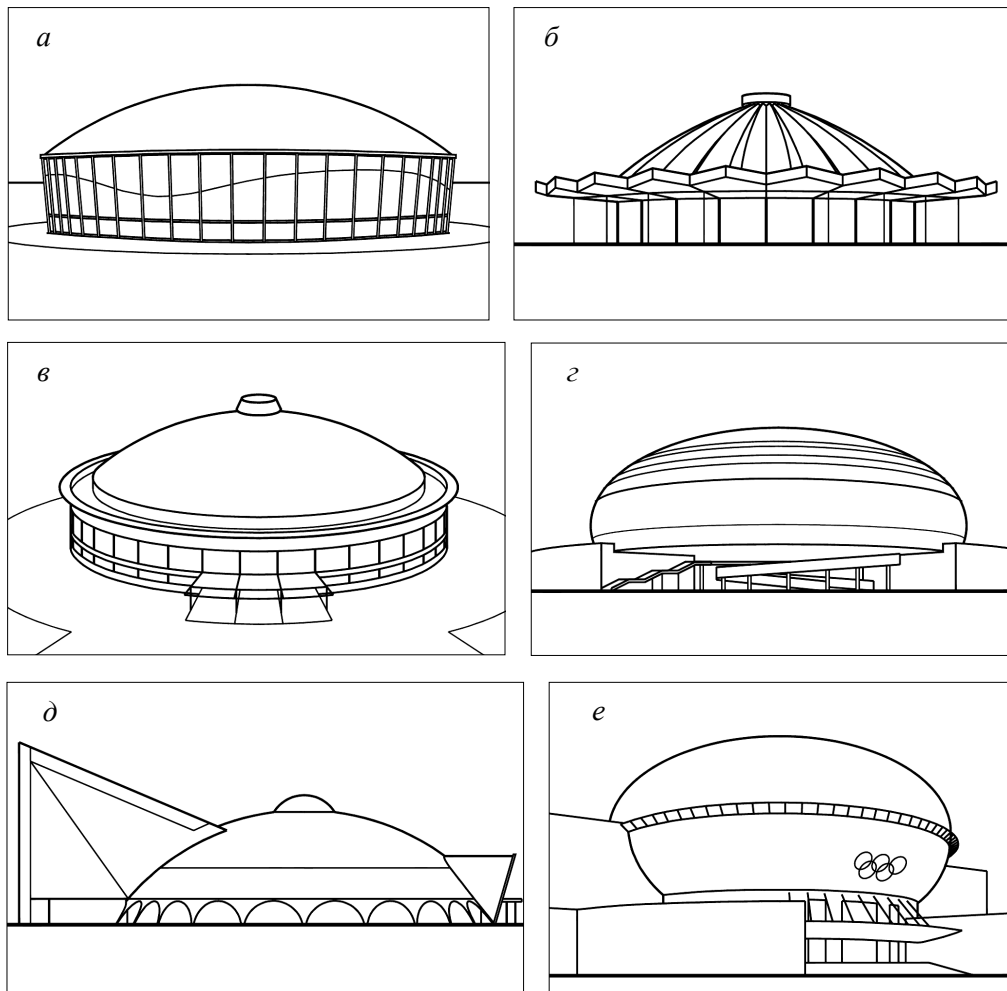


Рис. 2. Здания с купольными покрытиями, при монтаже которых применялась временная центральная опора:

- a* — Колизей в Шарлотте; *б* — Московский цирк на Вернадского;
в — «Арена-Север» в Красноярске; *г* — спорткомплекс «Динамо» в Москве;
д — центр «Фристайл» в Минске; *е* — штаб-квартира НОК в Минске

Стадион для бейсбола и американского футбола Астродом¹³ (Astrodome) в Хьюстоне в США (рис. 3, *б*), построенный в 1965 г. Покрытием Астродома служит двухъярусной каркас секториально-сетчатого купола (схема Чивитта) пролетом 196 м и высотой 28,4 м [3, 8, 9], установленный на высокие вертикальные колонны¹⁴. Элементы купольного каркаса выполнены в виде ферм с

¹² Аквапарк «Аквасфера» в Донецке. Монтаж конструкций купола // Интерстиль. Режим доступа: <http://interstyle.su/gallery/aquaparks/akvapark-akvasfera-v-donetske/#ad-image-26> Дата обращения: 25.03.2017.

¹³ Astrodome. Houston, Texas // MLB Tickets. Режим доступа: <http://www.ballparks.com/baseball/national/astrod.htm>. Дата обращения: 18.07.2017

¹⁴ Louis O. Bass, A.M. Unusual Dome Awaits Baseball Season in Houston. Civil Engineering - ASCE, January 1965. Режим доступа: <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/HOUSTON/h-unusua.html> Дата обращения: 15.03.2017.

параллельными поясами, которые при возведении устанавливались на временные опоры – в центре и по двум окружностям вокруг него.

Стадион для американского футбола Супердом (Superdome)¹⁵ в Новом Орлеане в США (рис. 3, б), построенный в 1975 г. Покрытием Супердома служит двухъярусный каркас секториально-сетчатого купола (схема Чивитта)¹⁶ пролетом 207 м и высотой 32 м [3, 10]. Купол установлен на высокие, изогнутые наружу как бумеранг колонны, поддерживаемые изнутри в месте перегиба несущими конструкциями трибун. Элементы купольного каркаса выполнены в виде ферм с параллельными поясами. Возводился купол Супердома аналогично предыдущему - с применением установленных в центре и по окружностям высоких временных опор.

Склад Серебрянского цементного завода¹⁷ в Рязанской области (рис. 3, г), построенный в 2013 г. Покрытие склада выполнено в виде двухъярусного купола Шведлера пролетом 102 м и высотой 33 м, установленного на короткие металлические колонны¹⁸. 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.

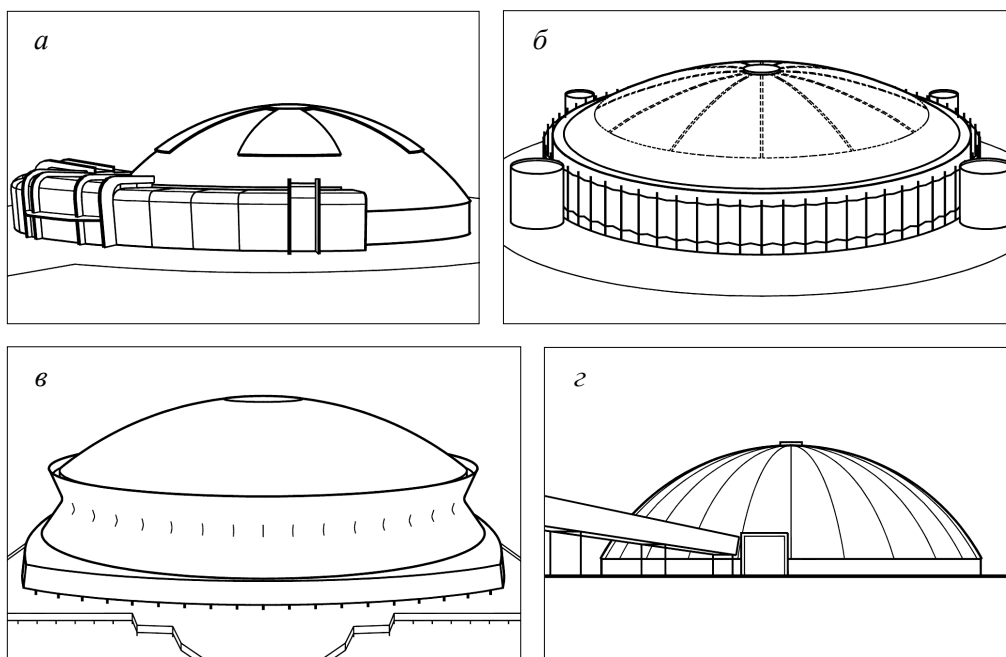


Рис. 3. Здания с купольными покрытиями, при монтаже которых применялись несколько временных опор:

а — аквапарк «Аквасфера» в Донецке; *б* — стадион Астродом в Хьюстоне;
в — стадион Супердом в Новом Орлеане; *г* — склад Серебрянского цементного завода

¹⁵ Superdome. Stadium, New Orleans, Louisiana, United States // Encyclopaedia Britannica. Режим доступа: <https://www.britannica.com/place/Superdome>. Дата обращения: 18.07.2017.

¹⁶ 1975: The Superdome opens in New Orleans // Nola.com. Режим доступа: http://www.nola.com/175years/index.ssf/2011/12/1975_the_superdome_opens_in_ne.html. Дата обращения: 25.03.2017.

¹⁷ Промышленные здания и сооружения. Серебрянский цементный завод // СКАУТ. Инженерно-технический центр. Режим доступа: <http://www.steel-scaut.com/projects-c6c>. Дата обращения: 17.04.2017.

¹⁸ Серебрянский цементный завод // Garant. Конструкторское бюро. Режим доступа: <http://kggarant.com/catalog/500125/index.php>. Дата обращения: 16.04.2017.

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

Торгово-развлекательный центр Глобал Сити¹⁹ в Москве (рис. 4, *а*), построенный в 2007 г. Покрытием основной части ТРЦ служит однопоясной каркас секториально-сетчатого купола (схема Чивитта) пролетом 60 м. Купол опирается на пространственное решетчатое кольцо (четырёхугольного сквозного сечения), установленное на высокие решетчатые колонны²⁰. Сначала с использованием временной центральной опоры устанавливались собранные вместе стержни, расположенные на границах секторов купола (ребра), а остальные элементы монтировались со строительных лесов.

Концертный зал²¹ Москва-Сити (рис. 4, *б*), 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 железобетона²² и поддерживают центральную сетчатую верхушку купола. Покрытие имеет подвижную (трансформирующуюся) оболочку. Монтаж купольного каркаса выполнялся со специальных поддерживающих строительных лесов.

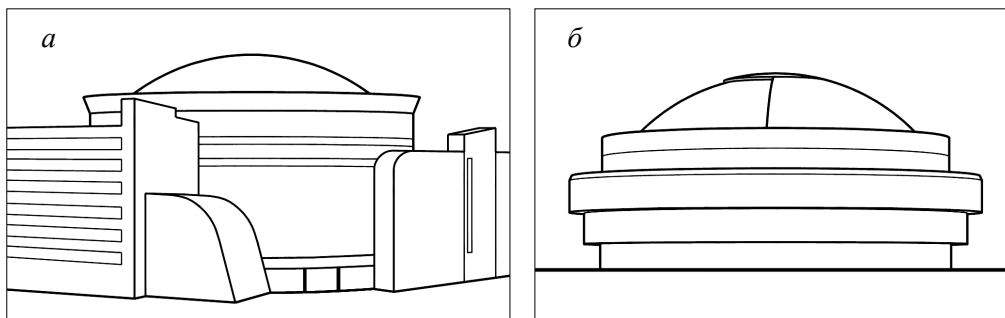


Рис. 4. Здания с купольными покрытиями, при монтаже которых применялись строительные леса:

а — ТРЦ Глобал Сити в Москве; *б* — концертный зал Москва-Сити

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

Покрытия цилиндрических резервуаров для хранения нефти²³ в Нижнем Новгороде (рис. 5, *а*), построенные в 2002 г. Покрытием каждого резервуара служит однопоясной сетчатый купол пролетом 40 м и высотой 8,2 м [11]. Каркас купола выполнен по звездчатой схеме и опирается на кольцо по верху цилиндрической стенки.

Электродепо Московской монорельсовой транспортной системы (рис. 5, *б*), построенное в 2004 г. Покрытием здания трансбордера электродепо

¹⁹ Торгово-развлекательный комплекс «ГЛОБАЛ СИТИ» (построен в 2007 г.) // Строительный эксперт. Режим доступа: <https://ardexpert.ru/project/184/> Дата обращения: 19.10.2017.

²⁰ Купол торгового центра Глобал Сити // Строительная компания «УК Совинтех». Режим доступа: <http://feedevelop.ru/ourdoneprojects/2-building/54-montagkupola>. Дата обращения: 16.04.2017.

²¹ Многофункциональный концертный зал Москва-Сити // Archi.ru. Режим доступа: <https://archi.ru/projects/russia/10241/mnogofunkcionalnyi-koncertnyi-zal-moskva-siti>. Дата обращения: 22.10.2017.

²² Концертный зал // PERI. Объекты культуры и спорта. Режим доступа: <https://www.peri.ru/projects/cultural-buildings/concertnyi-zal-moskva-city.html> Дата обращения: 17.04.2017.

²³ Алюминиевые сетчатые купола резервуаров // ЦНИИПСК им. Мельникова. СТАКО. Режим доступа: <http://www.stako.ru/catalog/32/>. Дата обращения: 18.03.2017.

служит однопоясной сетчатый купол²⁴ пролетом 46 м и высотой 8 м [12]. Каркас купола выполнен по звездчатой схеме. Для подъема полностью собранного на земле каркаса использовались лебедки, закрепленные на опорном контуре, установленном на металлические колонны.

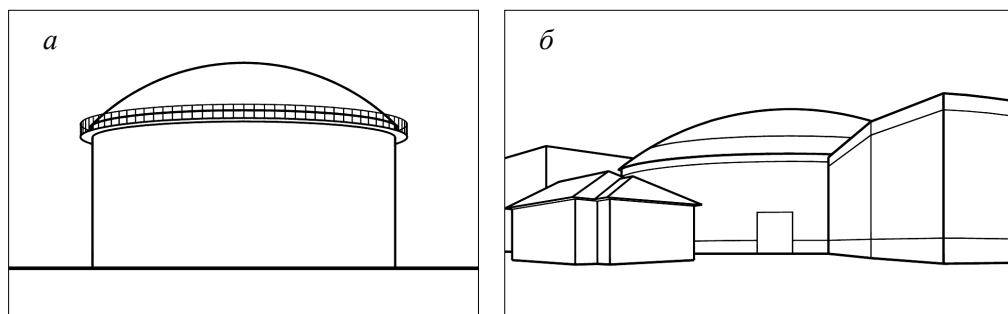


Рис. 5. Здания с купольными покрытиями, монтаж которых производился после сборки на земле:

a — резервуар для хранения нефти; *б* — электродепо Московской монорельсовой транспортной системы

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

Американский павильон (теперь Канадский музей водных экосистем) «Биосфера» в Монреале²⁵ в Канаде (рис. 6, *a*), построенный в 1967 г. и ставший мировой туристической достопримечательностью. Павильон запроектирован Р.Б. Фуллером как геодезический купол [8] в виде усеченной сферы двухсетчатого вида²⁶ диаметром 76 м и высотой 62 м. Внутри сферы расположены несколько здания и сооружений. Р.Б. Фуллером разработано большое количество построенных геодезических сетчатых куполов аналогичного типа.

Испытательный зал для Всесоюзного электротехнического института в г. Истра²⁷ Московской области (рис. 6, *б*), построенный в 1985 г. Сооружение было выполнено в виде двухпоясной сетчатой оболочки по геометрической форме, близкой к усеченному эллипсоиду вращения [13] диаметром 234 м и высотой 112 м. Снаружи была устроена подвижная обслуживающая полуарка. После завершения монтажа купол внезапно обрушился.

Арена «Глобус» (Ericsson Globe Arena) в Стокгольме²⁸ в Швеции (рис. 6, *в*), построенная в 1989 г. Покрытие арены представляет собой двухпоясной купол в виде полусферы²⁹ 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

²⁴ Купол электродепо Московской монорельсовой транспортной системы // ЦНИИПСК им. Мельникова. СТАКО. Режим доступа: <http://www.stako.ru/catalog/109/> Дата обращения: 14.03.2017.

²⁵ Канада, Монреаль: Биосфера... // Turj. Мировые достопримечательности. Режим доступа: <http://turj.ru/blog/history/2014.htm> Дата обращения: 20.04.2017.

²⁶ Photos of the construction of Buckminster Fuller's Geodesic dome, the US pavilion at Expo 67, Montreal // MCM DAILY. Bucky Gallery. Режим доступа: <https://www.mcmdaily.com/gallery/bucky/> Дата обращения: 19.03.2017.

²⁷ Величайший «Купол» науки из Истры // SE7EN Solution. Режим доступа: <https://se7en.ws/velichayshiy-kupol-nauki-iz-istry/> Дата обращения: 18.04.2017.

²⁸ Bulles Architecture — (1986—1989) Ericsson Globe Arena Stockholm (Suède) // BubbleMania.fr. Режим доступа: <http://bubblemania.fr/en/bulles-architecture-1986-1989-ericsson-globe-arena-stockholm-suede/> Дата обращения: 30.04.2017.

²⁹ Steel Frames — Stockholm Globe Arena. Режим доступа: http://www.stbk.se/stalstommar_globeneng.html. Дата обращения: 20.10.2017.

друг с другом кольцевыми элементами. Снаружи к куполу прикреплены меридиональные рельсы для подъема двух обзорных сферических кабин.

Склады для хранения сыпучего сырья³⁰ (известняка, угля, шлака и др.) (рис. 6, *з*), разрабатываемые с 90-х годов прошлого века американской компанией Geometrica и во множестве возведенные в разных странах мира. Каркасами складов служат двухсетчатые купола в виде стержневых систем с безраскосной решеткой между поясами³¹. Металлические купола опираются непосредственно на фундаменты. Компанией Geometrica разработаны купольные каркасы разных размеров пролетом 70—130 м и высотой 20—39 м.

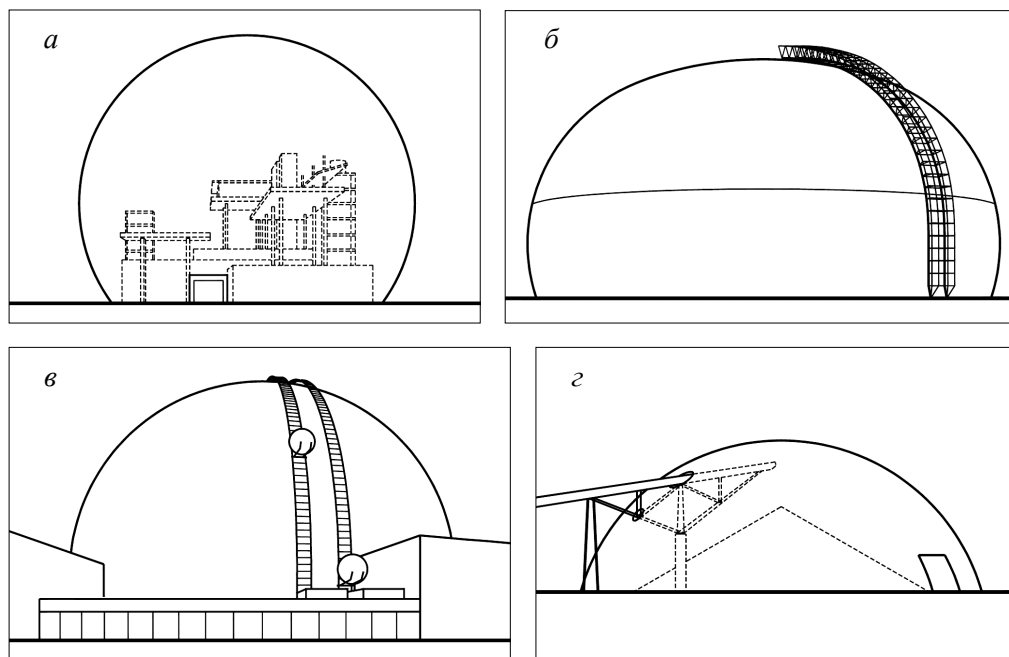


Рис. 6. Здания с купольными покрытиями, монтаж которых производился навесным способом:

а — биосфера Фуллера в Монреале; *б* — купол в Истре Московской области;
в — Глобус-Арена в Стокгольме; *з* — склад для сыпучего сырья Geometrica

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**:

³⁰ Environmental Know-How: Covering Existing Stockpiles // Geometrica. News and blog. Режим доступа: <http://geometrica.com/en/covering-existing-stockpiles> Дата обращения: 01.04.2017.

³¹ Limestone Storage Domes // Geometrica Articles. Режим доступа: <http://articles.geometrica.com/579.html> Дата обращения: 01.04.2017.

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

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

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

– 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.

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

© Лебедь Е.В., Алукаев А.Ю., 2017

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. *Липницкий М.Е.* Купола. Расчет и проектирование. Л. : Стройиздат, 1973. 129 с.
2. *Тур В.И.* Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности. М. : Изд-во АСВ, 2004. 96 с.
3. Металлические конструкции : справочник проектировщика : в 3-х т. / под общ. ред. В.В. Кузнецова. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений. М. : Изд-во АСВ, 1998. 512 с.
4. *Энгель Х.* Несущие системы / пер. с нем. Л.А. Андреевой. М. : АСТ : Астрель, 2007. 344 с.
5. *Торкатюк В.И.* Монтаж конструкций большепролетных зданий. М. : Стройиздат, 1985. 170 с.
6. *Гофштейн Г.Е., Ким В.Г., Ницев В.Н., Соколова А.Д.* Монтаж металлических и железобетонных конструкций. М. : Стройиздат, 2004. 528 с.
7. *Гохарь-Хармандарян И.Г.* Большепролетные купольные здания. М. : Стройиздат, 1978. 150 с.
8. *Кривошапко С.Н.* Металлические ребристо-кольцевые и сетчато-стержневые оболочки XIX – первой половины XX-го веков // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 6. С. 4—15.
9. *Louis O. Bass, A.M.* Unusual Dome awaits Baseball Season in Houston // Civil Engineering. January 1965. Vol. 35. No 1. P. 63—65.
10. *Thor L. Anderson.* Le stade couvert polyvalent "Louisiana Superdome" à la Nouvelle-Orléans (Etats-Unis) // Acier. Mars 1974. Vol. 39. No 3. P. 113—119.
11. *Ружанский И.Л.* Алюминиевый купол для резервуара диаметром 40 м // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2002. № 7. С. 10—16.
12. *Ружанский И.Л.* Опыт проектирования и сооружения сетчатых куполов // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2005. № 11. С. 22—26.
13. Металлические конструкции: Справочник проектировщика / под ред. Н.П. Мельникова. М. : Стройиздат, 1980. 776 с.

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 8 октября 2017

Дата принятия к публикации: 24 ноября 2017

Об авторах:

Лебедь Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). *Научные интересы:* большепролетные металлические купольные покрытия — схемы каркасов, конструкции элементов, способы возведения, точность сборки, компьютерное моделирование монтажа, исследование погрешностей и начальных усилий, оценка напряженно-деформированного состояния. *Контактная информация:* e-mail: evglebed@mail.ru

Алукаев Айса Юнирович, аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). *Научные интересы:* напряженно-деформированное состояние большепролетных металлических куполов. *Контактная информация:* e-mail: alukaevisa@gmail.com

Для цитирования:

Лебедь Е.В., Алукаев А.Ю. Большепролетные металлические купольные покрытия и их возведение // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 1. С. 4—16. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-1-4-16.

LARGE-SPAN METAL DOME ROOFS AND THEIR CONSTRUCTION

E.V. LEBED, A.U. ALUKAEV

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)
26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

The article presents the main types of geometrical and structural systems of steel frameworks of metal dome roofs. Based on the geometrical system, three main types of metal domes can be specified: ribbed domes, ribbed domes with rings, and lattice domes. Lattice domes can be cyclically symmetrical with repeating sectorial patterns, or geodesic, that are based on geodesic polyhedrons, inscribed in a sphere. Based on the structural system, the frameworks of ribbed domes can have single chord or double chord ribs. Geometric system of the framework of a large-span metal dome governs the method of its erection which in its turn defines the structural solutions for the elements of the framework and the sequence of their assembly. The paper describes the following methods of erection of large-span domes: erection by crane from the ground with temporary supports, placement of the complete structure or large elements of the dome, and cantilever erection. The examples of large-span metal domes built in different countries of the world are reviewed with respect to the method of construction used. General characteristics of the structural system of the framework of each dome are presented. The examples are used to demonstrate that the method of construction of a large-span metal dome roof is dependent on the geometric system of its framework.

It is noted that metal domes are widely used as structural solutions for roofs of buildings of different types. It is noted that erection with temporary supports of different types, or ground assembly are mostly used for the construction of relatively low double layer domes, or high single-layer domes. For large-span double-layer metal domes of considerable high the method of cantilever erection is usually preferred.

Keywords: *large-span metal dome, geometric systems of domes, structural systems of domes, metal structures, construction methods, assembly of structures*

References

1. Lipnizkiy, M.E. (1973). *Kupola. Raschet i proektirovanie [Domes. Calculation and Design]*. Leningrad: Stroyizdat publ. (In Russ.).
2. Tur, V.I. (2004). *Kupol'nye konstruksiyi: formoobrazovanie, raschet, konstruirovaniye, povysheniye Effektivnosti [Dome Structures: Morphogenesis, Analysis, Design, Increase In Effectiveness]*. Moscow: ASV publ. (In Russ.).
3. Kuznetsova, V.V., Ed. (1998). *Metallicheskie konstruksii. [Metal Structures]*. Vol. 2. *Stal'nye konstruksii zdaniy i sooruzheniy. Spravochnik proektirovshchika [Steel structures of buildings and constructions. Reference book the designer]*. Moscow: ASV publ. (In Russ.).
4. Engel, H. (2006). *Tragsysteme = Structure Systems*. Hatje Cantz, Ostfildern.
5. Torkatyuk, V.I. (1985). *Montazh konstrukziy bol'sheproletnyh Zdaniy [Installation of Structures of Large-Span Buildings]*. Moscow: Stroyizdat publ. (In Russ.).
6. Gofshteyn, G.E., Kim, V.G., Nishchev, V.N., Sokolova, A.D. (2004). *Montazh metallicheskikh i zhelezobetonnykh konstrukziy [Installation of Metal and Reinforced Concrete Structures]*. Moscow: Stroyizdat publ. (In Russ.).
7. Gokhar'-Harmadaryan, I.G. (1978). *Bol'sheproletnye kupol'nye zdaniya [Wide-Span Dome Buildings]*. Moscow: Stroyizdat publ. (In Russ.).
8. Krivoshapko, S.N. (2014). Metal ribbed-and-circular and lattice shells from the XIXth until the first half of the XXth centurie. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (6), 4—15. (In Russ.).
9. Louis, O. Bass, A.M. (January 1965). Unusual Dome awaits Baseball Season in Houston. *Civil Engineering*, 35(1), 63—65.
10. Thor L. Anderson. (1974). Le stade couvert polyvalent "Louisiana Superdome" à la Nouvelle-Orléans (Etats-Unis). *Acier*, 39(3), 113—119. (in French).
11. Ruzhansky, I.L. (2002). Aluminiyeviy kupol dlya rezervuara diametrom 40 m [Aluminum dome for the tank with a diameter of 40 m]. *Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve [Construction and Special Works in Civil Engineering]*, (7), 10—16. (In Russ.).
12. Ruzhansky, I.L. (2005). Opyt Proektirovaniya i Sooruzheniya Setchatyh Kupolov [Experience of design and construction of mesh domes]. *Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve [Construction and Special Works in Civil Engineering]*, (11), 22—26. (In Russ.).
13. Mel'nikov, N.P., red. (1980). *Metallicheskie Konstruksii. Spravochnik Proektirovshchika [Metal Structures. Reference Book of a Designer]*. Moscow: Stroyizdat Publ. (In Russ.).

Article history:

Received: October 8, 2017 Revised: November 21, 2017

Accepted: November 24, 2017

About the authors:

Evgeny V. Lebed, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Metal and Wooden Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU). *Scientific interests*: large-span metal dome roofs – geometric systems, structural systems, methods of construction, accuracy of assembly, computer simulation of mounting, research of assembly errors and initial internal forces, assessment of the stress-strain state. *Contact information*: e-mail: evglebed@mail.ru

Aysa U. Alukaev, Postgraduate student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU). *Scientific interests*: the stress-strain state of large-span metal domes. *Contact information*: e-mail: alukaevisa@gmail.com

For citation:

Lebed, E.V., Alukaev, A.U. (2018). Large-span metal dome roofs and their construction. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(1), 4—16. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-1-4-16.