

УДК 624.074.2:624.014:693.8  
DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-6-481-494

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Особенности работы каркасов большепролетных металлических куполов в процессе их возведения

Е.В. Лебедь

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

(поступила в редакцию: 12 августа 2018 г.; доработана: 05 октября 2018 г.; принята к публикации: 16 октября 2018 г.)

**Цели.** Дать характеристику процессу формирования каркасов большепролетных металлических куполов при их возведении. Выполнить анализ работы конструкций при монтаже купольных каркасов по расчетным схемам, отличающимся от проектной, из-за чего в их конструктивных элементах возникают монтажные усилия. Привести геометрические схемы купольных каркасов (ребристых, ребристо-кольцевых и сетчатых) и принципы их образования. Показать, как образуются сетчатые купольные каркасы, и объяснить, почему они являются пространственными стержневыми системами. Описать особенности конструктивных решений однопоясных и двухпоясных купольных каркасов. Отметить, что технологическая схема монтажа конструкций большепролетных металлических куполов зависит от конструктивного решения и способа возведения их каркасов. Вкратце охарактеризовать различные способы возведения каркасов большепролетных металлических куполов и количество применяемых при этом временных опор и механизмов.

**Обзор.** Принципиально различные способы возведения, как реально примененные, иллюстративно показаны на примерах нескольких конкретных известных купольных сооружений мира. Дана оценка влияния каждого способа на работу конструкций в процессе монтажа. Описан характер работы отдельных конструкций и каркаса в процессе возведения большепролетных металлических куполов. Сделан акцент на существенные различия в характере работы конструктивных систем купольных каркасов при разных способах их монтажа.

**Исследование.** Разработаны компьютерные модели однопоясных металлических куполов из стальных двутавров с жесткими сопряжениями в узлах. Созданы дополнительные модели неполного каркаса для исследования различных способов монтажа куполов. Для каждой монтажной модели купольного каркаса выполнены компьютерные расчеты на действие собственного веса. В результате расчетов определены напряжения в конструктивных элементах каркасов, которые сравнивались с напряжениями соответствующих элементов на действие собственного веса в каркасе проектной схемы.

**Результаты.** Сделан вывод о неизбежности появления напряжений в элементах каркасов большепролетных металлических куполов при их возведении. Отмечена необходимость обязательных расчетов каркасов на монтажные состояния при проектировании большепролетных металлических куполов.

**Ключевые слова:** большепролетные купола, металлические каркасы, геометрические схемы, конструктивные решения, способы возведения, монтаж конструкций, компьютерная модель, напряжения в элементах

### Введение

Каркасы большепролетных металлических куполов образуют пространственные стержневые системы. Это способствует повышению жесткости и надежности купольных покрытий при их эксплуатации. Однако каркасы таких систем не появляются на месте строительства сразу и целиком. Проектную геометрическую форму они приобретают постепенно, в течение длительного времени, что в итоге реализуется выразительным внешним

обликом купольного покрытия [1; 2]. В процессе возведения сначала появляются лишь отдельные конструкции купола. Затем эти конструкции объединяются во фрагменты купольных каркасов, которые постепенно увеличиваются путем присоединения других фрагментов, т.е. наращиваются. Завершается монтаж стержневой системы образованием цельного купольного каркаса проектной формы. Монтаж сопровождается появлением и исчезновением со временем вспомогательных конструкций, поддерживающих отдельные конструк-

ции или фрагменты каркасов куполов, которые называют временными опорами [3]. Временные опоры могут оставаться вплоть до полного завершения монтажа как купольного покрытия, так и всех конструкций между постоянными опорами (стенowego каркаса). Это характерно для процесса возведения каркасов всех большепролетных металлических куполов.

Купольные каркасы в процессе возведения собираются из большого количества элементов, по-разному ориентированных в пространстве, а также зачастую имеющих разное конструктивное решение (или поперечное сечение). Конструктивная сложность купольных каркасов и способ их возведения во многом зависят от геометрической схемы их стержневых систем, размеров пролета и высоты.

Каркасы металлических куполов по геометрической схеме могут быть ребристыми, ребристо-кольцевыми и сетчатыми [4]. Ребристые купола состоят из меридиональных ребер, установленных на опорное (нижнее) кольцо и объединенных в вершине соединительным (верхним) кольцом (рис. 1, а). В ребристо-кольцевых куполах между нижним и верхним кольцами меридиональные ребра опоясываются регулярно установленными промежуточными кольцами (рис. 1, б). Благодаря им эффект пространственной совместной работы элементов каркаса возрастает. В четырех осесимметричных секторах этих куполов во всех четырехугольных ячейках, образованных ребрами и промежуточными кольцами (или кровельными прогонами), устанавливаются связи крестового вида. Благодаря этим связям в купольных каркасах повышается пространственная жесткость и сопротивляемость изгибно-крутильному виду деформации от внешних нагрузок.

Если крестовые связи, которые работают на растяжение, установлены в каждой четырехугольной ячейке каркаса ребристо-кольцевого купола, то такая геометрическая схема называется куполом Шведлера (рис. 1, в). Поскольку весь купольный каркас состоит из треугольных ячеек, он становится неизменяемым в своей собственной условной оболочке, что придает куполу повышенную пространственную жесткость.

Каркасы сетчатых по геометрической схеме куполов разбивают собственную условную оболочку на треугольные ячейки, что обеспечивает геометрическую неизменяемость образуемой ими пространственной стержневой системы. В отличие от купола Шведлера в таких каркасах нет специальных стержней, работающих только на растя-

жение. В сетчатых каркасах, в отличие от предыдущих, размеры ячеек в вершине и у основания куполов незначительно отличаются друг от друга. По принципу геометрического построения каркасы сетчатых металлических куполов разделяют на осесимметричные и геодезические.

В осесимметричных сетчатых куполах геометрическая схема каркасов характеризуется повторяемостью явных (как купол Шведлера) или условных секторов и ячейками разных размеров от контура к середине. Наибольшее распространение среди сетчатых осесимметричных купольных каркасов получили звездчатый (схемы Фёпля – рис. 1, з) и секториально-сетчатый (схемы Чивитта – рис. 1, д), имеющие выраженные кольцевые элементы.

Геометрические схемы каркасов геодезических куполов получают из вписанных в сферу многогранников с правильными треугольниками, пятиугольниками и шестиугольниками (схема Фуллера – рис. 1, е). Вершины многогранников 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.

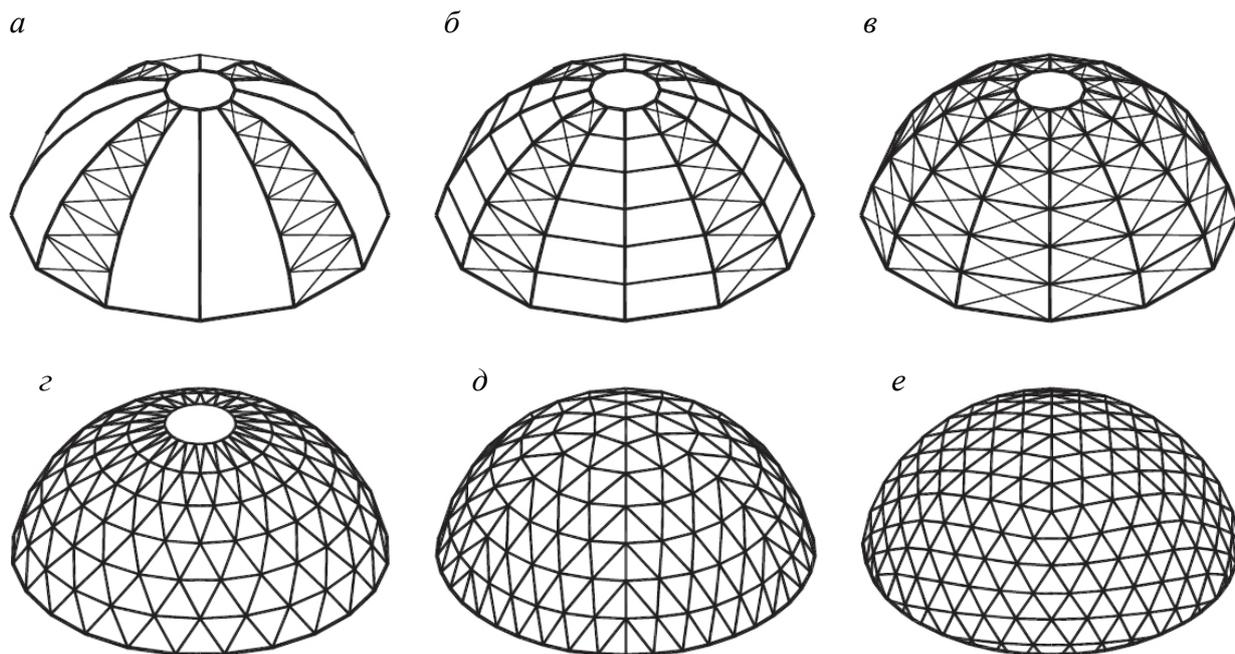
Создаются и комбинированные геометрические схемы каркасов. В ребристо-кольцевых куполах количество ребер может уменьшаться в верхней части купола или чередоваться по ярусам ребристо-кольцевая схема со схемой Шведлера. Ребристо-кольцевой каркас купола может также сочетаться с сетчатым куполом. Возможно также применение различных геометрических схем построения осесимметричных сетчатых куполов в нижней части и у вершины, изменение кольцевой регулярности ячеек сетчатых куполов по высоте, а также геометрической формы ячеек у основания и вершины.

Каркасы одинаковых геометрических схем ребристо-кольцевых и сетчатых куполов могут отличаться друг от друга конструктивными решениями. Наиболее важным из них является количество поясов. По этому конструктивному признаку купола могут быть одноярусными и двухярусными, если речь идет о ребристых и ребристо-кольцевых куполах, и односетчатыми и двухсетчатыми, если описываются сетчатые купола. Стержневые элементы одноярусных ребристых и ребристо-кольцевых куполов, так же как и односетчатых купольных каркасов, работают в основном на сжатие с изгибом в нормальном по отношению к своей условной оболочке направ-

лении. Поэтому сечения элементов их каркасов обычно назначают двутавровыми. Элементы каркасов двухъярусных ребристых и ребристо-кольцевых куполов проектируют решетчатыми, в виде ферм с параллельными поясами, стержни которых работают на продольные усилия. По этой причине их назначают из прокатного профильного металла – парных уголков, труб, швеллеров и др.

В двухсетчатых купольных каркасах поясные стержни могут быть расположены непосредственно друг над другом или со смещением на поло-

вину ячейки сетки. В первом случае двухсетчатый каркас куполов будет аналогичен односетчатому, в котором элементы каркаса проектируют в виде ферм с параллельными поясами и треугольной решеткой. Во втором случае двухсетчатый каркас купола становится похожим на структурные конструкции с треугольными ячейками. Оба варианта двухсетчатых купольных каркасов представляют собой многосвязные пространственные стержневые системы, и проектируют их в основном из труб.



**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  
**[Figure 1. Geometrical schemes of frames of metal domes:**  
*a* – ribbed dome; *б* – ribbed-rings dome; *в* – Schwedler dome;  
*г* – star-lattice dome; *д* – sectoral-lattice dome; *е* – geodesic dome]

Большое значение для конструирования и расчета имеет способ сопряжения стержневых элементов купольных каркасов между собой. Стержневая система в одноярусных ребристо-кольцевых и односетчатых куполах для сохранения геометрической неизменяемости и пространственной жесткости должна иметь в нормальном к условной оболочке направлении жесткие узловые сопряжения. В то же время в плоскостях своих ячеек (касательных к условной оболочке) соединения стержней в односетчатых куполах могут быть выполнены шарнирными. В ребристо-кольцевых куполах в касательных плоскостях применяют примыкающие шарниры для кольцевых стержней и в сопряжении

меридиональных ребер с опорным и верхним кольцами. В двухъярусных ребристо-кольцевых куполах элементы каркаса представляют собой плоские фермы, т.е. геометрически неизменяемые конструкции в нормальных плоскостях. Вследствие чего соединения стержней в них выполняют шарнирными. В касательных к купольной оболочке направлениях их также делают шарнирными. В двухсетчатых куполах образуются решетчатые объемные фермы в каждом повторяющемся по всей оболочке фрагменте каркаса. Поэтому и в нормальном к условной оболочке купола направлении, и в касательных направлениях сопряжения стержней выполняются шарнирными.

Характер монтажа конструкций большепролетных металлических куполов зависит от конструктивного решения и способа возведения их каркасов. Способ возведения металлических куполов выбирается исходя из размеров конструктивных частей каркасов или их отдельных элементов и их способности воспринимать монтажные нагрузки. Учитываются также возможности применяемых подъемно-транспортных машин или заменяющих их механизмов. Из-за того, что купольные каркасы в целом являются многосвязными пространственными стержневыми системами, их возведение представляет собой технически сложную задачу. Необходимо уже в процессе проектирования выбрать способ возведения, разработать схему последовательности монтажа конструкций, по возможности использовать укрупнительную сборку на земле и назначить вид сопряжения отдельных элементов каркаса между собой.

Поскольку купольные каркасы формируются постепенно, а реальные конструкции в большепролетных металлических куполах обладают значительным собственным весом, возникает необходимость их относительно долговременного фиксирования в пространстве. Это достигается тем, что в процессе возведения куполов отдельные их конструкции или фрагменты каркасов устанавливаются на временные опоры или прикрепляются к ранее смонтированной части купола. И в одном, и в другом случаях монтажная расчетная схема работы конструкций или фрагментов купольных каркасов отличается от работы в составе полностью смонтированного каркаса проектной расчетной схемы. Поэтому в процессе возведения куполов в их конструктивных элементах возникают монтажные внутренние усилия, отличающиеся от усилий в элементах каркасов проектных схем. Монтажные усилия в элементах каркаса не только при разных способах возведения куполов, но и на разных его стадиях отличаются друг от друга. При этом значительное влияние на величины и характер этих усилий оказывает как способ возведения купольного каркаса, так и вид монтажных сопряжений его элементов.

Возведение большепролетных металлических куполов выполняется одним из следующих способов [3–5]: с временной центральной опорой, центральной и несколькими промежуточными временными опорами, со сплошных строительных лесов, сборка на земле с последующим подъемом, монтаж навесным способом и комбинированный монтаж. Временная центральная опора устанавливается на оси вращения образующей купольной оболочки под верхним кольцом ребристо-кольцевого

купола или аналогичной ему стержневой части сетчатого купола. При монтаже с несколькими промежуточными временными опорами на равном расстоянии от центральной (по окружности) устанавливаются еще ряд опор [6]. Таких рядов может быть несколько, а их разбивочные оси напоминают концентрические окружности вокруг центральной опоры. Если каркас собирается на земле, то поднимают его на проектную высоту при помощи подъемных кранов или специальных механизмов (лебедок), прикрепленных к опорному контуру и работающих синхронно. При навесном монтаже отдельные фрагменты стержневого купольного каркаса размером с одну или несколько ячеек сетки устанавливаются последовательно по верхней границе части возведенного купольного каркаса. Непременным условием навесного монтажа является замкнутость контура каркаса в процессе возведения купола.

При любом способе возведения купола собираются из отдельных конструкций или из монтажных частей каркасов разной степени укрупнения. Их надо поднимать, перемещать в пространстве и устанавливать в проектное положение. При монтаже большепролетных металлических куполов как отдельными конструкциями, так и фрагментами каркасов применяются башенные подъемные краны, передвигающиеся по рельсам, и самоходные стреловые краны на гусеничном или колесном ходу [3; 5; 7]. Высота башенного крана или длина стрелы гусеничного, как и их грузоподъемность, зависят от размеров куполов и степени укрупнения монтажных фрагментов каркаса. В случае применения временной центральной опоры на ней может быть установлена поворотная стрела башенного крана или поворотная Г-образная часть козлового крана.

## Обзор

С временной центральной опорой возводилась арена «Колизей» в Шарлотте (США, 1955 г.). Покрытием «Колизея» служит однопоясной ребристо-кольцевой купол пролетом 100 м и высотой 16,4 м [8]. Гибкие крестовые связи устанавливались в каждой ячейке, что делает его близким к куполу Шведлера. Меридиональные ребра из двутавров при монтаже устанавливались на опорное кольцо по верху высоких, наклоненных наружу колонн и на решетчатую мачту в центре (рис. 2). Очевидно, что при возведении каркаса ребра работали как двутавровые арки с опорами на разных по высоте уровнях.

С временной центральной опорой возводилась и «Арена-Север» в Красноярске (2011 г.). Покры-

тием арены служит двухпоясной ребристый купол пролетом 80 м [9]. Меридиональные ребра купола выполнены из плоских решетчатых полуарок в виде ферм с параллельными поясами (общего ломаного очертания) и треугольной решеткой. Полуарки попарно (через сектор) объединены между собой полураскосными связями в уровнях поясов по всей высоте купола. Каркас купола опирается на металлические колонны (рис. 3), которые в оголовках опоясаны опорным кольцом сплошного сечения. При возведении каркаса ребра работали как решетчатые пространственные арки с опорами в разных уровнях.

С центральной и несколькими рядами вокруг нее временных опор возводился стадион для бейсбола и американского футбола «Астродом» (Astrodome) в Хьюстоне (США, 1965 г.). Покрытием «Астродома» служит двухпоясной каркас секториально-сетчатого купола (схема Чивитта) пролетом 196 м и высотой 28,4 м [4; 10]. Купол установлен на высокие вертикальные парные колонны (рис. 4). Каждый из элементов двухсет-

чатого купольного каркаса выполнен в виде фермы с параллельными поясами и треугольной решеткой. Временные опоры в виде решетчатых башен устанавливались под узлами на границах секторов и между ними по двум концентрическим окружностям-рядам и в центре. При возведении каркаса купола отдельные элементы меридионального направления работали как пологие арки с опорами на разных уровнях, а кольцевые элементы работали по балочной схеме.

С центральной и несколькими рядами временных опор вокруг нее возводился и стадион для американского футбола «Супердом» (Superdome) в Новом Орлеане (США, 1975 г.). Покрытием «Супердома» также служит двухпоясной каркас секториально-сетчатого купола (схема Чивитта) пролетом 207 м и высотой 32,2 м [11]. Купол установлен на высокие, изогнутые, как бумеранг, колонны, поддерживаемые конструкциями трибун. По геометрической схеме, конструктивному решению и способу возведения этот купольный каркас аналогичен «Астродому» в Хьюстоне.

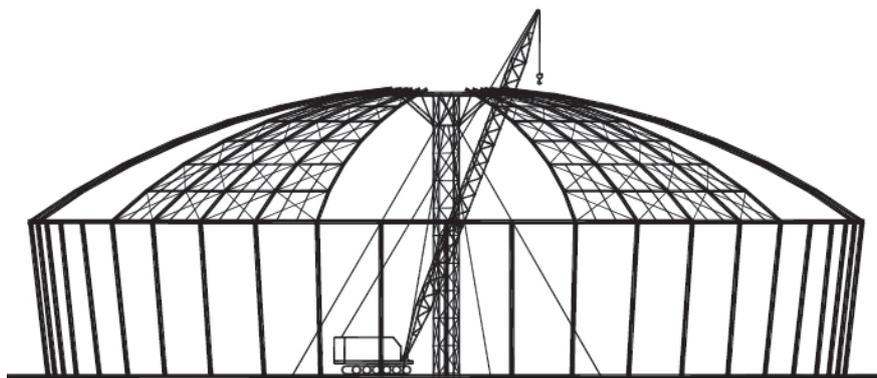


Рис. 2. Монтаж купола «Колизея» в Шарлотте  
[Figure 2. Installation of the Coliseum in Charlotte]

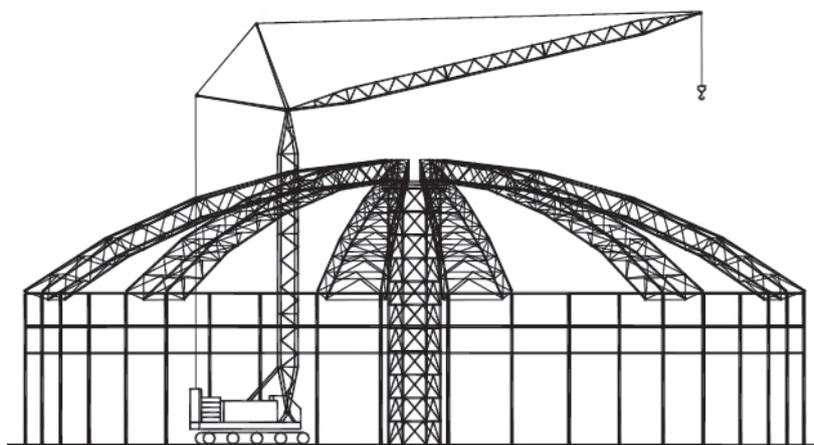


Рис. 3. Монтаж купола «Арена-Север» в Красноярске  
[Figure 3. Installation of the Arena-Sever dome in Krasnoyarsk]

С использованием комбинации строительных лесов и центральной опоры возведен торгово-развлекательный центр «Глобал Сити» в Москве (2007 г.). Покрытием основной части центра служит однопоясной каркас секториально-сетчатого купола (схема Чивитта) пролетом 60 м [12]. Купольный каркас опирается на пространственное решетчатое кольцо (четырёхугольного сквозного сечения), установленное на высокие решетчатые колонны (рис. 5). Все стержневые элементы выполнены из труб. Сначала с использованием временной центральной решетчатой опоры в виде башни устанавливались ребра купола на границах секторов, а остальные элементы монтировались со строительных лесов. Ребра на границах секто-

ров работали как арки с опорами на разных уровнях. Стержни в пределах каждого сектора работали как балки с опорами в узлах.

Сборкой купольного каркаса на земле с последующим подъемом его на проектную высоту производилось возведение покрытия электродепо Московской монорельсовой транспортной системы (2004 г.). Покрытием трансбордера электродепо служит однопоясной сетчатый купол пролетом 46 м и высотой 8 м [13; 14]. Купол выполнен по звездчатой схеме с изменением регулярности в верхней части. Каркас купола собирался на земле из двутавров, а затем поднимался при помощи лебедок, закрепленных на опорном контуре, установленном на металлические колонны (рис. 6).

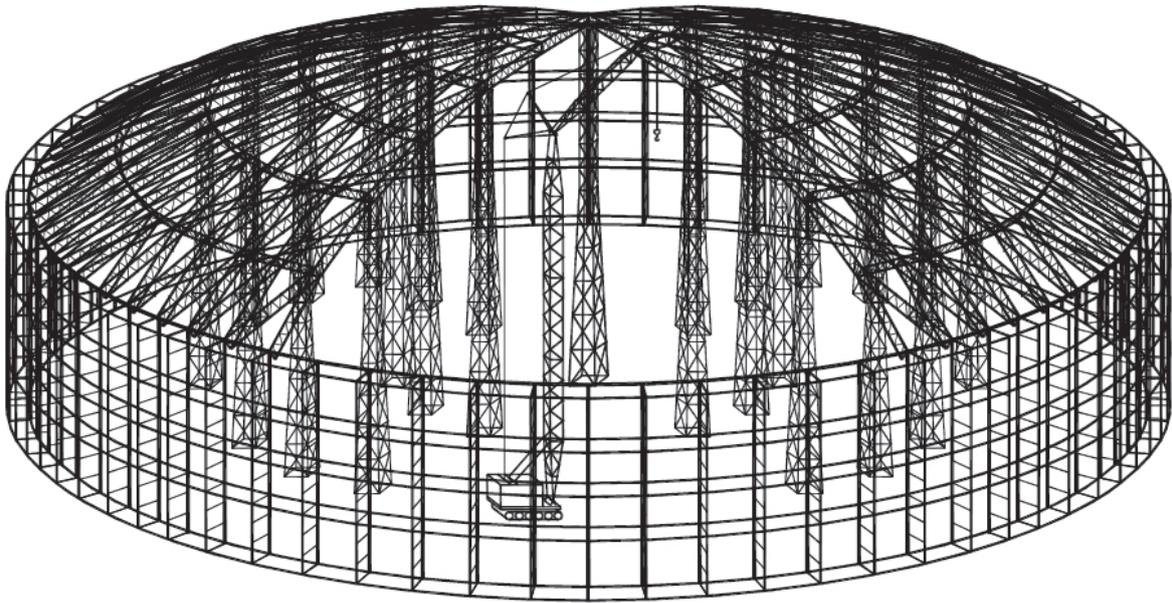


Рис. 4. Монтаж купола стадиона «Астродом» в Хьюстоне  
[Figure 4. Installation of the AstroDome Stadium dome in Houston]

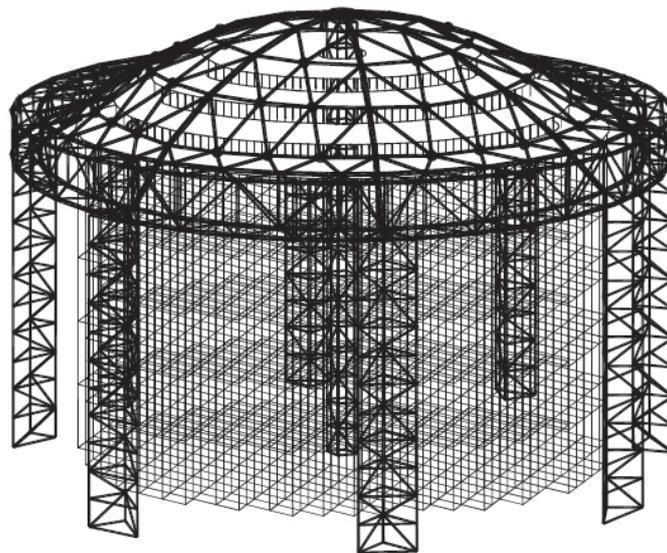
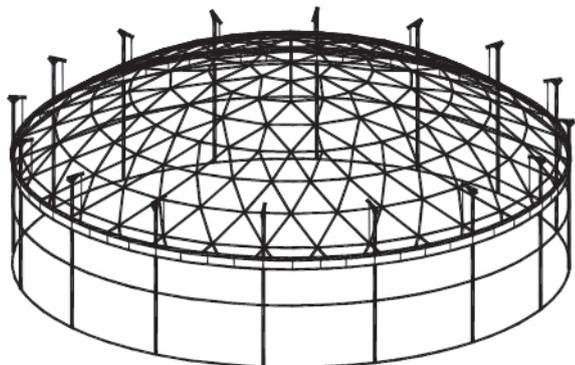


Рис. 5. Монтаж купола ТРЦ «Глобал Сити» в Москве  
[Figure 5. Installation of the dome of the Global City Shopping Mall in Moscow]

В процессе подъема каркаса купола электродепо характер его работы был в определенной степени аналогичен проектной схеме, только опорой служил лишь каждый второй узел контура (половина от проектной схемы).

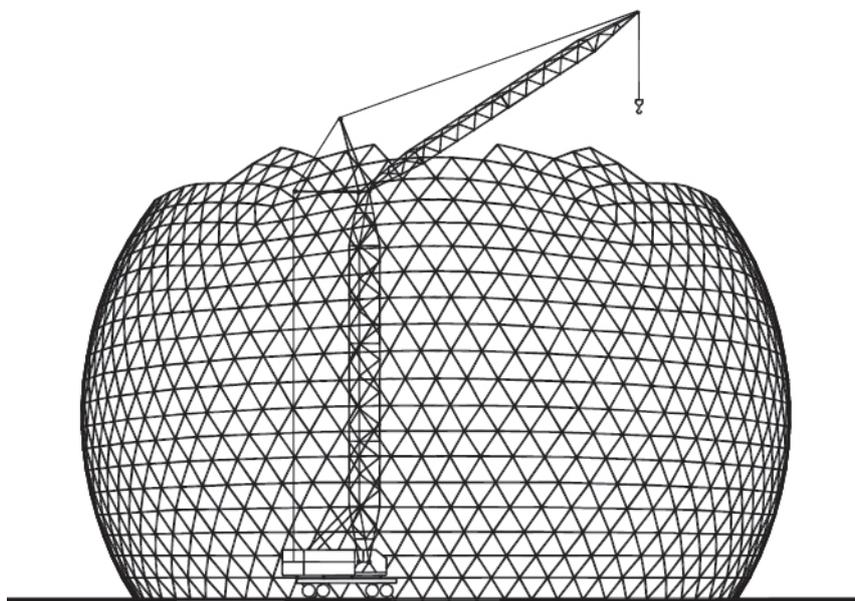


**Рис. 6. Монтаж купола электродепо Московской монорельсовой транспортной системы**  
[Figure 6. Installation of the Depot dome Moscow monorail transport system]

Монтаж купольного каркаса навесным способом применялся для американского павильона «Биосфера» (сейчас – Канадский музей водных

экосистем) в Монреале (Канада, 1967 г.), который стал знаменитой достопримечательностью. Павильон запроектирован Р.Б. Фуллером как геодезический купол в виде усеченной сферы двухсетчатого вида диаметром 76 м и высотой 62 м [15; 16] (рис. 7). Сетка каркаса снаружи купола имеет треугольные ячейки, а внутри – шестиугольные. Все стержни купола выполнены из труб. Р.Б. Фуллером разработано большое количество геодезических сетчатых куполов аналогичного вида и других типов, включающих пологие купола.

Навесной монтаж монреальского купола не предусматривал использования временных опор и производился стержневыми фрагментами размером до двух шестиугольных ячеек (внутренней сетки). Подобным образом осуществлялось равномерное наращивание купольного каркаса по всему контуру. Такой монтаж приводит к наиболее сложному процессу преобразования стержневой пространственной системы купольного каркаса от опорного контура до полной завершенности. В этом процессе возведения непрерывно меняются монтажные схемы работы стержневой системы, воспринимающие собственный вес.



**Рис. 7. Монтаж купола павильона «Биосфера» Р.Б. Фуллера в Монреале**  
[Figure 7. Installation of the dome of the Biosphere pavilion by R.B. Fuller in Montreal]

### Исследование

С целью выяснения характера напряженно-деформированного состояния и величин внутренних монтажных усилий в стержнях металлических купольных каркасов автором были

выполнены специальные компьютерные исследования [17]. Исследования проводились на компьютерных моделях купольных каркасов как пространственных стержневых систем в программе SCAD [18]. Объектами исследования служили однополюсные каркасы ребристо-кольцевого и сектори-

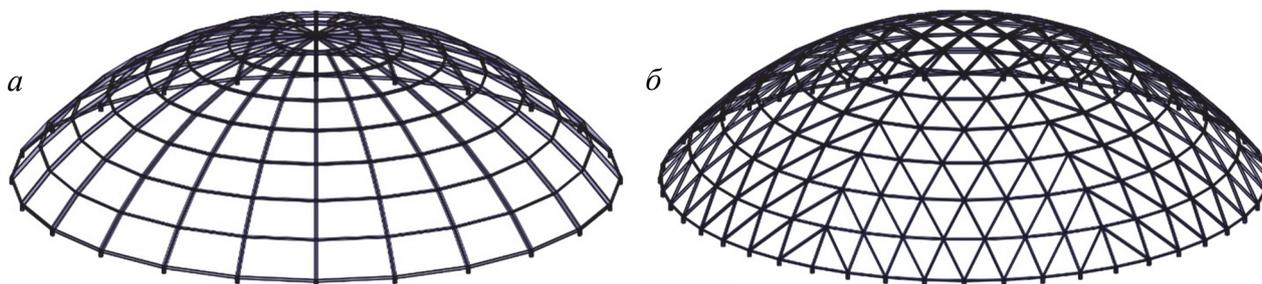
ально-сетчатого куполов, изображенные на рис. 8. Купола сферические, с радиусом кривизны 30 м, пролетом 48,2 м и высотой 12,2 м. Во всех узлах купольных каркасов приняты жесткие сопряжения между стержнями. В ребристо-кольцевом куполе ребра назначены из стального двутавра 35Ш1, кольца – из двутавра 23Ш1. В сетчатом куполе все элементы назначены из стального двутавра 20Ш1. Каркасы куполов опираются на короткие стойки из стальных труб через шарнирные сопряжения.

Была рассмотрена определенная промежуточная стадия возведения при разных способах монтажа. Для каждого из них создавалась отдельная расчетная модель (монтажная схема) купольного каркаса [17]. Для ребристо-кольцевого купола исследованы три схемы монтажа: с центральной и 3 рядами промежуточных опор, центральной и 1 рядом промежуточных опор, только с центральной опорой. Центральная опора поддерживает усиленное радиальными стержнями верхнее кольцо, к которому крепятся меридиональные ребра. Для секториально-сетчатого купола исследованы четыре схемы монтажа: со сплошными лесами, с центральной и 3 рядами промежуточных опор, центральной и 1 рядом промежуточных опор, только с центральной опорой. Центральная опора поддерживает верхний узел или стерж-

невую часть вершины купола, к которым крепятся монтажные элементы или фрагменты сетчатого купола.

Во всех монтажных схемах (моделях) ребристо-кольцевого и секториально-сетчатого куполов условно считалось, что отдельные стержни и фрагменты каркасов в месте сопряжения с временными опорами еще не соединены между собой (рис. 9), но установлены на опоры без возможности смещения. Поэтому сопряжения монтажных стержневых элементов и фрагментов каркасов друг с другом и с временными опорами приняты шарнирными. Сопряжения монтажных стержневых элементов и фрагментов каркаса в местах примыкания к верхнему кольцу или стержневой части вершины купола также приняты шарнирными.

Исследование производилось на основе статического расчета компьютерных моделей каркасов проектной и каждой из монтажных схем промежуточной стадии возведения куполов на действие нагрузки только от собственного веса стержневых элементов. Рассматривалась такая стадия возведения куполов, когда на постоянные и временные опоры установлены стержневые части трех из шести секторов купольных каркасов с круговыми промежутками в один сектор (рис. 10) [17].



**Рис. 8. Исследуемые купольные каркасы:**  
*a* – ребристо-кольцевой купол; *б* – секториально-сетчатый купол  
**[Figure 8. Investigated dome frames:**  
*a* – the ribbed-rings dome; *b* – the sectoral-lattice dome]

В процессе исследования каждого купольного каркаса были получены напряженно-деформированные состояния всех монтажных и проектной схем, которые сравнивались друг с другом. Анализ напряженных состояний этих купольных каркасов производился по нормальным напряжениям в сечениях их конструктивных элементов.

При работе купольных каркасов на собственный вес их элементы находятся под действием продольной силы с изгибом. Причем подавляющее большинство стержневых элементов ис-

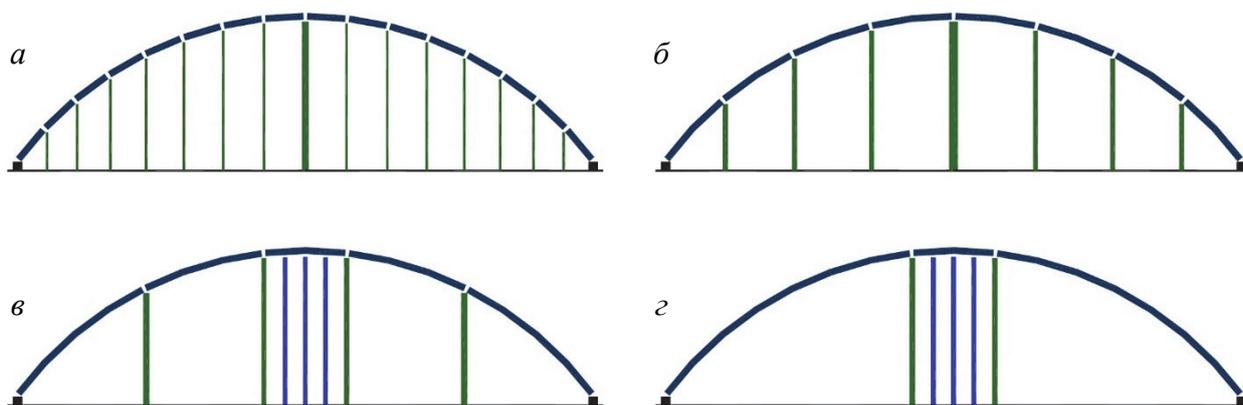
пытывает сжимающие продольные силы, которые и определяют несущую способность куполов. При исследовании вычислялись нормальные напряжения в каждом *i*-ом элементе по формуле

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i} \pm \frac{M_{x,i}}{W_{x,i}} \pm \frac{M_{y,i}}{W_{y,i}} .$$

В качестве критерия оценки принимались напряжения в элементах со сжимающей продольной

силой со стороны сжатых поясов (или сторон сечения) двутавровых элементов купольных каркасов. Исключением являлись элементы с растягивающей продольной силой. В тех случаях, когда сжимающие напряжения в сечении от изгибающих моментов в монтажных схемах оказывались с той же стороны от нейтральной оси двутавро-

вого стержня, что и в проектных схемах, при вычислении  $\sigma_i$  перед соответствующими слагаемыми использовался знак «+», если же с противоположной стороны, то знак «-». Аналогичное правило применялось и при вычислении растягивающих напряжений.

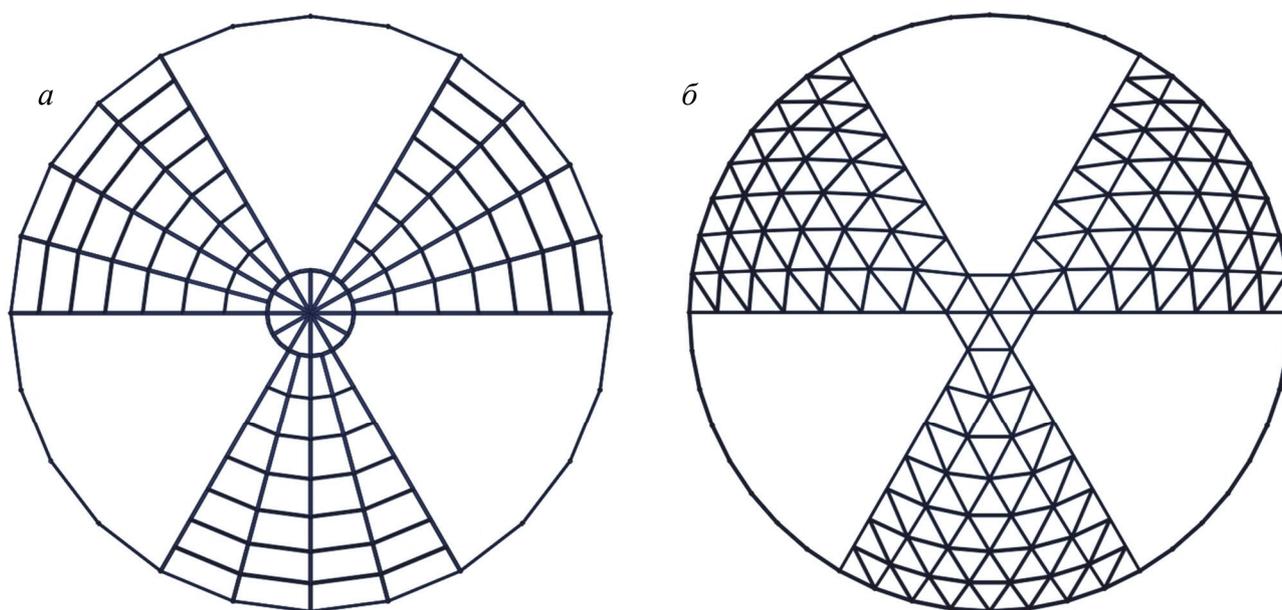


**Рис. 9. Монтажные схемы купольных каркасов:**

*a* – со сплошными лесами; *б* – с центральной и 3 рядами промежуточных опор;  
*в* – с центральной и 1 рядом промежуточных опор

**[Figure 9. Installation schemes of the dome frames:**

*a* – with continuous scaffolding; *б* – with a central support and 3 rows of intermediate supports;  
*в* – with a central and 1 row of intermediate supports; *з* – with a central support]



**Рис. 10. Смонтированные секторы купольных каркасов:**

*a* – ребристо-кольцевой купол; *б* – секториально-сетчатый купол

**[Figure 10. Assembled sectors of the dome frames:**

*a* – the ribbed-rings dome; *б* – the sectoral-lattice dome]

## Результаты

В ребристо-кольцевом куполе стержневые элементы каркаса принадлежат либо ребрам, либо кольцам каркаса. В секториально-сетчатом куполе стержневые элементы расположены по линиям меридионального направления, по диагоналям ячеек (наклонным к меридиональным линиям) и по кольцевым линиям. Условно принято стержневые элементы на границах секторов называть меридиональными, элементы по кольцевому направлению – кольцевыми, а диагональные элементы в ячейках между кольцами – раскосными. Здесь рассмотрены диагональные стержни возле границ секторов.

Напряжения в разных элементах  $\sigma_j$  однотипных конструкций  $j$  каркасов ребристо-кольцевого (элементы ребра или кольца) и секториально-сетчатого (меридиональные, раскосные или кольцевые элементы) куполов как проектных схем, так и монтажных схем имели широкий диапазон значений. Поэтому для анализа напряженных состояний купольных каркасов при различных способах монтажа удобнее сравнивать максимальные по абсолютной величине напряжения одного знака в однотипных элементах  $\sigma_{j,\max}$

с максимальными напряжениями проектной схемы [17].

Однако простое сравнение максимальных напряжений в монтажных схемах с напряжениями в проектной схеме недостаточно четко отражает их значимость для эксплуатационной работы купольных каркасов в целом. Поэтому в данном случае предлагается сравнение отношений максимальных по абсолютной величине напряжений к расчетному сопротивлению стали С245, в результате чего получены зависимости  $\sigma_{j,\max}/R_y$ . Эти зависимости характеризуют степень использования прочности элементов купольных каркасов от действия их собственного веса после завершения монтажа (проектная схема) и на рассматриваемой стадии возведения при различных способах монтажа (монтажные схемы).

На рис. 11 представлены диаграммы степени использования прочности однотипных элементов каркаса ребристо-кольцевого купола в проектной и трех монтажных схемах. На рис. 12 представлены диаграммы степени использования прочности однотипных элементов каркаса секториально-сетчатого купола в проектной и четырех монтажных схемах.

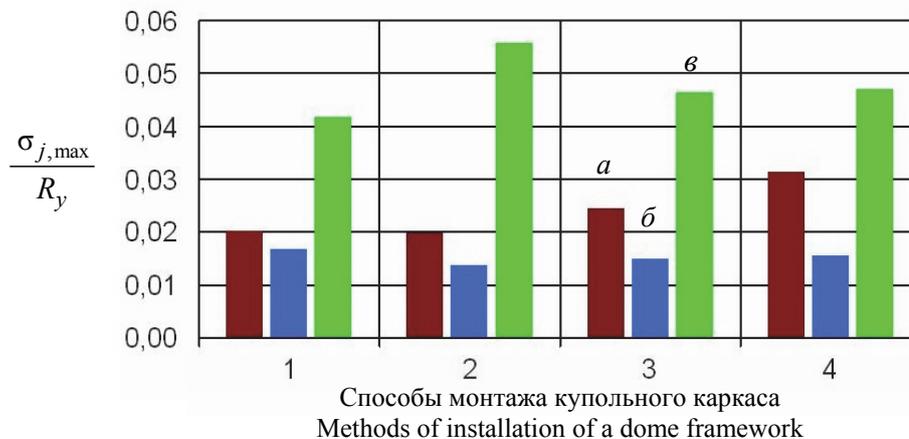


Рис. 11.  $\sigma_{j,\max}/R_y$  в элементах каркаса ребристо-кольцевого купола:

1 – проектная схема работы каркаса; 2 – монтаж с центральной и 3 рядами промежуточных опор; 3 – монтаж с центральной и 1 рядом промежуточных опор; 4 – монтаж с центральной опорой; а – сжатие в ребрах; б – сжатие в кольцах; в – растяжение в кольцах

Figure 11.  $\sigma_{j,\max}/R_y$  in the elements of the framework of the ribbed-ring dome:

1 – the design scheme of the frame work; 2 – installation with a central support and 3 rows of intermediate supports; 3 – installation with a central support and 1 row of intermediate supports; 4 – installation with a central support; а – compression in the ribs; б – compression in the rings; в – tension in the rings

Диаграммы рис. 11 свидетельствуют о том, что в процессе возведения одноярусных каркасов ребристо-кольцевых куполов из-за работы на собственный вес в сечениях их конструктивных

элементов возникают монтажные напряжения, не только сопоставимые по величине с напряжениями проектной схемы работы, но и превышающие их.

При этом в сечениях ребер величины сжимающих напряжений в монтажной схеме с временной центральной опорой и 3 рядами промежуточных опор достигают 2,0 % расчетного сопротивления, что эквивалентно работе конструкций в проектной схеме. При монтаже с временной центральной опорой и 1 рядом промежуточных опор величины сжимающих напряжений возрастают до 2,4 % расчетного сопротивления, а затем до 3,1 % при монтаже только с временной центральной опорой, что в 1,5 раза больше проектной схемы. Можно отметить, что с уменьшением количества временных опор величины сжимающих напряжений в сечениях ребер от работы каркаса в процессе монтажа существенно возрастают.

В сечениях колец сжимающие напряжения в монтажных схемах приближаются к напряжениям проектной схемы, которые достигают 1,7 % расчетного сопротивления стали. Поскольку величины растягивающих напряжений в проектной схеме равны 4,2 % расчетного сопротивления, то рост их до величин 4,6 и 4,7 % в двух последних монтажных схемах не может быть отнесен к существенному. Рост же растягивающих напряжений в сечениях колец до 5,6 % при монтаже с временной центральной опорой и 3 рядами промежуточных опор объясняется изгибом кольцевых элементов из плоскости наибольшей жесткости еще не жестко закрепленных над первым от наружного контура рядом промежуточных временных опор.

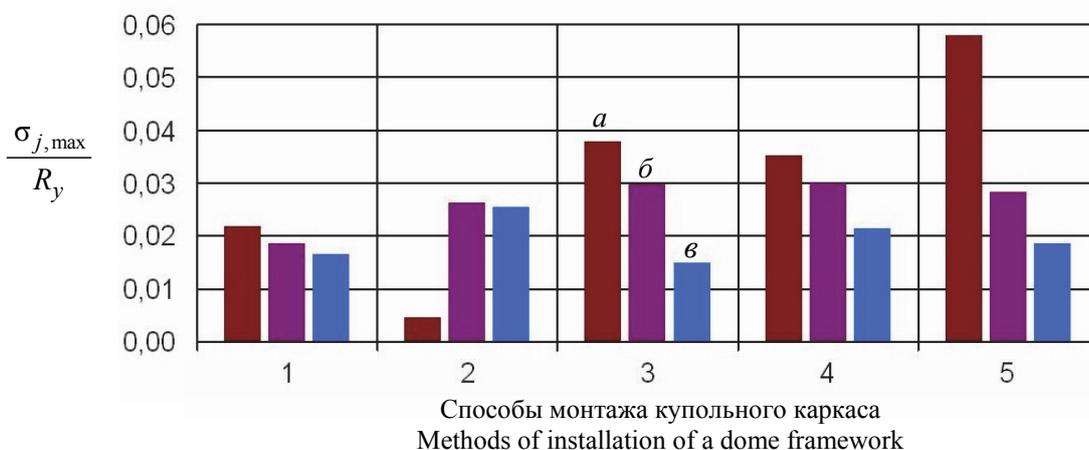


Рис. 12.  $\sigma_{j,max} / R_y$  в элементах каркаса секториально-сетчатого купола:

- 1 – проектная схема работы каркаса; 2 – монтаж со сплошных строительных лесов;
- 3 – монтаж с центральной и 3 рядами промежуточных опор; 4 – монтаж с центральной и 1 рядом промежуточных опор;
- 5 – монтаж с центральной опорой; а – сжатие в меридиональных элементах;
- б – сжатие в раскосных элементах; в – сжатие в кольцевых элементах

[Figure 12.  $\sigma_{j,max} / R_y$  in the elements of the framework of the sectoral-lattice dome:

- 1 – design scheme of the frame work; 2 – installation from continuous scaffolding;
- 3 – installation with a central support and 3 rows of intermediate supports;
- 4 – installation with a central support and 1 row of intermediate supports; 5 – installation with a central support;
- a – compression in the meridional elements; б – compression in the diagonal elements; в – compression in the ring elements]

Диаграммы рис. 12 свидетельствуют о том, что в процессе возведения каркасов секториально-сетчатых куполов из-за работы на собственный вес в сечениях их конструктивных элементах также возникают монтажные напряжения, не только сопоставимые по величине с напряжениями проектной схемы работы, но и превышающие их.

Для сжимающих напряжений в сечениях раскосных элементов проектной схемы 1,9 % расчетного сопротивления величины напряжений при монтаже со сплошных лесов увеличиваются до 2,6 %, при монтаже с временной центральной опо-

рой и 3 рядами промежуточных опор величины сжимающих напряжений возрастают до 3,0 % расчетного сопротивления. Дальнейшее уменьшение количества промежуточных опор практически не изменяет этих величин.

Для сжимающих напряжений в сечениях меридиональных элементов проектной схемы 2,2 % расчетного сопротивления при монтаже со сплошных лесов их величины незначительны. При монтаже с временной центральной опорой и 3 рядами промежуточных опор величины сжимающих напряжений в них возрастают до 3,8 % расчетного со-

противления, которые с уменьшением количества промежуточных опор изменяются незначительно. Однако монтаж только с центральной опорой приводит к возрастанию величины сжимающих напряжений в сечениях меридиональных элементов до 5,8 % расчетного сопротивления, что в 2,6 раза больше проектного значения.

Величины сжимающих напряжений в сечениях кольцевых элементов проектной схемы невелики – 1,7 % расчетного сопротивления. Их рост до 2,6 и 2,1 % при монтаже на сплошных лесах и монтаже с центральной и 1 рядом промежуточных опор объясняется изгибом отдельных кольцевых элементов из плоскости наибольшей жесткости еще не жестко закрепленных над временными опорами в ближних к опорному контуру ярусах.

В пространственных стержневых системах, к которым относятся металлические купольные каркасы, несущая способность сжатых или сжато-изгибаемых элементов исчерпывается в результате потери устойчивости. Появление неучтенных внутренних усилий от работы конструкций по монтажным расчетным схемам может оказать влияние на общее напряженно-деформированное состояние металлических купольных каркасов, возникающее от действия расчетных эксплуатационных нагрузок. Следовательно, к работе элементов купольных каркасов в процессе монтажа следует относиться с должным вниманием, и обязательно выполнять расчеты с учетом влияния монтажных усилий на напряженно-деформированное состояние купольных каркасов от эксплуатационных нагрузок.

### Выводы

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы.

1. В процессе возведения большепролетных металлических куполов в сечениях конструктивных элементов их каркасов неизбежно появление напряжений при любом способе монтажа.

2. Характер монтажных напряжений зависит от способов монтажа и в конструктивных элементах разных типов проявляется по-разному, что обусловлено отличием монтажных схем их работы от проектных схем.

3. Величины монтажных напряжений в сечениях элементов, имеющих тот же характер, что в проектных схемах, сопоставимы с напряжениями от собственного веса каркаса в проектных схемах при большом количестве временных опор и превосходят их при минимальном количестве временных опор, используемых в процессе возведения купольных каркасов.

4. Напряжения в сечениях конструктивных элементов при монтаже каркасов с минимальным количеством временных опор могут оказать влияние на общее напряженно-деформированное состояние большепролетных металлических куполов.

5. Для обеспечения надежности большепролетных металлических куполов необходимо обязательное выполнение расчетов с учетом влияния монтажных внутренних усилий на общее напряженно-деформированное состояние их каркасов.

6. Необходимо проведение исследований по оценке степени влияния внутренних усилий в конструктивных элементах каркасов, возникающих из-за работы по монтажным схемам, на напряженно-деформированное состояние металлических большепролетных куполов в процессе эксплуатации.

© Лебедь Е.В., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

### Список литературы

1. *Гохарь-Хармандарян И.Г.* Большепролетные купольные здания. М.: Стройиздат, 1978. 150 с.
2. *Кривошапко С.Н.* Металлические ребристо-кольцевые и сетчато-стержневые оболочки XIX – первой половины XX вв. // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2014. № 6. С. 4–15.
3. *Торкатюк В.И.* Монтаж конструкций большепролетных зданий. М.: Стройиздат, 1985. 170 с.
4. Металлические конструкции: справочник проектировщика: в 3 т. / под общ. ред. В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова). Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений. М.: Изд-во АСВ, 1998. 512 с.
5. *Гофштейн Г.Е., Ким В.Г., Ницев В.Н., Соколова А.Д.* Монтаж металлических и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 2004. 528 с.
6. *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.
7. *Mukaiyama Y., Fujino T., Kuroiwa Y., Ueki T.* Erection Methods for Space Structures // *Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia, 28 September – 2 October. Spain, Universidad Politecnica de Valencia, 2009. Pp. 1951–1962.*
8. Charlotte Coliseum. Charlotte, NC. URL: <http://scottymoore.net/charlotteColiseum.html> (дата обращения: 18.03.2017).
9. «Арена-Север» // ЗАО Стальмонтаж. Проектирование, изготовление, монтаж стальных конструкций. Наши объекты. URL: <http://www.stalmon.ru/nashi/57> (дата обращения: 14.03.2017).

10. *Louis O., Bass A.M.* Unusual Dome awaits Baseball Season in Houston // *Civil Engineering*. January, 1965. Vol. 35. No. 1. Pp. 63–65.

11. *Thor L. Anderson.* Le stade couvert polyvalent “Louisiana Superdome” à la Nouvelle-Orléans (Etats-Unis) // *Acier*. Mars 1974. Vol. 39. No. 3. Pp. 113–119.

12. Купол торгового центра «Глобал Сити» // Строительная компания «УК Совинтех». URL: <http://fee-develop.ru/ourdoneprojects/2-building/54-montagkupola> (дата обращения: 16.04.2017).

13. *Ружанский И.Л.* Опыт проектирования и сооружения сетчатых куполов // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2005. № 11. С. 22–26.

14. Купол электродепо Московской монорельсовой транспортной системы // ЦНИИПСК им. Мельникова. СТАКО. URL: <http://www.stako.ru/catalog/109/> (дата обращения: 14.03.2017).

15. Photos of the construction of Buckminster Fuller's Geodesic dome, the US pavilion at Expo 67, Montreal // MCM DAILY. Bucky Gallery. URL: <https://www.mcm-daily.com/gallery/bucky/> (дата обращения: 19.03.2017).

16. Монреальская биосфера – удивительный музей // Чудеса природы. Chudolike – самые красивые и самые интересные места нашей планеты. URL: <http://chudolike.ru/canada/monrealskaya-biosfera-udivitelnyj-muzej.html> (дата обращения: 21.10.2017).

17. *Лебедь Е.В.* Компьютерное исследование работы каркасов большепролетных металлических куполов

при различных способах монтажа // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 4. С. 261–272.

18. *Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А.* SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD. М.: АСВ, 2004. 592 с.

#### Об авторе

*Лебедь Евгений Васильевич* – кандидат технических наук, доцент, кафедра металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) (Москва, Россия). *Область научных интересов:* 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](mailto:evglebed@mail.ru)

#### Для цитирования

*Лебедь Е.В.* Особенности работы каркасов большепролетных металлических куполов в процессе их возведения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 6. С. 481–494. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-6-481-494

RESEARCH PAPER

## Behavior of the frames of large-span metal domes in the process of their installation

Evgeny V. Lebed

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

(received: August 12, 2018; revised: October 05, 2018; accepted: October 16, 2018)

**Abstract. Goal.** The goal of this paper is to characterize the process of forming the frames of large-span metal domes during assembly process. The load-bearing structural schemes during the assembly of frames differ from those, adopted for their analysis and design. Due to this fact, initial internal forces appear in the structural elements of frameworks that are called assembly forces. Geometric schemes of dome frameworks and the principles of their formation are described for ribbed domes, ribbed domes with annular rings and lattice domes. It is shown how lattice dome frameworks are formed and why they are considered as spatial bar systems. Specific features of the structural solutions for single-layer and double-layer frameworks are described. It is noted that the technological scheme for the assembly of structures of large-span metal domes depends on the structural systems of frameworks and on the methods of their erection. A brief description is given of different methods for erecting frameworks of large-span metal domes and of the number of temporary supports and mechanisms used in this process.

**Review.** Different methods of erection are illustrated with the examples of several well-known dome structures built in the world. The evaluation of the influence of each process on the behavior of structures during the installation is given. The nature of the work of individual structures and a frame is described for the process of erecting large-span metal domes. The emphasis was made on the significant differences in the nature of work of structural systems of dome frameworks with different ways of their installation.

**Research.** Computer models of the lattice metal domes are made of steel I-bars with rigid connections at the joints. Additional models were created for incomplete frameworks to study alternative ways of erection. For each assembly model

of the dome framework, computer analysis was performed for the action of its self-weight. Stresses in the structural members, obtained as a result of the analysis, were compared with the stresses in the corresponding elements of the design model of the framework under the self-weight.

**Conclusions.** The conclusion is made that the stresses in the elements of frameworks of the large-span metal domes are unavoidable when they are erected. The necessity of compulsory analysis of frameworks for erection conditions in the design of large-span metal domes was noted.

**Keywords:** large-span domes, metal frameworks, geometric schemes of domes, structural systems, design solutions, methods of erection, assembly of structures, computer model, element stresses

## References

- Gokhar'-Harmadaryan I.G. (1978). *Bol'sheproletnye kupol'nye zdaniya [Wide-Span Dome Buildings]*. Moscow, Stroyizdat Publ., 150. (In Russ.)
- Krivoshapko S.N. (2014). Metal ribbed-and-circular and lattice shells from the XIX<sup>th</sup> until the first half of the XX<sup>th</sup> century. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (6), 4–15.
- Torkatyuk V.I. (1985). *Montazh konstrukzij bol'sheproletnyh zdaniy [Installation of Structures of Large-Span Buildings]*. Moscow, Stroyizdat Publ., 170. (In Russ.)
- Kuznetsov V.V. (Ed.). (1998). *Metallicheskie konstruktsii. Tom. 2. Stal'nye konstruktsii zdaniy i sooruzheniy. Spravochnik proektirovshchika [Metal Structures. Vol. 2. Steel structures of buildings and constructions. Reference book of the designer]*. Moscow, ASV Publ., 512. (In Russ.)
- Gofshteyn G.E., Kim V.G., Nishchev V.N., Sokolova A.D. (2004). *Montazh metallicheskih i zhelezobetonnykh konstrukzij [Installation of Metal and Reinforced Concrete Structures]*. Moscow, Stroyizdat Publ., 528. (In Russ.)
- 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.
- Mukaiyama Y., Fujino T., Kuroiwa Y., Ueki T. (2009). Erection Methods for Space Structures. *Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, 28 September – 2 October, Valencia*. Spain, Universidad Politecnica de Valencia, 1951–1962.
- Scotty Moore. (2017, March 18). Charlotte Coliseum. Charlotte, NC. Available at: <http://scottymoore.net/charlotteColiseum.html>
- ZAO Stal'montazh. (2017, March 14). Proektirovanie, izgotovlenie, montazh stalnyh konstruktsiy. Nashi ob'ekty. Arena-Sever [Design, production, installation of steel structures. Our objects. Arena-Sever.]. Available at: <http://www.stalmon.ru/nashi/57>
- Louis O., Bass A.M. (1965). Unusual Dome awaits Baseball Season in Houston. *Civil Engineering*, 35(1), 63–65.
- Thor L. Anderson. (1974). Le stade couvert polyvalent "Louisiana Superdome" à la Nouvelle-Orléans (Etats-Unis). *Acier*, 39(3), 113–119.
- UK Sovintekh. (2017, April 16). Kupol trgovogo tsentra "Global Siti" [Dome of shopping center Global City]. Available at: <http://feedevelop.ru/ourdoneprojects/2-building/54-montagkupola>
- 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.)
- TSNIIPSK im. Mel'nikova. STAKO. (2017, March 14). Kupol elektrodepo Moskovskoi monorel'sovoi transportnoi sistemy [Dome of electrodepot of the Moscow monorail transport system]. Available at: <http://www.stako.ru/catalog/109/>
- MCM DAILY. Bucky Gallery. (2017, March 19). Photos of the construction of Buckminster Fuller's Geodesic dome, the US pavilion at Expo 67, Montreal. Available at: <https://www.mcmdaily.com/gallery/bucky/>
- Chudesa prirody. Chudolike – samye krasivye i samye udivitel'nye mesta nashey planety [Nature miracles. Chudolike – The most beautiful and most interesting places of our planet]. (2017, October 21). Monreal'skaya biosfera – udivitel'nyi muzey [The Montreal biosphere – the surprising museum]. Available at: <http://chudolike.ru/canada/monrealskaya-biosfera-udivitelnyj-muzej.html>
- Lebed E.V. (2018). Computer analysis of the behavior of large-span metal domes with different methods of installation. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(4), 261–272. (In Russ.)
- Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A. (2004). SCAD Office. Vychislitel'ny kompleks SCAD [Computer system SCAD]. Moscow, ASV Publ., 592. (In Russ.)

### About the author

**Evgeny V. Lebed** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Metal and Wooden Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) (Moscow, Russia). *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. *Contacts:* e-mail: [evglebed@mail.ru](mailto:evglebed@mail.ru)

### For citation

Lebed E.V. (2018). Behavior of the frames of large-span metal domes in the process of their installation. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(6), 481–494. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-6-481-494 (In Russ.)