

DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-4-278-290  
УДК 624.074.2:624.014:693.8

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Изменение напряженного состояния каркаса металлического ребристо-кольцевого купола в процессе монтажа

**Е.В. Лебедь**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,  
Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26  
evglebed@mail.ru

### История статьи:

Поступила в редакцию: 19 июня 2019 г.

Доработана: 23 июля 2019 г.

Принята к публикации: 28 июля 2019 г.

### Аннотация

**Цели.** Выполнить анализ напряженного состояния металлических конструкций ребристо-кольцевого купола полусферической формы при монтаже его каркаса двумя принципиально разными способами – подрачиванием и наращиванием. Так как на разных этапах монтажа в купольном каркасе возникают разные расчетные схемы, то в их конструктивных элементах возникают разные монтажные усилия. Показать, как монтажные усилия приводят к преобразующемуся в процессе возведения напряженному состоянию каркаса ребристо-кольцевого купола. Выполнить анализ напряженных состояний рассматриваемых способов возведения металлического купольного каркаса и дать им оценку. **Методы.** Разработана компьютерная модель металлического ребристо-кольцевого купола из стальных двутавров с жесткими сопряжениями в узлах. Созданы несколько дополнительных монтажных моделей неполного каркаса для исследования рассматриваемых способов монтажа купола на разных этапах. Для каждой монтажной модели купольного каркаса выполнены компьютерные расчеты на действие собственного веса. В результате расчетов определены напряжения в конструктивных элементах каркасов монтажных схем, которые сравнивались с аналогичными напряжениями на действие собственного веса в каркасе проектной схемы. **Результаты.** Представлены графики изменения напряженного состояния конструктивных элементов каркаса металлического ребристо-кольцевого купола. Показаны диаграммы изменения степени использования прочности стали на разных этапах монтажа. Дана сравнительная оценка рассматриваемым монтажным напряженным состояниям. Отмечена неизбежность монтажных напряжений и выбран наиболее эффективный способ монтажа.

**Ключевые слова:** ребристо-кольцевой купол; металлический каркас; конструктивное решение; способы возведения; монтаж конструкций; компьютерная модель; напряжения в элементах

### Для цитирования

Лебедь Е.В. Изменение напряженного состояния каркаса металлического ребристо-кольцевого купола в процессе монтажа // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 4. С. 278–290. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-278-290>

### Введение

Каркасы металлических куполов больших пролетов представляют собой пространственные стержневые системы. Это обеспечивает необходимую

жесткость и надежность куполов в качестве покрытий зданий и сооружений. В сочетании с экономичностью расхода металла они занимают ведущее место среди выпуклых пространственных конструкций [1; 2]. Кроме того, купольные покрытия обладают выразительным внешним обликом и широко распространены в мировой строительной практике [3].

Как и другие большепролетные покрытия купола не появляются на месте строительства сразу

Лебедь Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра металлических и деревянных конструкций.

© Лебедь Е.В., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

и целиком. Свою реальную конструктивную и геометрическую форму они приобретают в процессе возведения за длительный промежуток времени [4; 5]. В процессе монтажа сначала появляются лишь отдельные части купольного каркаса. Затем эти части постепенно увеличиваются путем присоединения конструктивных фрагментов купола. Только по завершении монтажа купольного каркаса образуется не только конструктивная, но и расчетная схема цельного купольного покрытия. Монтаж сопровождается появлением и преобразованием сложных конструктивных систем. На разных этапах монтажа в купольном каркасе возникают разные расчетные схемы, существенно отличающиеся от проектной, и воспринимающие нагрузки от собственного веса конструкций несущего каркаса [5; 6]. Разные расчетные схемы характеризуются также и различной нагрузкой.

На характер монтажа металлических куполов в большой степени влияет конструктивное решение их каркасов. При этом способ возведения выбирается исходя из размера купольного каркаса, размеров его конструктивных элементов и их способности воспринимать монтажные нагрузки [7; 8]. Способ возведения определяет выбор подъемно-транспортных машин и механизмов. Возведение купольных каркасов как пространственных стержневых систем представляет собой технически сложную задачу. От выбора способа возведения зависят технологичность и продолжительность монтажа.

Купольные каркасы в процессе монтажа формируются постепенно, а реальные конструкции в большепролетных металлических куполах обладают значительным собственным весом. Поэтому от того, какой способ возведения используется, зависит напряженное состояние в процессе монтажа. Ранее были рассмотрены особенности работы конструкций купольных каркасов в процессе монтажа при различных способах возведения и, как следствие, применения разных систем временных опор [8]. Обычно подобным образом возводятся относительно невысокие или пологие купола, а также пространственные конструктивные системы более сложных большепролетных покрытий [9]. В высоких или крутых куполах есть возможность избежать применения большого числа временных опор. Но в таких куполах должно быть обязательно обеспечено жесткое сопряжение частей каркаса друг с другом.

К таким способам возведения относятся монтаж подрачиванием и монтаж наращиванием. Монтаж способом подрачивания осуществляется от вершины, когда сначала собирается вершинный фрагмент каркаса, а затем к нему ярус за ярусом присоединяют остальные конструктивные элементы каркаса. При этом используются переставные временные

опоры, поддерживающие собранную центральную часть купольного каркаса на каждом этапе. Монтаж способом наращивания осуществляется от основания, когда сначала устанавливаются конструктивные элементы на опорном контуре, а затем на них устанавливают ярус за ярусом остальные конструктивные элементы каркаса. В этом случае временные опоры не применяют. Поскольку на верхних ярусах незавершенного покрытия монтируемые конструкции создают визуальный эффект навеса, такой монтаж в большепролетных куполах называют также навесным.

В обоих случаях конструктивные элементы каркаса прикрепляются к узлам собранной ранее части купольного каркаса. Так как все элементы обладают собственным весом, в частично собранной части купольного каркаса возникает напряженное состояние, которое непрерывно меняется. На каждой стадии монтажа образуется собственная расчетная схема, называемая монтажной. Каждая монтажная расчетная схема купольного каркаса отличается от проектной схемы каркаса полностью смонтированного купола и от предыдущих монтажных схем. Поэтому в процессе возведения купола в их конструктивных элементах возникают монтажные внутренние усилия, отличающиеся от усилий в элементах каркаса проектной схемы и от усилий в предыдущих монтажных схемах. Кроме того, монтажные усилия в элементах каркаса при разных способах возведения куполов, как подрачивания, так и наращивания, будут отличаться друг от друга, в том числе и на промежуточных монтажных стадиях возведения.

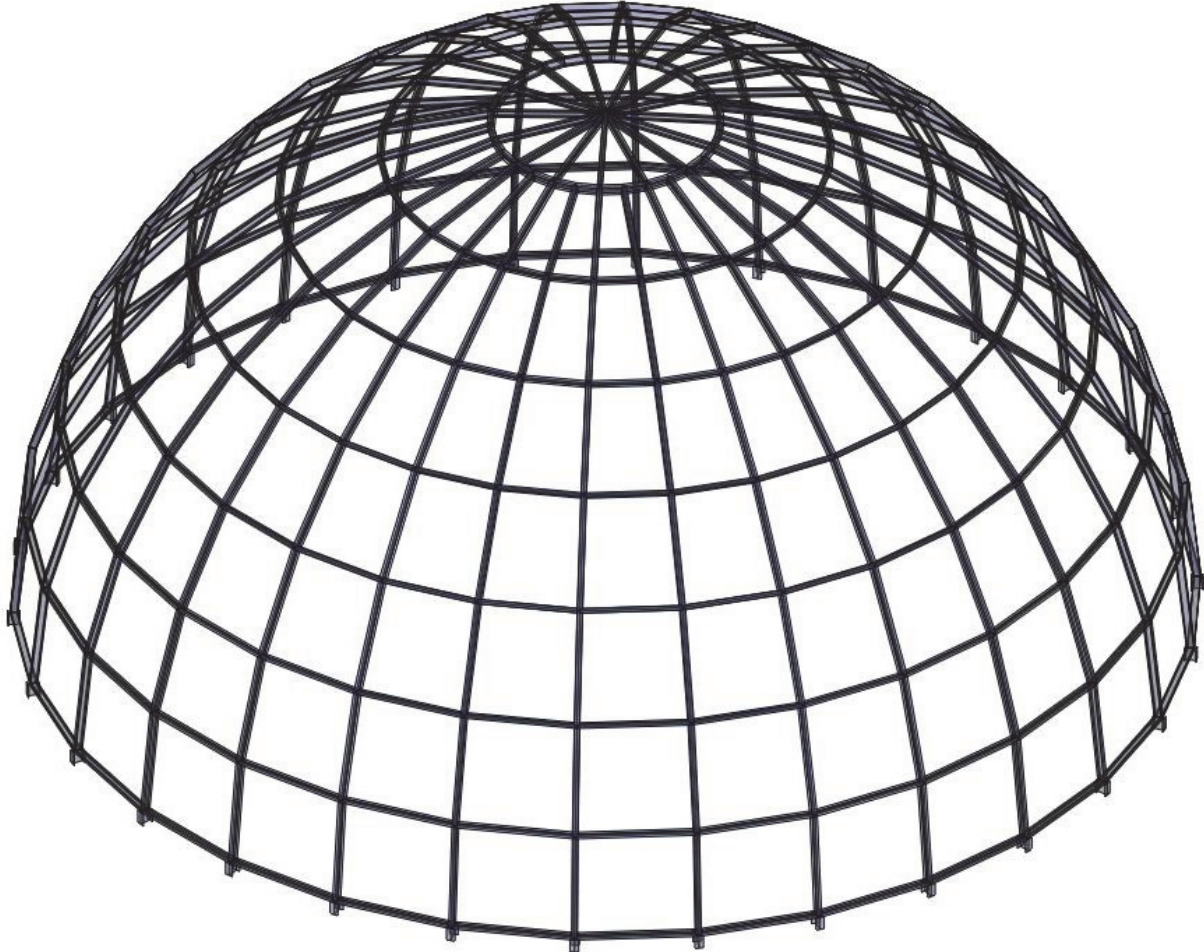
При монтаже способами подрачивания и наращивания всегда существуют конструктивные элементы и фрагменты купольного каркаса, которые похожи на консоли или консольные навесы соответственно. Из-за этого узловые сопряжения конструкций в каркасе и сечения самих конструктивных элементов должны обладать необходимой изгибной жесткостью. Поэтому в одноярусных купольных каркасах в качестве стержневых элементов используются только двутавры. В двухярусных купольных каркасах могут применяться любые стержневые профили, поскольку они образуют решетчатые элементы ферменного вида [8].

## 1. Исследование

С целью выяснения характера напряженно-деформированного состояния по величинам внутренних усилий в стержнях металлического купольного каркаса при разных способах монтажа были выполнены специальные компьютерные исследования, которые проводились на компьютерных моделях купольного каркаса как пространственных

стержневых систем [10; 11] в программе SCAD. Объектом исследования служил каркас однополюсного ребристо-кольцевого купола, изображенного на рис. 1. Узлы каркаса купола расположены на сферической поверхности с радиусом кривизны 20 м,

пролетом 40 м и высотой 19,8 м, то есть купол по очертанию представляет собой половину сферы. Во всех узлах купольного каркаса приняты жесткие сопряжения между элементами – как меридиональных ребер, так и колец.



**Рис. 1.** Каркас исследуемого ребристо-кольцевого купола  
[Figure 1. The frame of the investigated ribbed-ring dome]

На основе предварительного приближенно-го расчета купола проектной схемы на несимметричные нагрузки ребра назначены из двутавра 26Ш1, верхнее кольцо – из двутавра 30Ш1, остальные кольца – из двутавра 23Ш1. Расстояние между кольцами вдоль меридионального ребра 3,9 м, расстояние между ребрами вдоль колец от 0,81 м у верхнего кольца до 4,18 м у нижнего кольца. Каркас купола опирается на условные короткие консольные стойки длиной 0,5 м из стального двутавра 40Ш3.

В реальных ребристо-кольцевых куполах в четырех секторах, расположенных симметрично относительно всего каркаса, устанавливаются связи между меридиональными ребрами в каждой ячейке

по всей высоте купола. Учитывая жесткое сопряжение стержней купольного каркаса в узлах, а также симметричное действие нагрузки от собственного веса стержневых элементов, в данном исследовании такие связи в каркас не вводились.

Для исследования напряженного состояния ребристо-кольцевого купола рассматривались конкретные промежуточные монтажные этапы купольного каркаса. Каждый этап подразумевал собранный до замкнутого состояния кольцевой ярус купольного каркаса. Таких ярусов с позиции монтажа в рассматриваемом купольном каркасе насчитывается семь (рис. 1). Поэтому исследование производилось на основе статического расчета компьютерных моделей каркаса каждой из семи монтажных схем про-

межучастковых стадий возведения и проектной схемы купола на действие нагрузки только от собственного веса стержневых элементов. Рассмотрим каждый способ возведения отдельно.

**Монтаж способом подрачивания.** При этом способе возведения монтаж начинают со сборки вершины купола, ограниченной верхним, или 8-м, кольцом. Собранный купол устанавливают на невысокие стойки из стальной трубы 180×20 мм длиной 4,4 м, расставленные по окружности под узлами верхнего кольца. К верхнему, 8-му, кольцу прикрепляют стержни меридиональных ребер 7-го яруса и стержни 7-го промежуточного кольца (рис. 2, а).

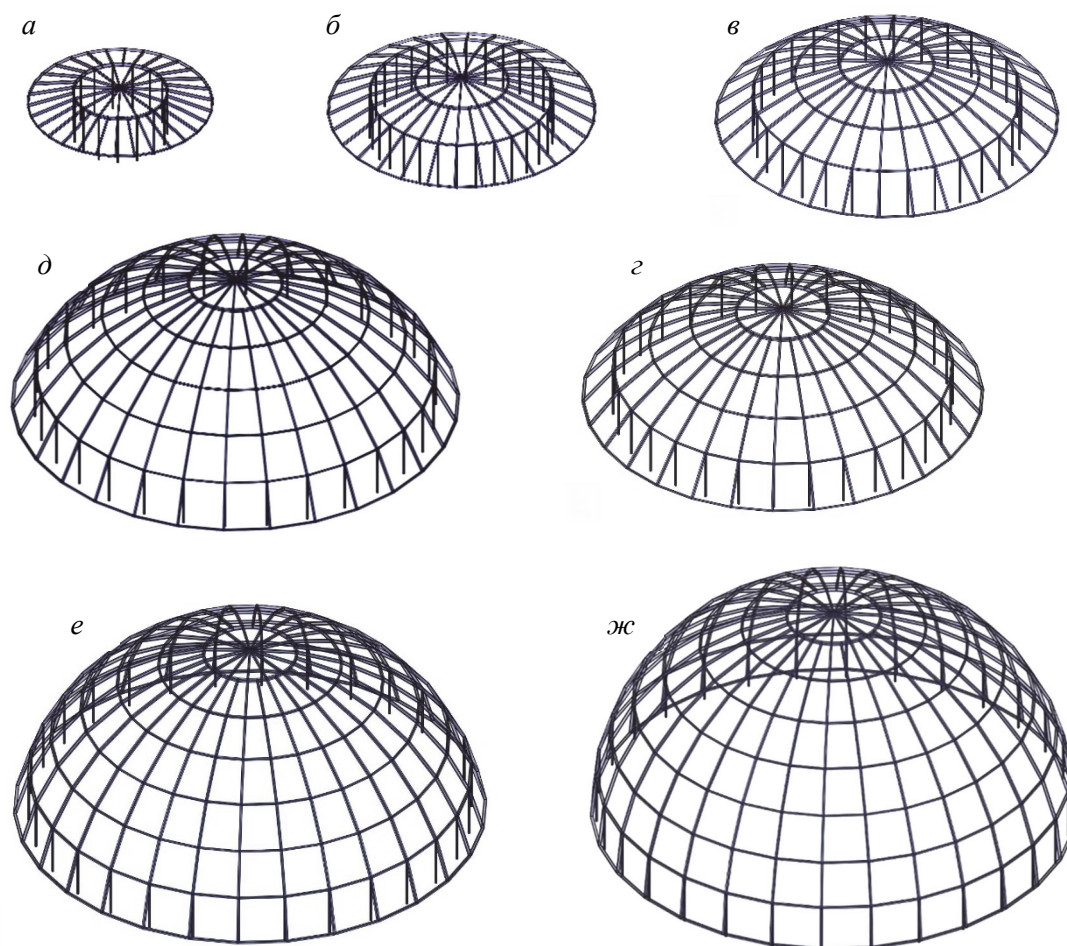
По завершении монтажа 7-го яруса стойки переставляют под узлы 7-го кольца купольного каркаса. Теперь к 7-му кольцу прикрепляют стержни

меридиональных ребер 6-го яруса и стержни 6-го промежуточного кольца (рис. 2, б).

После завершения монтажа 6-го яруса стойки переставляют под узлы 6-го кольца купольного каркаса. Теперь к 6-му кольцу прикрепляют стержни меридиональных ребер 5-го яруса и стержни 5-го промежуточного кольца (рис. 2, в).

Затем стойки переставляют под узлы 5-ого кольца купольного каркаса и выполняют монтаж стержней меридиональных ребер 4-го яруса и стержней 4-го кольца (рис. 2, г). Потом эту процедуру повторяют для 3-го яруса купольного каркаса (рис. 2, д), 2-го яруса (рис. 2, е) и, наконец, 1-го, самого нижнего, яруса ребристо-кольцевого купола (рис. 2, ж).

Монтаж способом подрачивания завершается устройством опор под узлами 1-го, нижнего, кольца купольного каркаса.

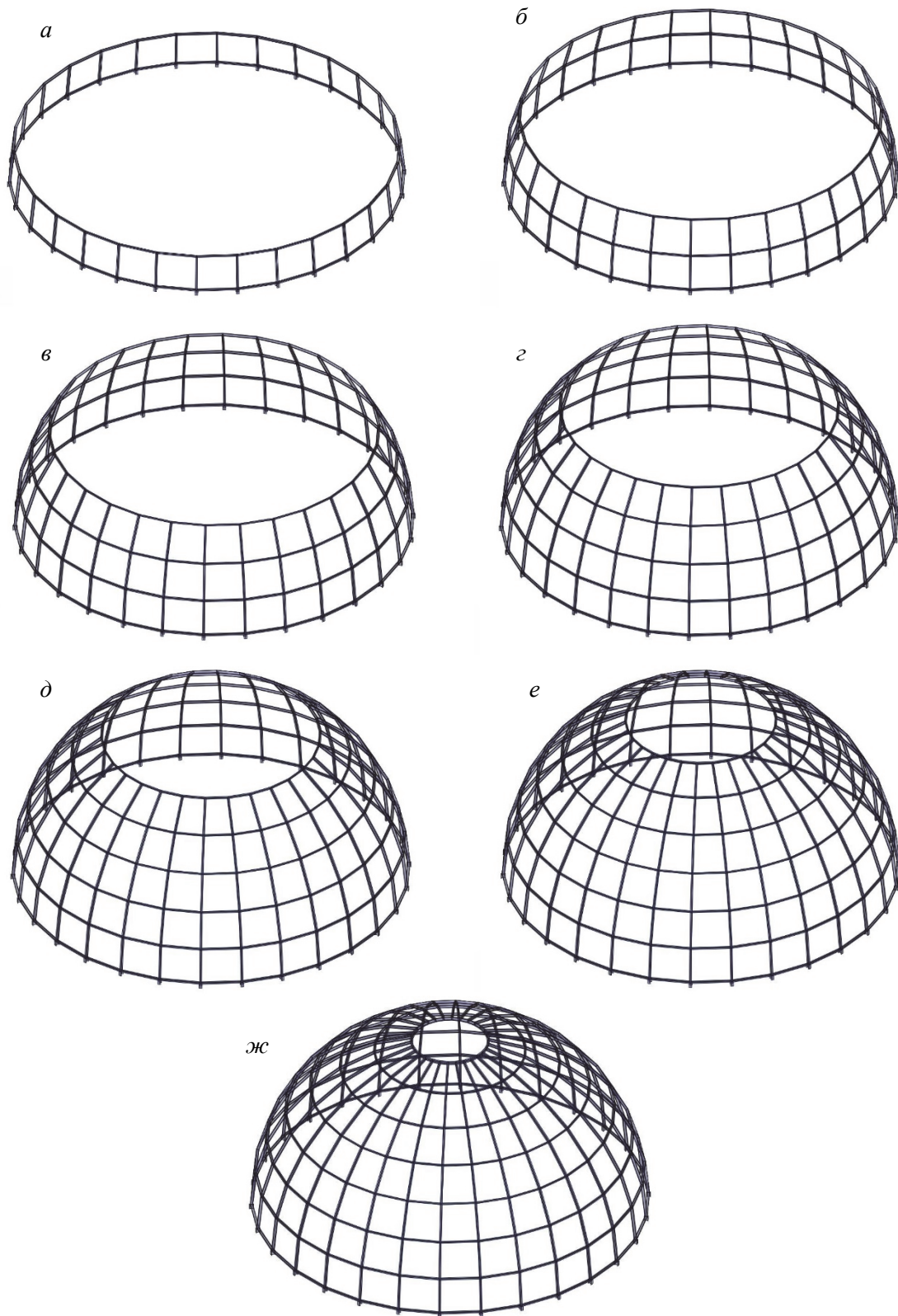


**Рис. 2.** Этапы монтажа купольного каркаса способом подрачивания:

а – монтаж 7-го яруса; б – монтаж 6-го яруса; в – монтаж 5-го яруса; г – монтаж 4-го яруса;  
 д – монтаж 3-го яруса; е – монтаж 2-го яруса; ж – монтаж 1-го яруса

[Figure 2. Stages of the “top-down” assembly of the dome framework:

а – installation of the 7<sup>th</sup> tier; б – installation of the 6<sup>th</sup> tier; в – installation of the 5<sup>th</sup> tier;  
 г – installation of the 4<sup>th</sup> tier; д – installation of the 3<sup>rd</sup> tier; е – installation of the 2<sup>nd</sup> tier; ж – installation of the 1<sup>st</sup> tier]



**Рис. 3.** Этапы монтажа купольного каркаса способом наращивания:

*a* – монтаж 1-го яруса; *б* – монтаж 2-го яруса; *в* – монтаж 3-го яруса;  
*г* – монтаж 4-го яруса; *д* – монтаж 5-го яруса; *е* – монтаж 6-го яруса; *ж* – монтаж 7-го яруса

[Figure 3. Stages of the “bottom-up” assembly of the dome framework:

*a* – installation of the 1<sup>st</sup> tier; *б* – installation of the 2<sup>nd</sup> tier; *в* – installation of the 3<sup>rd</sup> tier;  
*г* – installation of the 4<sup>th</sup> tier; *д* – installation of the 5<sup>th</sup> tier; *е* – installation of the 6<sup>th</sup> tier; *ж* – installation of the 7<sup>th</sup> tier]

**Монтаж способом наращивания.** При этом способе возведения монтаж начинают со сборки нижнего яруса купола в составе 1-го и 2-го колец и стержней меридиональных ребер 1-го яруса (рис. 3, а). По завершении монтажа 1-го яруса к узлам 2-го кольца прикрепляют стержни меридиональных ребер 2-го яруса и стержни 3-го кольца (рис. 3, б). Затем посредством прикрепления к узлам 3-го кольца выполняют монтаж стержней меридиональных ребер 3-го яруса и стержней 4-го кольца (рис. 3, в).

Потом эту процедуру повторяют для 4-го яруса купольного каркаса (рис. 3, г), 5-го яруса (рис. 3, д), 6-го яруса (рис. 3, е) и, наконец, 7-го яруса вместе с верхним 8-м кольцом (рис. 3, ж).

Монтаж способом наращивания завершается сборкой меридиональных стержней 8-го яруса и установкой их в вершине купола.

Анализ работы пространственных стержневых систем купольного типа на компьютерных расчетных моделях имеет большое распространение в различных исследованиях. Например, исследуются напряженные состояния каркасов при изменении геометрических параметров купола [12; 13], при выходе из строя групп элементов [14], при разных геометрических схемах каркаса [15], при разных отношениях высоты купола к диаметру [16], при изменениях пролетов куполов [17], с включением ограждений в ячейках каркаса [18].

В процессе исследования работы каркаса ребристо-кольцевого купола при рассматриваемых способах возведения были получены напряженно-деформированные состояния всех монтажных схем, которые сравнивались друг с другом и с проектной схемой. Анализ напряженных состояний производился по нормальным напряжениям в сечениях конструктивных элементов меридиональных ребер и колец.

При работе купольного каркаса всех монтажных схем и проектной схемы на собственный вес их элементы находятся в состоянии действия продольной силы с изгибом. Поэтому при исследовании вычислялись нормальные напряжения в каждом  $i$ -ом элементе по формуле

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

Если от продольной силы в элементах возникают сжимающие напряжения со знаком «-» и наибольшие по абсолютной величине изгибающие моменты расположены в верхней части сечения (растяжение от изгиба сверху), то при вычислении  $\sigma_i$  перед всеми слагаемыми использовался знак «-». Для растягивающих напряжений со знаком «+» в

элементах от продольной силы в таком же случае изгибающих моментов при вычислении  $\sigma_i$  перед всеми слагаемыми использовался знак «+».

Если же наибольшие по абсолютной величине изгибающие моменты расположены в нижней части сечения (растяжение от изгиба снизу), то при вычислении  $\sigma_i$  перед вторым и третьим слагаемыми использовался знак первого слагаемого.

В качестве критерия сравнительной оценки напряжения в элементах купольного каркаса монтажных схем служило сопоставление их с напряжениями в тех же элементах каркаса купола проектной схемы по аналогичному знаку («-» с «-», а «+» с «+»), если по абсолютной величине они были существенно больше, чем с противоположными знаками.

## 2. Результаты

В результате расчетов были получены напряженно-деформированные состояния каждой из монтажных стержневых систем, образовавшихся на всех этапах монтажа купольного каркаса рассматриваемых способов возведения.

Максимальное вертикальное перемещение от собственного веса каркаса в проектной схеме ребристо-кольцевого купола равно 0,061 см. Максимальные вертикальные перемещения от собственного веса каркаса в монтажных схемах при возведении способом подрачивания от 1-го до 7-го этапа равны 0,065, 0,117, 0,111, 0,098, 0,085, 0,075 и 0,067 см соответственно. Аналогичные перемещения при возведении способом наращивания от 1-го до 7-го этапа равны 0,001, 0,005, 0,011, 0,019, 0,028, 0,042 и 0,058 см соответственно. Эти данные свидетельствуют о незначительных деформациях, что позволяет сосредоточиться на напряженном состоянии стержневых элементов каркаса в процессе монтажа.

В ребристо-кольцевом куполе стержневые элементы каркаса, принадлежащие меридиональным ребрам, и стержневые элементы, принадлежащие кольцам, работают на действие собственного веса по-разному. При этом напряжения  $\sigma_i$  в однотипных элементах разных ярусов  $i$ , как монтажных, так и проектной схем, имеют большой разброс значений. Поэтому для анализа напряженных состояний каркаса в процессе монтажа сравнивались напряжения в элементах каждого яруса  $i$  монтажных схем с максимальными напряжениями данного типа элементов проектной схемы, то есть вычислялось отношение  $\sigma_{M,i} / \sigma_{П,max}$ .

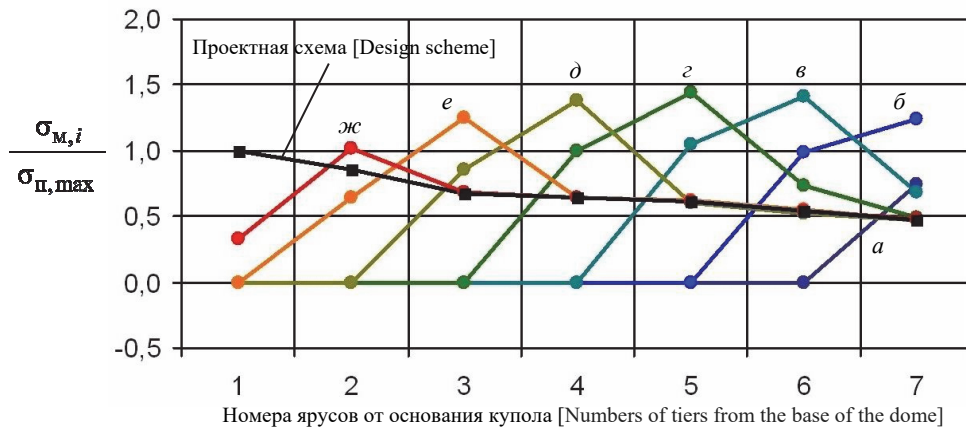
Для получения объективных сведений об уровне напряжений в сопоставлении с аналогичным элементом проектной схемы вычислялись и относитель-

ные напряжения в элементах каждого яруса  $i$  для самой проектной схемы.

В результате вычисления относительных напряжений в элементах каркаса в разных монтажных схемах при возведении ребристо-кольцевого купола были получены специальные графики, которые представлены на рис. 4 и 5 для возведения способом подращивания и на рис. 6 и 7 для возведения способом наращивания. Эти графики показывают, как изменяются относительные напряжения в элементах купольного каркаса каждого яруса при переходе от одного этапа монтажа к другому.

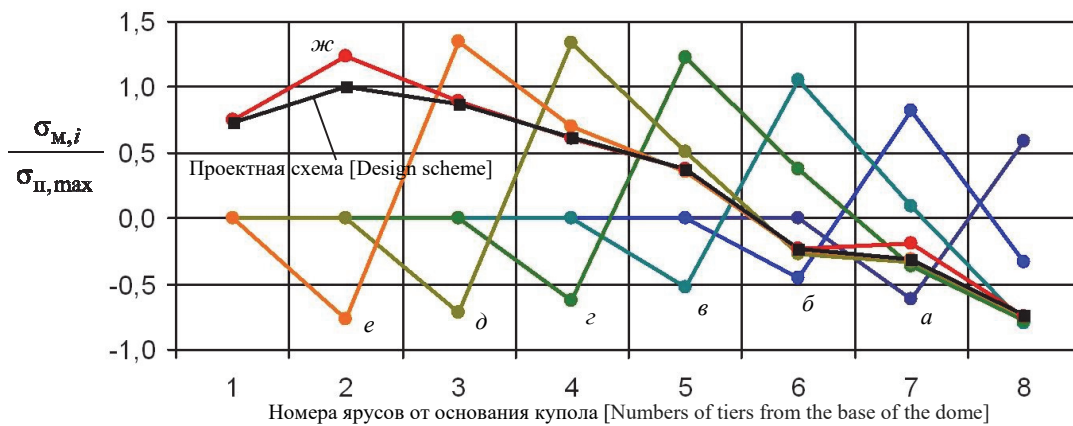
Здесь необходимо отметить особенности компьютерного начертания в программе Excel приве-

денных графиков. Эти графики отражают относительные напряжения элементов всех ярусов на каждом этапе монтажа, то есть каждой монтажной расчетной модели, в том числе и тех, которые еще не установлены. Поэтому в каждой монтажной расчетной модели для элементов отсутствующих ярусов графики показывают нулевые значения относительных напряжений. Несмотря на кажущуюся абсурдность такого представления, приведенные графики дают возможность удобного визуального сравнения меняющихся напряженных состояний элементов каркаса по этапам монтажа и при разных способах возведения ребристо-кольцевого купола.



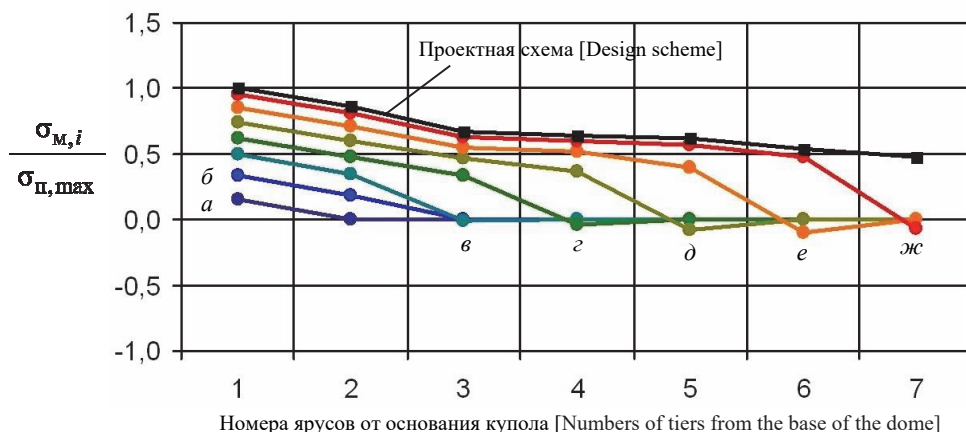
**Рис. 4.**  $\sigma_{M,i} / \sigma_{II,max}$  в поярусных элементах ребер при монтаже каркаса купола подращиванием на разных этапах:  
 а – монтаж 7-го яруса; б – монтаж 6-го яруса; в – монтаж 5-го яруса; з – монтаж 4-го яруса;  
 д – монтаж 3-го яруса; е – монтаж 2-го яруса; жс – монтаж 1-го яруса

**[Figure 4.**  $\sigma_{M,i} / \sigma_{II,max}$  in the elements of tier ribs at different stages of the “top-down” assembly of the framework of the dome:  
 а – installation of the 7<sup>th</sup> tier; б – installation of the 6<sup>th</sup> tier; в – installation of the 5<sup>th</sup> tier;  
 з – installation of the 4<sup>th</sup> tier; д – installation of the 3<sup>rd</sup> tier; е – installation of the 2<sup>nd</sup> tier; жс – installation of the 1<sup>st</sup> tier]



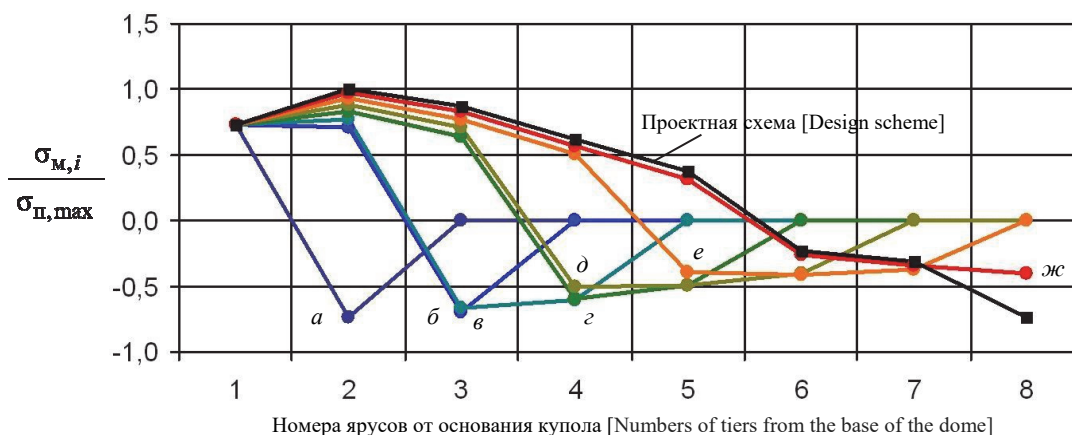
**Рис. 5.**  $\sigma_{M,i} / \sigma_{II,max}$  в поярусных элементах колец при монтаже каркаса купола подращиванием на разных этапах:  
 а – монтаж 7-го яруса; б – монтаж 6-го яруса; в – монтаж 5-го яруса; з – монтаж 4-го яруса;  
 д – монтаж 3-го яруса; е – монтаж 2-го яруса; жс – монтаж 1-го яруса

**[Figure 5.**  $\sigma_{M,i} / \sigma_{II,max}$  in the elements of tier rings at different stages of “top-down” assembly of the framework of the dome:  
 а – installation of the 7<sup>th</sup> tier; б – installation of the 6<sup>th</sup> tier; в – installation of the 5<sup>th</sup> tier;  
 з – installation of the 4<sup>th</sup> tier; д – installation of the 3<sup>rd</sup> tier; е – installation of the 2<sup>nd</sup> tier; жс – installation of the 1<sup>st</sup> tier]



**Рис. 6.**  $\sigma_{M,i}/\sigma_{П,мах}$  в поярусных элементах ребер при монтаже каркаса купола наращиванием на разных этапах:  
*a* – монтаж 1-го яруса; *б* – монтаж 2-го яруса; *в* – монтаж 3-го яруса; *г* – монтаж 4-го яруса;  
*д* – монтаж 5-го яруса; *е* – монтаж 6-го яруса; *ж* – монтаж 7-го яруса

**[Figure 6.**  $\sigma_{M,i}/\sigma_{П,мах}$  in the tier elements of ribs at different stages of “bottom-up” installation of the framework of the dome:  
*a* – installation of the 1<sup>st</sup> tier; *б* – installation of the 2<sup>nd</sup> tier; *в* – installation of the 3<sup>rd</sup> tier;  
*г* – installation of the 4<sup>th</sup> tier; *д* – installation of the 5<sup>th</sup> tier; *е* – installation of the 6<sup>th</sup> tier; *ж* – installation of the 7<sup>th</sup> tier]



**Рис. 7.**  $\sigma_{M,i}/\sigma_{П,мах}$  в поярусных элементах колец при монтаже каркаса купола наращиванием на разных этапах:  
*a* – монтаж 1-го яруса; *б* – монтаж 2-го яруса; *в* – монтаж 3-го яруса; *г* – монтаж 4-го яруса;  
*д* – монтаж 5-го яруса; *е* – монтаж 6-го яруса; *ж* – монтаж 7-го яруса

**[Figure 7.**  $\sigma_{M,i}/\sigma_{П,мах}$  in the tier elements of rings at different stages of “bottom-up” installation of the framework of the dome:  
*a* – installation of the 1<sup>st</sup> tier; *б* – installation of the 2<sup>nd</sup> tier; *в* – installation of the 3<sup>rd</sup> tier;  
*г* – installation of the 4<sup>th</sup> tier; *д* – installation of the 5<sup>th</sup> tier; *е* – installation of the 6<sup>th</sup> tier; *ж* – installation of the 7<sup>th</sup> tier]

Графики монтажа купола способом подрачивания показывают, что напряжения в элементах меридиональных ребер на предыдущем от монтируемого яруса со 2-го этапа (6 ярус) по 6-й этап (2 ярус) превосходят максимальные проектные последовательно в 1,25, 1,41, 1,44, 1,39 и 1,25 раза (рис. 4). Причем монтажные напряжения превосходят проектные в этих же ярусах в 2,63, 2,61, 2,34, 2,16 и 1,85 раза соответственно. А напряжения в элементах верхнего (предыдущего) и нижнего (монтируемого) колец с 1-го этапа (7 ярус) по 6-й этап (2 ярус) проявляют скачущий знако-

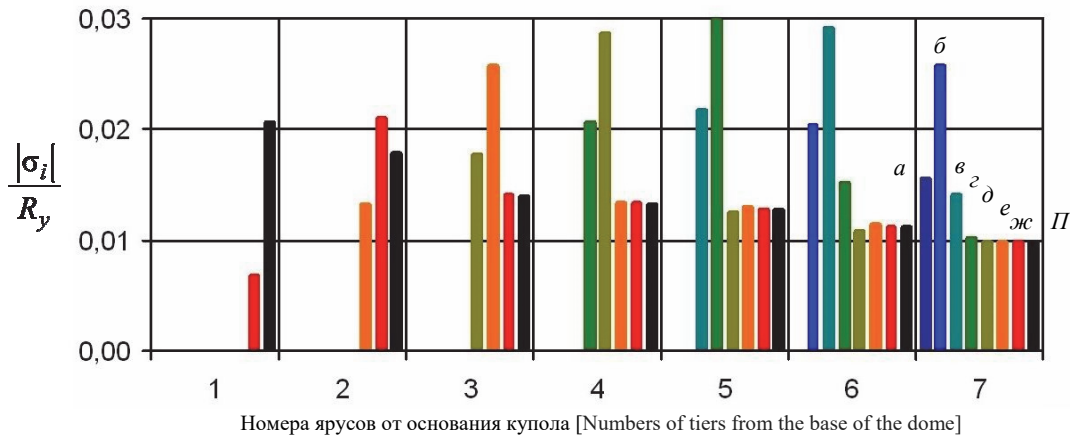
переменный (от растяжения к сжатию) характер. Перепад величин напряжений в верхнем (над опорами) и нижнем кольцах последовательно в 1,21, 1,28, 1,58, 1,85, 2,06 и 2,12 раза больше максимального проектного значения (рис. 5).

Графики монтажа купола способом наращивания показывают, что напряжения в элементах меридиональных ребер возрастают постепенно от 1-го этапа (1 ярус) по 6-й этап (6 ярус), пока не достигнут проектного значения. Однако с 4-го по 7-й этап на монтируемом ярусе, то есть 4-м, 5-м, 6-м и 7-м, наблюдаются напряжения противоположного знака



(растяжение) соответственно в  $-0,07$ ,  $-0,12$ ,  $-0,19$  и  $-0,15$  от проектного (рис. 6). Напряжения в элементах нижнего (предыдущего) и верхнего (монтируемого) колец с 1-го этапа (1 ярус) по 4-й этап (4 ярус) также проявляют скачущий знакопеременный (от растяжения к сжатию) характер. Перепад величин напряжений в монтируемом и нижнем кольцах последовательно в 1,47, 1,41, 1,44 и 1,22 раза больше максимального проектного значения (рис. 7).

Для получения сведений об уровне напряжений в элементах каркаса ребристо-кольцевого купола в процессе монтажа рассматриваемыми способами на разных этапах для элементов меридиональных ребер и колец на рис. 8–11 представлены поярусные диаграммы степени использования прочности по отношению выявленных абсолютных величин напряжений к расчетному сопротивлению стали –  $|\sigma_i|/R_y$ .

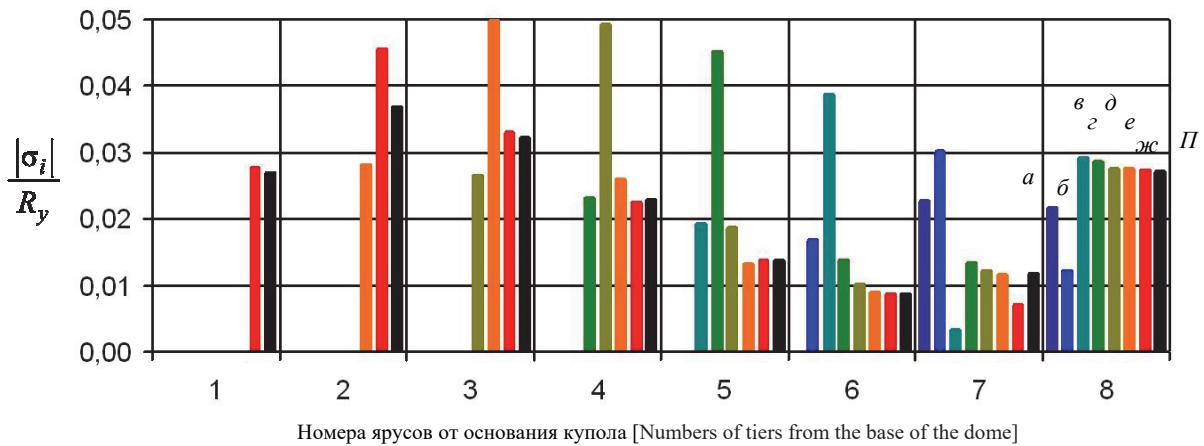


**Рис. 8.**  $|\sigma_i|/R_y$  в поярусных элементах ребер при монтаже каркаса купола подращиванием на разных этапах:

П – проектная схема; а – монтаж 7-го яруса; б – монтаж 6-го яруса; в – монтаж 5-го яруса; г – монтаж 4-го яруса; д – монтаж 3-го яруса; е – монтаж 2-го яруса; ж – монтаж 1-го яруса

**[Figure 8.**  $|\sigma_i|/R_y$  in the elements of tier ribs at different stages of the “top-down” assembly of the framework of the dome:

П – design scheme; а – installation of the 7<sup>th</sup> tier; б – installation of the 6<sup>th</sup> tier; в – installation of the 5<sup>th</sup> tier; г – installation of the 4<sup>th</sup> tier; д – installation of the 3<sup>rd</sup> tier; е – installation of the 2<sup>nd</sup> tier; ж – installation of the 1<sup>st</sup> tier]

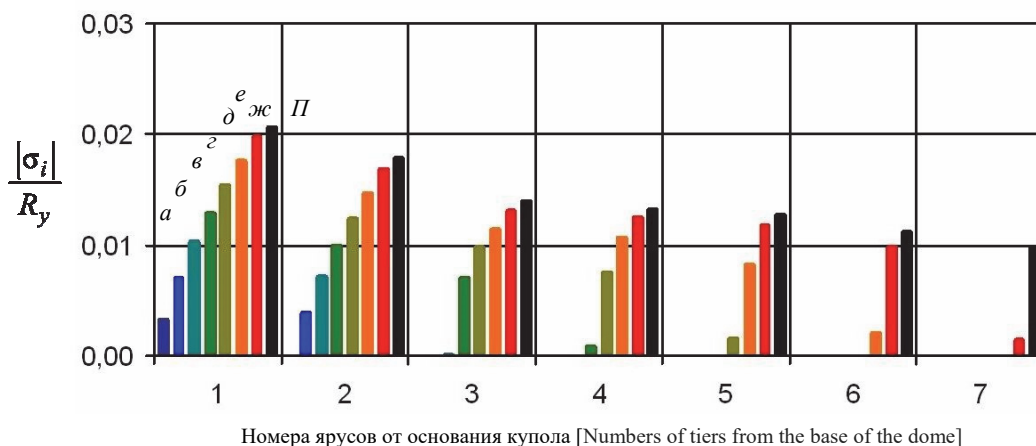


**Рис. 9.**  $|\sigma_i|/R_y$  в поярусных элементах колец при монтаже каркаса купола подращиванием на разных этапах:

П – проектная схема; а – монтаж 7-го яруса; б – монтаж 6-го яруса; в – монтаж 5-го яруса; г – монтаж 4-го яруса; д – монтаж 3-го яруса; е – монтаж 2-го яруса; ж – монтаж 1-го яруса

**[Figure 9.**  $|\sigma_i|/R_y$  in the tier elements of rings at different stages of the “top-down” installation of the framework of the dome:

П – design scheme; а – installation of the 7<sup>th</sup> tier; б – installation of the 6<sup>th</sup> tier; в – installation of the 5<sup>th</sup> tier; г – installation of the 4<sup>th</sup> tier; д – installation of the 3<sup>rd</sup> tier; е – installation of the 2<sup>nd</sup> tier; ж – installation of the 1<sup>st</sup> tier]

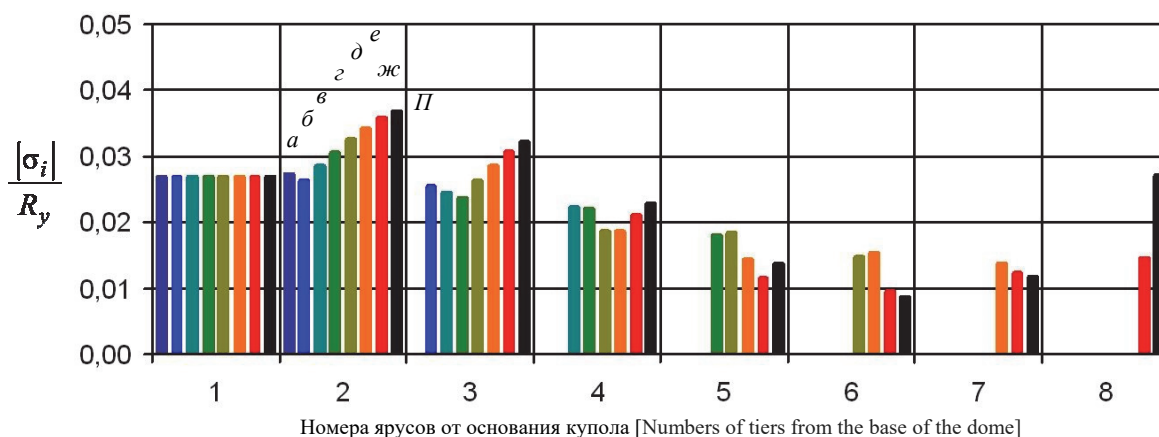


**Рис. 10.**  $|\sigma_i|/R_y$  в поярусных элементах ребер при монтаже каркаса купола наращиванием на разных этапах:

П – проектная схема; а – монтаж 1-го яруса; б – монтаж 2-го яруса; в – монтаж 3-го яруса; г – монтаж 4-го яруса; д – монтаж 5-го яруса; е – монтаж 6-го яруса; ж – монтаж 7-го яруса

**[Figure 10.**  $|\sigma_i|/R_y$  in the tier elements of ribs at different stages of the “bottom-up” assembly of the framework of the dome:

П – design scheme; а – installation of the 1<sup>st</sup> tier; б – installation of the 2<sup>nd</sup> tier; в – installation of the 3<sup>rd</sup> tier; г – installation of the 4<sup>th</sup> tier; д – installation of the 5<sup>th</sup> tier; е – installation of the 6<sup>th</sup> tier; ж – installation of the 7<sup>th</sup> tier]



**Рис. 11.**  $|\sigma_i|/R_y$  в поярусных элементах колец при монтаже каркаса купола наращиванием на разных этапах:

П – проектная схема; а – монтаж 1-го яруса; б – монтаж 2-го яруса; в – монтаж 3-го яруса; г – монтаж 4-го яруса; д – монтаж 5-го яруса; е – монтаж 6-го яруса; ж – монтаж 7-го яруса

**[Figure 11.**  $|\sigma_i|/R_y$  in the tier elements of rings at different stages of the “bottom-up” assembly of the framework of the dome:

П – design scheme; а – installation of the 1<sup>st</sup> tier; б – installation of the 2<sup>nd</sup> tier; в – installation of the 3<sup>rd</sup> tier; г – installation of the 4<sup>th</sup> tier; д – installation of the 5<sup>th</sup> tier; е – installation of the 6<sup>th</sup> tier; ж – installation of the 7<sup>th</sup> tier]

Все диаграммы характеризуются отсутствием графических столбиков на большинстве ярусов вследствие того, что на данном этапе монтажа этого элемента каркаса (ребра или кольца) еще нет в смонтированной части купольного каркаса. Поскольку монтаж подращиванием начинается от 7-го яруса, то на последнем этапе монтажа (1-го яруса) 7-й ярус будет насчитывать 7 графических монтажных столбиков и 1 проектный. Монтаж же наращиванием, наоборот, начинается от 1-го яруса, поэтому на последнем этапе монтажа (7-го яруса) 1-й ярус будет насчитывать 7 графических монтажных столбиков

и 1 проектный. Наличие 8-го яруса в диаграммах для кольцевых элементов (рис. 9, 11), как и в графиках (рис. 5, 7), связано с монтажными усилиями в 8-м кольце купольного каркаса.

Диаграммы на рис. 8 и 9 свидетельствуют о том, что в процессе монтажа способом подращивания в поярусных элементах ребер и колец купольного каркаса происходят значительные изменения напряжений, причем намного превышающие проектные значения. В элементах меридиональных ребер напряжения достигают 3 % прочности при монтаже 4-го яруса купольного каркаса (рис. 8),

а максимальные проектные – только 2,1 %. В элементах колец напряжения достигают 5 % прочности при монтаже 2-го яруса купольного каркаса (рис. 9), а максимальные проектные – только 3,7 %.

Диаграммы на рис. 10 и 11 свидетельствуют о том, что в процессе монтажа способом наращивания в поярусных элементах ребер и колец купольного каркаса также происходят изменения напряжений, но их величины не превосходят проектные значения. В элементах меридиональных ребер напряжения достигают 2 % прочности при монтаже 7-го яруса купольного каркаса (рис. 10) при максимальных проектных – 2,1 %. В элементах колец напряжения достигают 3,6 % прочности при монтаже 7-го яруса купольного каркаса (рис. 11), что близко к максимальным проектным – 3,7 %.

### Выводы

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы.

В процессе возведения большепролетных металлических куполов в сечениях конструктивных элементов их каркасов неизбежно появление монтажных напряжений.

Напряженное состояние в элементах каркаса ребристо-кольцевого купола в процессе монтажа формируется по-разному при различных способах возведения и с отклонениями от напряженного состояния проектной схемы.

Напряжения в кольцевых элементах каркаса при монтаже характеризуются резкими скачками величин относительно проектных значений с изменениями характера в схеме «сжатие – растяжение».

Формирование начального напряженного состояния каркаса ребристо-кольцевого купола полусферического очертания при монтаже способом наращивания происходит спокойнее по сравнению с монтажом способом подрачивания и характеризуется меньшими напряжениями.

При проектировании и выборе способа возведения каркаса ребристо-кольцевого купола полусферического очертания большого пролета следует производить его расчет на монтажные напряженные состояния.

При выборе способа возведения каркаса ребристо-кольцевого купола полусферического очертания предпочтение следует отдавать монтажу наращиванием или навесным способом.

Необходимо проведение исследований по оценке степени влияния монтажных напряженных состояний в конструктивных элементах каркасов большепролетных металлических куполов на их эксплуатационную надежность.

### Список литературы

1. Тур В.И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности. М.: АСВ, 2004. 96 с.
2. Гохарь-Хармандарян И.Г. Большепролетные купольные здания. М.: Стройиздат, 1978. 150 с.
3. Кривошапко С.Н. Металлические ребристо-кольцевые и сетчато-стержневые оболочки XIX – первой половины XX веков // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 6. С. 4–15.
4. Металлические конструкции: справочник проектировщика: в 3 т. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений / под общ. ред. В.В. Кузнецова; ЦНИИпроектстальконструкция имени Н.П. Мельникова. М.: АСВ, 1998. 512 с.
5. Торкатюк В.И. Монтаж конструкций большепролетных зданий. М.: Стройиздат, 1985. 170 с.
6. Гофштейн Г.Е., Ким В.Г., Нищев В.Н., Соколова А.Д. Монтаж металлических и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 2004. 528 с.
7. 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.
8. 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.
9. Mukaiyama Youichi, Fujino Terumasa, Kuroiwa Yoshihiko, Ueki Takashi. 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, Spain. 2009. Pp. 1951–1962.
10. 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.
11. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. К.: Факт, 2005. 344 с.
12. Chandiwala Anuj. Analysis and design of steel dome using software // International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET). 2014. Vol. 3. Issue 3. Pp. 35–39.
13. Jadhav H.S., Patil Ajit S. Parametric Study of Double Layer Steel Dome with Reference to Span to Height Ratio // International Journal of Science and Research (IJSR). 2013. Vol. 2. Issue 8. Pp. 110–118.
14. Handruleva A., Matuski V., Kazakov K. Combined Mechanisms of Collapse of Discrete Single-Layer Spherical Domes // Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA). 2012, December. Vol. 1. Issue 1. Pp. 19–27.
15. Amjatha Makkar, Sumayya Abbas, Muhammed Haslin S.M. Finite Element Analysis of Diamatic, Schwedler and Diamatic-Schwedler Hybrid Domes // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2016. Vol. 39. No. 1. Pp. 57–62.

16. Chacko P., Dipu V.S., Manju P.M. Finite Element Analysis of Ribbed Dome // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 2014. Pp. 25–32.

17. Merilmol Eldhose, Rajesh A.K., Ramadass S. Finite Element Analysis and Parametric Study of Schwedler Dome Using ABAQUS Software // International Journal

of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2015. Vol. 28. No.7. Pp. 333–338.

18. Nabeel Abdulrazzaq Jasim, Ihab Sabri Saleh, Saddam Khalaf Faleh. Structural Analysis of Ribbed Domes Using Finite Element Method // International Journal of Civil Engineering Research. 2017. Vol. 8. No. 2. Pp. 113–130.

RESEARCH PAPER

## Changes in the stressed state of the framework of the metal ribbed-ring dome during the assembly process

Evgeny V. Lebed

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337, Russian Federation  
evglebed@mail.ru

### Article history:

Received: June 19, 2019

Revised: July 23, 2019

Accepted: July 28, 2019

### Abstract

**Aims of research.** To analyze the stress state of the metal structures of the ribbed-ring dome of a hemispherical shape during the assembly process of the dome frame in two fundamentally different ways – “top-down” and “bottom-up”. Since different design schemes arise at different stages of assembly of the dome frame, different assembly forces result in their structural elements. To demonstrate how assembly forces lead to the tension state of a ribbed-ring dome that is transformed during the construction process. To perform the analysis of the stress states of the considered assembly methods and to present their evaluation. **Methods.** A computer model of a metal ribbed-ring dome made of steel I-beams with rigid joints has been developed. Several additional assembly models of an incomplete frame have been created for studying the considered assembly at different stages. Computer calculations for the effect of its self-weight were made for each assembly model of the dome frame. As a result of the calculations, the stresses in the structural elements of the frames of the assembly schemes were determined, which were compared with similar stresses resulting from the self-weight in the frame of the design scheme. **Results.** Diagrams of changes in the stress state of structural elements of a metal ribbed-ring dome are presented. The efficiency of use of steel strength at different stages of installation is also shown in the diagrams. A comparative assessment is given for the stress conditions due to the assembly methods under consideration. The inevitability of installation stresses is noted and the most efficient assembly method of installation is chosen.

**Keywords:** ribbed-ring dome; metal frame; structural scheme; methods of construction; assembly of structures; computer model; stresses in the elements

### For citation

Lebed E.V. (2019). Changes in the stressed state of the framework of the metal ribbed-ring dome during the assembly process. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(4), 278–290. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-278-290>

### References

1. Tur V.I. (2004). *Kupol'nye konstruktsii: formoobrazovanie, raschet, konstruirovaniye, povysheniye effektivnosti [Dome Structures: Morphogenesis, Analysis, Design, Increase in Effectiveness]*. Moscow, ASV Publ., 96. (In Russ.)

2. Gokhar'-Harmadaryan I.G. (1978). *Bol'sheproletnyye kupol'nye zdaniya [Wide-Span Dome Buildings]*. Moscow, Stroyizdat Publ., 150. (In Russ.)

3. 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.

4. Torkatyuk V.I. (1985). *Montazh konstruktsiy bol'sheproletnykh zdaniy [Installation of Structures of Large-Span Buildings]*. Moscow, Stroyizdat Publ., 170. (In Russ.)

5. Kuznetsov V.V. (ed.). (1998). *Metallicheskie konstruktsii. T. 2. Stal'nye konstruktsii zdaniy i sooruzheniy. Spravochnik proektirovshchika [Metal Structures. Vol. 2. Steel Structures of Buildings and Constructions. Reference Book for Designer]*. Moscow, ASV Publ., 512. (In Russ.)

6. Gofshteyn G.E., Kim V.G., Nishchev V.N., Sokolova A.D. (2004). *Montazh metallicheskikh i zhelezobetonnykh konstruktsiy [Installation of Metal and Reinforced Concrete Structures]*. Moscow, Stroyizdat Publ., 528. (In Russ.)

7. 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. (In Russ.)

Evgeny V. Lebed, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Metal and Wooden Structures.

8. 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. (In Russ.)
9. Mukaiyama Youichi, Fujino Terumasa, Kuroiwa Yoshihiko, Ueki Takashi. (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, Valencia, Spain*, 1951–1962.
10. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A. (2004). *SCAD Office. Vychislitel'ny kompleks SCAD [SCAD Office. Computer system SCAD]*. Moscow, ASV Publ., 592 (In Russ.)
11. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. (2005). *Komp'uternye modeli konstruksiy [Computer models of structures]*. Kiev, Fakt Publ., 344. (In Russ.)
12. Chandiwala Anuj. (2014). Analysis and design of steel dome using software. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 3(3), 35–39.
13. Jadhav H.S., Patil Ajit S. (2013). Parametric Study of Double Layer Steel Dome with Reference to Span to Height Ratio. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2(8), 110–118.
14. Handruleva A., Matuski V., Kazakov K. (2012). Combined Mechanisms of Collapse of Discrete Single-Layer Spherical Domes. *Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA)*, 1(1), 19–27.
15. Amjatha Makkar, Sumayya Abbas, Muhammed Haslin S.M. (2016). Finite Element Analysis of Diamatic, Schwedler and Diamatic-Schwedler Hybrid Domes. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 39(1), 57–62.
16. Chacko P., Dipu V.S., Manju P.M. (2014). Finite Element Analysis of Ribbed Dome. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 25–32.
17. Merilmol Eldhose, Rajesh A.K., Ramadass S. (2015). Finite Element Analysis and Parametric Study of Schwedler Dome Using ABAQUS Software. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 28(7), 333–338.
18. Nabeel Abdulrazzaq Jasim, Ihab Sabri Saleh, Saddam Khalaf Faleh. (2017). Structural Analysis of Ribbed Domes Using Finite Element Method. *International Journal of Civil Engineering Research*, 8(2), 113–130.