

DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-2-111-121  
УДК 624.074.2:624.014:693.8

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Напряженное состояние меридиональных ребер металлического купола на разных этапах навесного монтажа

**Е.В. Лебедь\***, **В.П. Вершинин**Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, *Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26*

\*evglebed@mail.ru

### История статьи:

Поступила в редакцию: 31 января 2020 г.

Доработана: 04 марта 2020 г.

Принята к публикации: 15 марта 2020 г.

### Аннотация

**Цель.** Выполнить анализ напряженного состояния меридиональных ребер металлического ребристо-кольцевого купола на разных стадиях навесного монтажа его каркаса. Купол имеет полусферическую форму и собирается из отдельных элементов от опорного контура к вершине. Из-за разного наклона элементов меридиональных ребер на разных ярусах в процессе монтажа изменяется их напряженное состояние. Выяснялось, как навесной монтаж металлического купола отражается на напряженном состоянии его меридиональных ребер. Задачей исследования являлось установление закономерности изменения напряженного состояния меридионального ребра с монтажом каждого вышерасположенного яруса купольного каркаса. **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 напряжений в ребрах купола на разных стадиях навесного монтажа. Для каждой монтажной модели купольного каркаса выполнены компьютерные расчеты на действие собственного веса. В результате расчетов определены напряжения в меридиональных ребрах каркаса монтажных схем, которые сравнивались с аналогичными напряжениями в каркасе проектной схемы. **Результаты.** Представлены графики изменения напряженного состояния меридионального ребра металлического купола по стадиям навесного монтажа. Показаны диаграммы изменения степени использования прочности стали на разных стадиях монтажа. Дана оценка напряженным состояниям при навесном монтаже купольного каркаса. Отмечены неизбежность монтажных напряжений при навесном монтаже и их влияние на надежность купола.

**Ключевые слова:** ребристо-кольцевой купол, металлический каркас, навесной монтаж, напряженное состояние, компьютерная модель, напряжения в ребрах

### Для цитирования

Лебедь Е.В., Вершинин В.П. Напряженное состояние меридиональных ребер металлического купола на разных этапах навесного монтажа // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 2. С. 111–121. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-111-121>

### Введение

Каркасы металлических большепролетных куполов представляют собой пространственные стержневые системы. Это создает необходимую жесткость и надежность куполов при использовании в каче-

стве покрытий зданий. Благодаря экономичности расхода металла купола занимают ведущее место среди выпуклых пространственных конструкций [1; 2]. Купола обладают выразительным внешним обликом и имеют большое распространение в строительной практике по всему миру [3].

Большепролетные купольные покрытия не являются на месте строительства целиком. Этому предшествует длительный процесс возведения, во время которого они постепенно приобретают свою реальную конструктивную и геометрическую форму [4; 5]. В процессе монтажа сначала появляются

**Лебедь Евгений Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; eLIBRARY SPIN-код: 5297-2700.

**Вершинин Владимир Петрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций. eLIBRARY AuthorID: 2876.

© Лебедь Е.В., Вершинин В.П., 2020



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

лишь отдельные фрагменты купольного каркаса. Затем эти фрагменты постепенно увеличиваются путем добавления все новых и новых конструктивных элементов купола. Только по завершении монтажа купольного каркаса образуется полная конструктивная и расчетная схема купольного покрытия. Монтаж купола сопровождается непрерывным преобразованием разных по сложности конструктивных систем. На разных этапах монтажа в неполных каркасах возникают разные расчетные схемы, отличающиеся от проектной. На них еще нет ограждающих конструкций, но есть нагрузки от собственного веса каркаса, которые создают напряженно-деформированное состояние в его элементах [5; 6]. Отметим также, что разные расчетные схемы характеризуются также и различной нагрузкой.

На способ монтажа куполов влияют конструктивное решение их каркасов, пролет и высота. При этом способ возведения выбирается с учетом размеров его отдельных элементов и их возможности воспринимать монтажные нагрузки [7; 8]. Способ монтажа определяет выбор подъемно-транспортных машин и механизмов. От вида способа монтажа зависят технологичность и продолжительность возведения купола.

Большое количество купольных металлических покрытий построено с применением разных систем временных опор [8]. Обычно подобным образом возводятся относительно невысокие или пологие купола [9]. В высоких или крутых куполах может быть применен навесной монтаж, когда в процессе возведения совсем не используются временные опоры. Но в таких куполах должно быть обеспечено жесткое сопряжение элементов каркаса друг с другом. Монтаж навесным способом осуществляется от основания, когда сначала устраивается опорный контур, а затем устанавливаются ярус за ярусом остальные конструктивные элементы купольного каркаса.

В обоих случаях конструктивные элементы каркаса прикрепляются к узлам собранной ранее части купольного каркаса. Так как все элементы обладают собственным весом, то прикрепление элементов каждого следующего яруса вызывает в частично собранной части купольного каркаса напряженное состояние. На каждой стадии возведения образуется монтажная расчетная схема. Каждая монтажная расчетная схема купольного каркаса отличается как от проектной схемы каркаса полностью смонтированного купола, так и от предыдущих монтажных схем. Поэтому в процессе возведения купола в элементах каждой монтажной расчетной схемы возникают напряжения, отличающиеся от напряжений в элементах каркаса проектной схемы, а также предыдущих монтажных схем.

При навесном монтаже работа конструктивных элементов или фрагментов купольного каркаса похожа на работу консолей. Это сопряжено с образованием относительно больших изгибающих моментов в сечениях в местах прикрепления их к уже собранной части купольного каркаса. Следовательно, узловые сопряжения конструкций в каркасе и сечения самих элементов должны обладать необходимой изгибной жесткостью. Поэтому в одноярусных купольных каркасах в качестве стержневых элементов используются только двутавры [8].

## 1. Исследование

При навесном монтаже ребристо-кольцевых куполов наибольшие напряжения испытывают меридиональные ребра. С целью выяснения характера напряженного состояния меридиональных ребер металлического ребристо-кольцевого купола на разных стадиях навесного монтажа его каркаса были выполнены специальные компьютерные исследования. Они проводились на компьютерных моделях купольного каркаса как пространственных стержневых систем [10; 11] в программе SCAD. Напряжения определялись по величинам внутренних усилий в стержнях меридиональных ребер купольного каркаса.

Объектом исследования служил каркас одноярусного ребристо-кольцевого купола полусферической формы из 30 секторов, изображенного на рис. 1. Узлы каркаса купола расположены на сферической поверхности с радиусом кривизны 20 м, пролетом 40 м и высотой 19,83 м. Во всех узлах купольного каркаса приняты жесткие сопряжения между элементами.

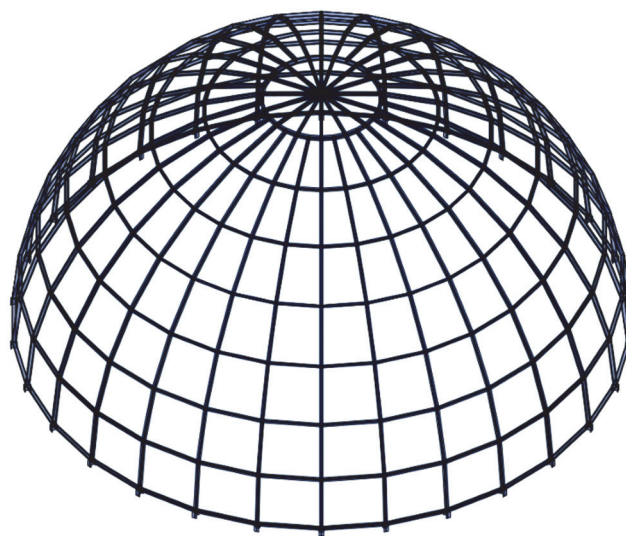
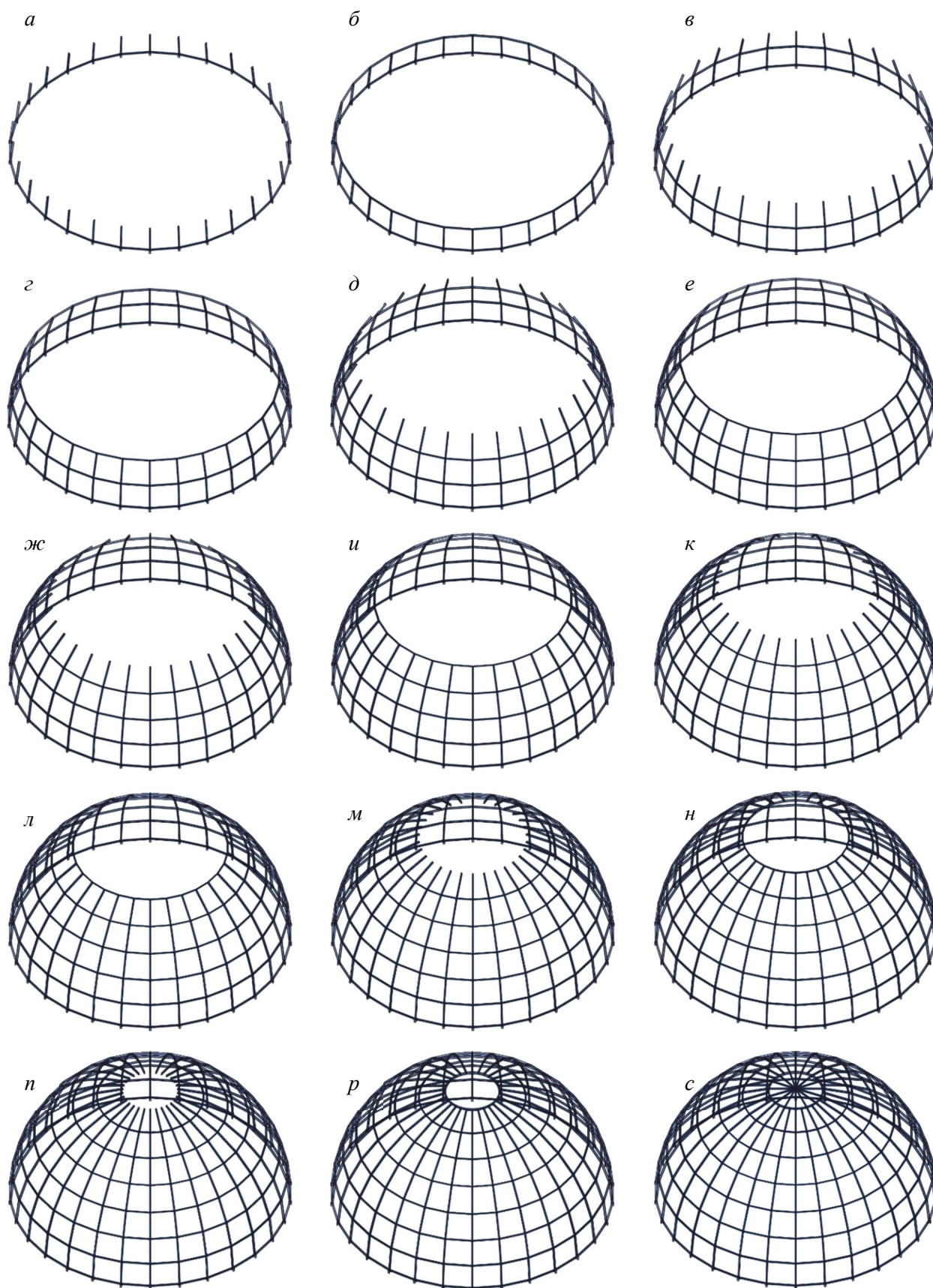


Рис. 1. Каркас ребристо-кольцевого купола  
[Figure 1. The skeleton of the ribbed ring-shape dome]



**Рис. 2.** Этапы монтажа каркаса исследуемого ребристо-кольцевого купола:  
*a* – 1; *б* – 2; *в* – 3; *г* – 4; *д* – 5; *е* – 6; *ж* – 7; *и* – 8; *к* – 9; *л* – 10; *м* – 11; *н* – 12; *п* – 14; *с* – 15  
[Figure 2. The stages of the ribbed ring-shape dome skeleton erection process:  
*a* – 1; *б* – 2; *в* – 3; *г* – 4; *д* – 5; *е* – 6; *ж* – 7; *и* – 8; *к* – 9; *л* – 10; *м* – 11; *н* – 12; *п* – 14; *с* – 15]

На основе приближенного расчета купола проектной схемы на несимметричные нагрузки ребра назначены из стального 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 (рис. 1).

Монтаж купола выполняется отдельными стержневыми элементами от опорного контура к вершине по ярусам. Предполагалось, что опорный контур уже закреплен у основания. Сначала устанавливаются элементы меридиональных ребер по всему контуру, затем на них устанавливаются кольцевые элементы. Для исследования напряженного состояния ребристо-кольцевого купола рассматривались промежуточные монтажные этапы купольного каркаса. Каждый этап подразумевал установленные по всему контуру элементы. Таких этапов с позиции монтажа в рассматриваемом купольном каркасе насчитывается четырнадцать (рис. 2).

Например, сначала выполняется монтаж стержней меридиональных ребер первого яруса (рис. 2, а), затем на них устанавливают кольцевые стержни (рис. 2, б). Такой же процесс повторяется для 2-го яруса (рис. 2, в, г), затем для третьего (рис. 2, д, е), четвертого (рис. 2, ж, и), пятого (рис. 2, к, л), ше-

стого (рис. 2, м, н) и седьмого (рис. 2, п, р). На пятнадцатом этапе (рис. 2, с) производится монтаж звездообразной вершины, который уже не отражается на монтажном напряженном состоянии меридиональных ребер. Поэтому исследование производилось на основе статического расчета компьютерных моделей каркаса каждой из четырнадцати монтажных схем промежуточных стадий возведения и проектной схемы купола на действие нагрузки только от собственного веса элементов каркаса.

Установка элементов меридиональных ребер как консолей под наклоном вызывает появление значительных изгибающих моментов. Изгибающие моменты меридионального ребра на каждом этапе монтажа изменяются. Из-за разного наклона элементов меридиональных ребер на разных ярусах в процессе монтажа изменяются и величины моментов, что отражается на их напряженном состоянии.

Общая картина изменений изгибающих моментов по длине меридионального ребра показана на рис. 3 для монтажа элементов ребер и на рис. 4 для монтажа колец. Из этих рисунков видно, что значительные «всплески» моментов на меридиональном ребре наблюдаются на разных этапах монтажа на консольном устанавливаемом элементе меридионального ребра и на предшествующем консольному. Причем по мере монтажа следующих ярусов «всплески» перемещаются на них, а на предыдущих ярусах исчезают.

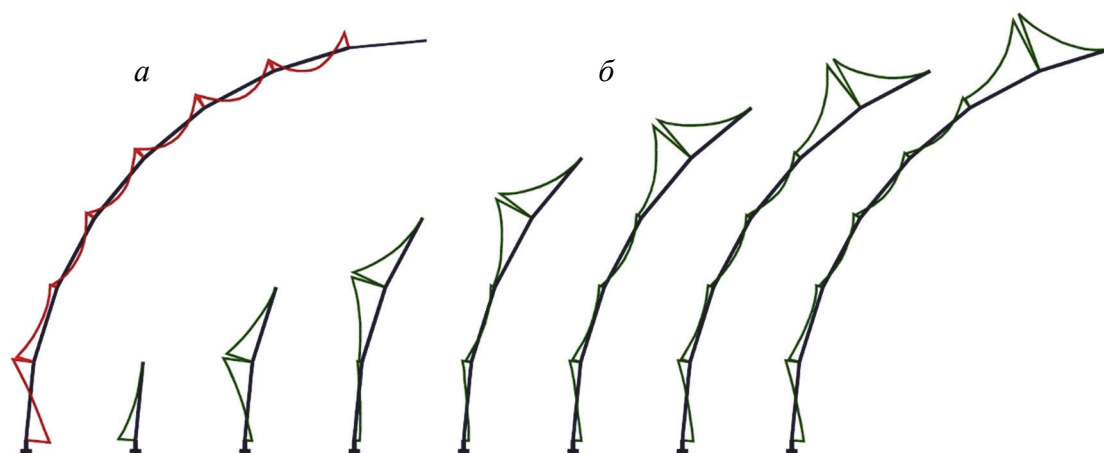


Рис. 3. Эпюры моментов  $M_x$  в меридиональном ребре купола проектной схемы (а) и на разных этапах (б) монтажа при установке стержней ребра

[Figure 3. Meridional rib  $M_x$  moment diagrams for (a) the design model and (b) the models correspondent to an instant of rib elements mounting at different erection stages]

Такой ярко выраженной картины изменения изгибающих моментов на разных этапах монтажа по длине меридионального ребра при поярусной установке колец не наблюдается.

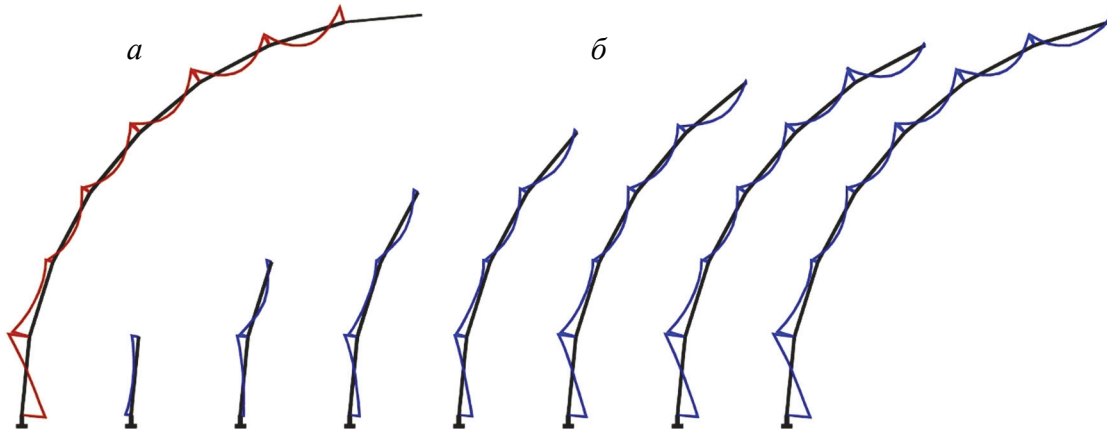
Изгибающие моменты в вертикальной плоскости при монтаже элементов ребер в консольном и предыдущем стержнях  $M_{xM,i}$ , начиная с монта-

жа второго яруса, по величине превышают проектные  $M_{хп,i}$  в несколько раз (рис. 5).

Изгибающие же моменты в вертикальной плоскости при монтаже колец в консольном и предыдущем стержнях  $M_{хм,i}$  достигают величины проектных  $M_{хп,i}$  только начиная с монтажа третьего

яруса (рис. 6), и самые большие по величине моменты возникают с противоположной стороны ребер.

Установка консольных элементов меридиональных ребер приводит к появлению значительных деформаций по сравнению с перемещениями каркаса проектной схемы.



**Рис. 4.** Эпюры моментов  $M_x$  в меридиональном ребре купола проектной схемы (а) и на разных этапах (б) монтажа при установке колец  
 [Figure 4. Meridional rib  $M_x$  moment diagrams for (a) the design model and (б) the models correspondent to an instant of rings mounting at different erection stages]

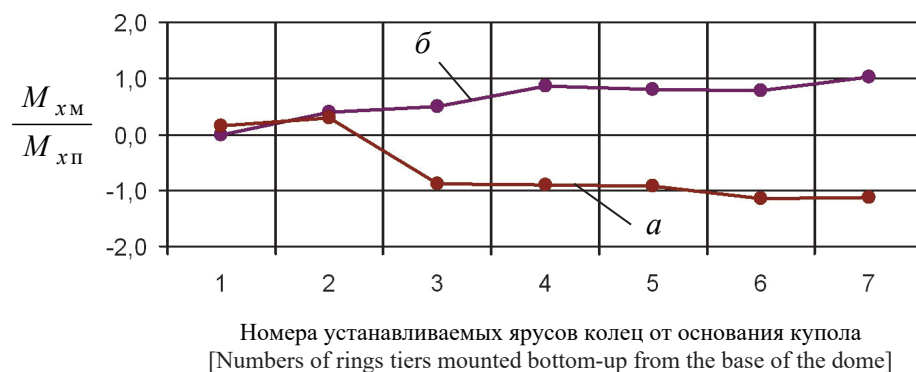


**Рис. 5.** Отношение  $M_{хм,i}/M_{хп,i}$  в поярусных элементах ребер при установке консольных ребер:

$M_{хм,i}$  – монтажный момент;  $M_{хп,i}$  – проектный момент; а – консольный стержень; б – предыдущий стержень

**[Figure 5.  $M_{хм,i}/M_{хп,i}$  ratio in tier ribs elements at an instant of cantilever ribs mounting:**

$M_{хм,i}$  – assembly moment;  $M_{хп,i}$  – design moment; а – cantilever rod; б – preceding rod]

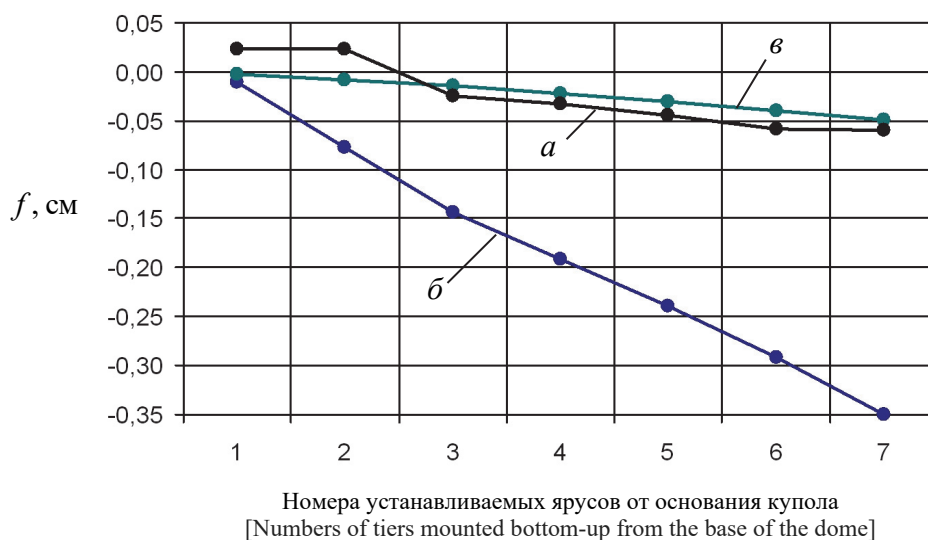


**Рис. 6.** Отношение  $M_{xм,i} / M_{xп,i}$  в поярусных элементах ребер при установке крайних колец:

$M_{xм,i}$  – монтажный момент;  $M_{xп,i}$  – проектный момент; *a* – консольный стержень; *б* – предыдущий стержень

**[Figure 6.**  $M_{xм,i} / M_{xп,i}$  ratio in tier ribs elements at an instant of edge rings mounting:

$M_{xм,i}$  – assembly moment;  $M_{xп,i}$  – design moment; *a* – cantilever rod; *б* – preceding rod]



**Рис. 7.** Перемещения по нормали крайних узлов меридиональных элементов:

*a* – проектная схема; *б* – монтаж ребер; *в* – монтаж колец

**[Figure 7.** Normal displacements of meridional elements edge parts:

*a* – design scheme; *б* – ribs mounting; *в* – rings mounting]

На рис. 7 приведены графики изменения деформаций  $f = \sqrt{f_v^2 + f_h^2}$ , условно названных «нормальными», крайних узлов монтажных схем и аналогичных им узлов проектной схемы. Эти графики показывают, что при установке консолей меридиональных ребер деформации увеличены по сравнению с проектной схемой в этих же узлах в несколько раз: в 4,3 раза на 2-м ярусе и в 5,9 раза на 7-м ярусе.

Вместе с тем из графиков рис. 7 видно, что деформация от установленных колец практически не отличается от проектной деформации. Можно пред-

положить, что после контурного замыкания колец в силу пространственной работы нижней части купольного каркаса его деформации почти не изменятся в силу малости нагрузки от собственного веса.

Консольные деформации меридиональных ребер при навесном монтаже купольного каркаса из-за постоянного действия гравитационных сил никуда не исчезают. При установке всех элементов колец с контурным замыканием они фактически фиксируются в своем естественном при монтаже положении, так как кольца не могут позволить соединенным ими узлам вернуться в проектное по-

ложение. А это означает, что полученные при консольном изгибе напряжения в меридиональных ребрах сохраняются.

Следует выяснить, насколько существенны эти напряжения и могут ли они повлиять на напряженное состояние каркаса в процессе эксплуатации купола.

Анализ работы стержневых систем купольного типа на компьютерных расчетных моделях проводился многими исследователями. Например, изучалось напряженное состояние 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], при включении ограждений ячеек в работу [18]. Начало авторским исследованиям было положено при сравнении работы купольного каркаса способами подрачивания и нарачивания [19].

## 2. Результаты

Выполнен анализ напряженного состояния в монтажных и проектной схемах, и эти состояния сопоставлены друг с другом. При работе купольного каркаса проектной схемы и всех монтажных схем на действие собственного веса их элементы находятся в состоянии действия продольной силы с изгибом. При этом меридиональные ребра испытывают сжатие с изгибом как в проектной, так и в монтажных схемах. Нормальные напряжения в каждом  $i$ -ом элементе меридионального ребра вычисляются по формуле

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i} \pm \frac{M_{x,i}}{W_{x,i}} \pm \frac{M_{y,i}}{W_{y,i}}. \quad (1)$$

Поскольку от симметричной вертикальной нагрузки  $M_{y,i} = 0$ , то можно записать

$$\sigma_i = \sigma_{A,i} \pm \sigma_{x,i}. \quad (2)$$

Продольная сила и в проектной схеме, и в монтажной схеме возникает от веса элементов, которые не изменяются в процессе монтажа. Происходит лишь суммирование долевой части весов тех элементов, которые оказывают на рассматриваемый элемент свое влияние. Это учитывается расчетом каркаса проектной схемы.

Изгибающий же момент конкретного элемента меридионального ребра зависит от расчетной схемы, которая в процессе монтажа изменяется и

в начальный момент монтажа как консоли существенно отличается от проектной. Консольный изгиб элементов меридиональных ребер при монтаже вызывает появление дополнительных по сравнению с проектным изгибом напряжений. Для определения величин таких напряжений воспользуемся отношением моментов, возникающих в консольной схеме, к моментам, возникающим в проектной схеме, то есть  $M_{xм,i}/M_{xп,i}$  (см. рис. 5). Поскольку всегда известно, какая доля напряжений  $\sigma_{xп,i}$  в ребрах проектной схемы возникает только от изгиба  $M_{xп,i}$ , то напряжения от консольного монтажа ребер можно определить по формуле

$$\sigma_{xм,i} = \frac{M_{xм,i}}{M_{xп,i}} \cdot \sigma_{xп,i}. \quad (3)$$

Напряжения в меридиональных ребрах проектной схемы от изгиба не превышают  $0,14 \text{ кН/см}^2$  и составляют менее 40 % суммарных напряжений от  $N_i$  и  $M_{x,i}$ .

На рис. 8 представлены графики изменения нормальных напряжений по ярусам проектной схемы и монтажных схем на разных этапах. Эти графики свидетельствуют о том, что напряжения от устанавливаемых элементов меридиональных ребер по консольной схеме не только сопоставимы по величине и знаку с напряжениями проектной схемы, но намного превосходят их в верхней части купольного каркаса.

Графики рис. 8 показывают также, что у основания купольного каркаса напряжения от навесного способа возведения минимальны и в несколько раз меньше напряжений проектной схемы. С увеличением высоты монтируемого яруса напряжения в консольных элементах меридиональных ребер возрастают и достигают уровня напряжений проектной схемы уже на четвертом ярусе. При навесном монтаже верхней части купольного каркаса напряжения в устанавливаемых элементах меридиональных ребер более чем в 2,5 раза превосходят напряжения в этих же элементах проектной схемы.

С целью получения сведений об уровне напряжений в меридиональных ребрах купольного каркаса на монтируемых ярусах с установленными консольными элементами ребер или колец по ним в процессе исследования были построены диаграммы степени использования прочностных свойств стали С245 в сравнении с проектной схемой.

На рис. 9 показана диаграмма с отношением напряжений в консольном и предыдущем элемен-

тах к расчетному сопротивлению стали  $|\sigma_i|/R_y$ , умноженному на 100, при поярусном монтаже ребер. На рис. 10 показана диаграмма с отношением

напряжений в консольном и предыдущем элементах к расчетному сопротивлению стали  $|\sigma_i|/R_y$ , умноженному на 100, при поярусном монтаже колец.

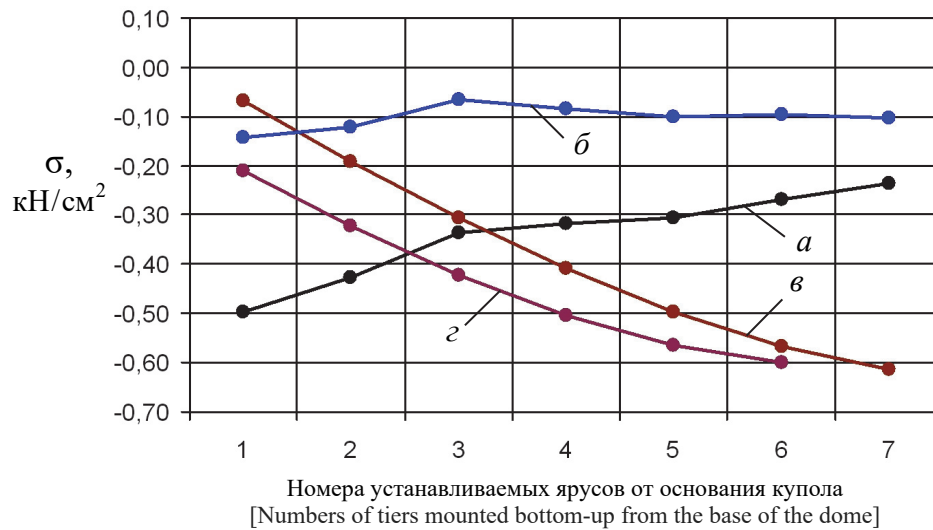


Рис. 8. Сжимающие напряжения  $\sigma_i$  в элементах меридиональных ребер разных схем:

$a$  – проектная в ярусах  $\sigma_i$ ;  $b$  – проектная только от изгиба  $\sigma_{x,i}$ ;

$v$  – монтажная в консоли  $\sigma_{xm,i}$ ;  $z$  – монтажная перед консолью –  $\sigma_{xm,i}$

[Figure 8. Compressive stress  $\sigma_i$  in the meridional ribs elements within different models:

$a$  – design stress  $\sigma_i$  in tiers;  $b$  – bending design stress  $\sigma_{x,i}$ ;

$v$  – assembly stress  $\sigma_{xm,i}$  in the cantilever;  $z$  – assembly stress  $\sigma_{xm,i}$  at the cantilever boundary]

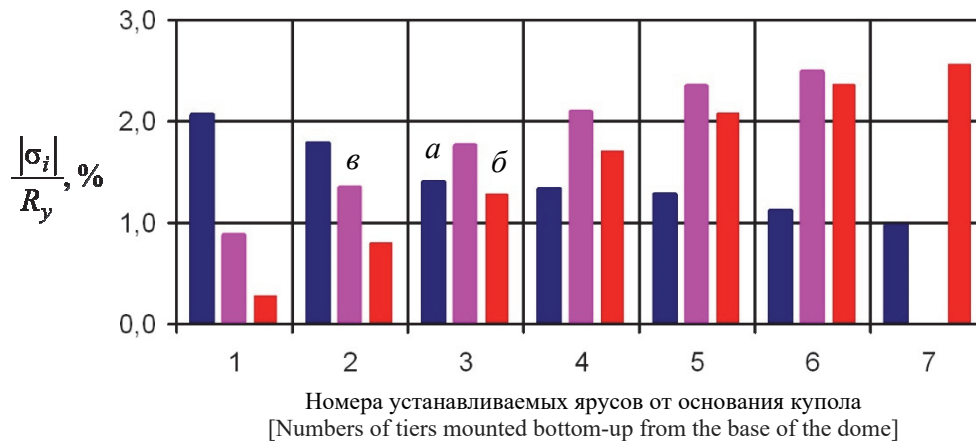


Рис. 9. Отношение  $|\sigma_i|/R_y$  в % в элементах ребер при навесном монтаже после установки ребер:

$a$  – проектная схема;  $b$  – консольный элемент ребра;  $v$  – предыдущий элемент ребра

[Figure 9.  $|\sigma_i|/R_y$  percentage ratio in ribs elements during overhang erection after the ribs mounting:

$a$  – design scheme;  $b$  – rib cantilever element;  $v$  – preceding rib element]

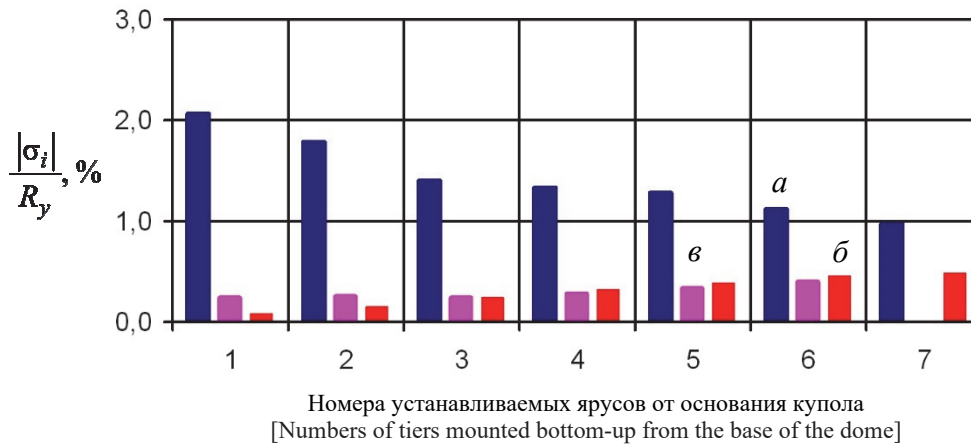
Из этих диаграмм видно, что смонтированные до замкнутого состояния на каждом этапе навесного монтажа кольца практически не влияют на напряженное состояние меридиональных ребер купо-

ла. Выяснилось также, что устанавливаемые как консоли элементы ребер при навесном монтаже металлического купола отражаются на напряженном состоянии меридиональных ребер. Монтажные напря-



жения от консольного изгиба ребер при навесном монтаже сначала небольшие (0,3 %  $R_y$ ) ввиду маленького наклона, а затем увеличиваются к вершине купола и могут достигать 2,5 % прочности

стали. В то же время наиболее нагруженный элемент в нижней части купольного каркаса в проектной схеме в состоянии завершённой сборки испытывает напряжение 2,1 % прочности стали.



**Рис. 10.** Отношение  $|\sigma_i|/R_y$ , в % в элементах ребер при навесном монтаже после установки колец:

*a* – проектная схема; *б* – консольный элемент ребра; *в* – предыдущий элемент ребра

**[Figure 10.**  $|\sigma_i|/R_y$  percentage ratio in ribs elements during overhang erection after the rings mounting:

*a* – design scheme; *б* – rib cantilever element; *в* – preceding rib element]

### Заключение

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы.

В процессе навесного монтажа ребристо-кольцевых большепролетных металлических куполов в меридиональных ребрах их каркасов неизбежно появляются монтажные напряжения.

Основное влияние на возникновение монтажных напряжений оказывают элементы меридиональных ребер, устанавливаемые на монтируемых ярусах по консольной схеме.

Монтажные напряжения от устанавливаемых элементов меридиональных ребер по консольной схеме не только сопоставимы по величине и знаку с напряжениями проектной схемы, но и существенно превосходят их в верхней части купольного каркаса.

При проектировании ребристо-кольцевых куполов большого пролета и выборе навесного монтажа следует производить расчет его каркаса на монтажные напряженные состояния с учетом их влияния на эксплуатационную надежность сооружения.

Наличие монтажных напряжений в меридиональных ребрах большепролетного металлического купола при навесном монтаже не может служить основанием для отказа от навесного монтажа купола, так как такие напряжения присутствуют при любом способе возведения.

Необходимо продолжить исследования напряженных состояний в меридиональных ребрах при навесном монтаже большепролетных металлических куполов и способов их уменьшения.

### 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-го 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; ЦНИИ-проектстальконструкция 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., Ницев 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). India Online. 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. 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.
19. 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.

RESEARCH PAPER

## Stress state of metal dome meridional ribs at different stages of overhang erection process

Evgeny V. Lebed\*, Vladimir P. Vershinin

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

### Article history:

Received: January 13, 2020

Revised: March 04, 2020

Accepted: March 15, 2020

### Abstract

**Research aim.** The aim of the present research was an analysis of a metal ribbed ring-shaped dome metallic ribs stress state at different stages of a skeleton overhang erection process. The considered dome is hemispherical and is assembled bottom-up of individual elements. Due to a varying slope of meridional ribs elements at different relative elevations their stress state changes during mounting. The effect of the overhang erection process onto the stress state of the metal dome meridional ribs has been investigated. The relationship between the stress state of a meridional rib and mounting of each next dome skeleton tier has been established. **Methods.** A mathematical model of the metal ribbed ring-shaped dome assembled of steel H-shaped elements with rigid connections has been developed. Several extra models corresponding to different skeleton erection stages have been also generated to determine stresses in the meridional ribs at these stages. Response of each dome mathematical model under dead-weight load has been simulated. The obtained values of stresses in the meridional ribs within different models have been compared with corresponding design stresses values. **Results.** The dependence of the metal dome meridional rib stress state onto the stages of overhang erection process has been plotted. A degree of utilization of ribs steel strength at different erection stages has been represented by diagrams. An estimation of the dome skeleton stress state during overhang erection has been given. Imminence of assembly stresses during overhang erection and their influence onto dome structural reliability has been pointed out.

**Keywords:** ribbed ring-shaped dome, metal skeleton, overhang erection, stress state, mathematical model, stresses in ribs

### For citation

Lebed E.V., Vershinin V.P. Stress state of metal dome meridional ribs at different stages of overhang erection process. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(2):111–121. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-111-121>. (In Russ.)

Evgeny V. Lebed, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Metal and Wooden Structures; eLIBRARY SPIN-code: 5297-2700.

Vladimir P. Vershinin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Metal and Wooden Structures; eLIBRARY AuthorID: 287683.

## References

1. Tur V.I. *Kupol'nye konstruksyi: formoobrazovanie, raschet, konstruirovaniye, povysheniye effektivnosti* [Dome Structures: Morphogenesis, Analysis, Design, Increase in Effectiveness]. Moscow, ASV Publ.; 2004. (In Russ.)
2. Gokhar'-Harmadaryan I.G. *Bol'sheproletnye kupol'nye zdaniya* [Wide-Span Dome Buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ.; 1978. (In Russ.)
3. Krivoshapko S.N. 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*. 2014;(6):4–15. (In Russ.)
4. Torkatyuk V.I. *Montazh konstruksiy bol'sheproletnykh zdaniy* [Installation of Structures of Large-Span Buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. (In Russ.)
5. Kuznetsov V.V. (Ed.). *Metallicheskie konstruksii. T. 2. Stal'nye konstruksii zdaniy i sooruzheniy: Spravochnik proektirovshchika* [Metal structures. Vol. 2. Steel structures of buildings and constructions: Reference book of the designer]. Moscow, ASV Publ.; 1998. (In Russ.)
6. Gofshcheyn G.E., Kim V.G., Nishchev V.N., Sokolova A.D. *Montazh metallicheskiykh i zhelezobetonnykh konstruksiy* [Installation of Metal and Reinforced Concrete Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ.; 2004. (In Russ.)
7. Lebed E.V., Alukaev A.U. Large-span metal dome roofs and their construction. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018;14(1):4–16. (In Russ.)
8. Lebed E.V. Behavior of the Frames of Large-Span Metal Domes in the Process of their Installation. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018;14(6):481–494. (In Russ.)
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. p. 1951–1962.
10. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A. *SCAD Office. Vychislitel'nyy kompleks SCAD* [Computer system SCAD]. Moscow, ASV Publ.; 2004. (In Russ.)
11. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. *Komp'yuternye modeli konstruksiy* [Computer models of structures]. Kiev, Fakt Publ., 2005. (In Russ.)
12. Chandiwala Anuj. Analysis and design of steel dome using software. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*. 2014;03(03):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). India Online*. 2013;2(8):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;1(1):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;39(1):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)*. 2014:25–32.
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;28(7):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;8(2):113–130.
19. Lebed E.V. 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*. 2019;15(4):278–290. (In Russ.)