



## РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-5-443-454  
 УДК 624.074.2:624.014:693.8

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

### Влияние навесного монтажа на напряженно-деформированное состояние каркаса сетчатого купола

Е.В. Лебедь 

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

✉ [evglebed@mail.ru](mailto:evglebed@mail.ru)

#### История статьи

Поступила в редакцию: 26 августа 2021 г.  
 Доработана: 9 октября 2021 г.  
 Принята к публикации: 12 октября 2021 г.

#### Для цитирования

Лебедь Е.В. Влияние навесного монтажа на напряженно-деформированное состояние каркаса сетчатого купола // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 5. С. 443–454. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-5-443-454>

**Аннотация.** Цель – выполнить анализ напряженно-деформированного состояния конструкций сетчатого купола сферической формы при навесном монтаже. Купол имеет металлический каркас, состоящий из шести повторяющихся секторов с треугольными ячейками сетки. По высоте сетчатый купол насчитывает пять ярусов. Исследование посвящено установлению зависимости напряженно-деформированного состояния полностью собранного каркаса сетчатого купола от монтажа навесным способом. **Методы.** Разработана компьютерная модель каркаса сетчатого купола проектной схемы из стальных двутавров. На ее основе созданы монтажные модели неполного каркаса для разных стадий монтажа. Для всех моделей каркаса сетчатого купола выполнены компьютерные расчеты на действие нагрузки от собственного веса его стержней. В результате расчетов на всех стадиях монтажа определены деформации, внутренние усилия и напряжения в стержнях каркаса, которые сравнивались с проектной схемой. **Результаты.** Получены графики деформаций, диаграммы и графики моментов и напряжений в стержнях купольного каркаса на всех стадиях навесного монтажа. Приведены сравнительные графики монтажных и проектных напряжений в стержнях сетчатого купола. Дана оценка монтажным напряженным состояниям каркаса, отмечена их неизбежность и влияние на начальное напряженное состояние сетчатого купола.

**Ключевые слова:** сетчатый купол, металлический каркас, стержневые элементы, навесной монтаж, компьютерная модель, напряжения в элементах

Лебедь Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0003-3926-8701, eLIBRARY SPIN-код: 5297-2700, Scopus Author ID: 57197822677; [evglebed@mail.ru](mailto:evglebed@mail.ru)

© Лебедь Е.В., 2021



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

# The influence of mounted assembly process on the stress-strain state of the lattice dome frame

Evgeny V. Lebed 

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

✉ evglebed@mail.ru

## Article history

Received: August 26, 2021

Revised: October 9, 2021

Accepted: October 12, 2021

## For citation

Lebed E.V. The influence of mounted assembly process on the stress-strain state of the lattice dome frame. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(5):443–454. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-5-443-454>

**Abstract.** *The aim of the research* – analysis of the stress-strain state of spherical lattice dome structure during mounted assembly process. The dome has a metal frame consisting of six repeating sectors with triangular grid cells. The mesh dome has five tiers in height. The study is devoted to establishing the dependence of the stress-strain state of the fully assembled frame of the lattice dome on the method mounted assembly. *Methods.* A computer model of the frame of the lattice dome made of steel I-beams in its design configuration has been developed. On its basis, assembly models of an incomplete frame for different stages of installation are created. For all models of the lattice dome frame, computer calculations were performed for the effect of the load from the own weight of its bars. As a result of calculations deformations, internal forces and stresses in the frame bars were determined at all stages of assembly, which were compared with those for the design configuration scheme. *Results.* Diagrams of deformations, moments and stresses in the bars of the dome frame at all stages of mounted installation are obtained. Comparative diagrams of installation and design stresses in the bars of the lattice dome are presented. The assessment of the installation stress state of the frame is given, and their inevitability and influence on the initial stress state of the lattice dome are noted.

**Keywords:** lattice dome, metal frame, bar elements, mounted assembly, computer model, stresses in the elements

## Введение

Купола часто применяются в качестве покрытий зданий благодаря выразительному внешнему облику. Каркасы сетчатых металлических куполов представляют собой более жесткие пространственные конструктивные системы по сравнению с ребристо-кольцевыми куполами. Поэтому они экономичнее по расходу металла и предпочтительнее для применения в качестве покрытий зданий при больших пролетах [1–3].

Свою пространственную форму в реальных покрытиях они приобретают в процессе монтажа и в течение длительного времени [4; 5]. Сначала появляются отдельные фрагменты каркасов куполов, затем к ним добавляются новые части, в результате наращивания которых постепенно формируются полноценные покрытия. На разных стадиях монтажа каждого купольного каркаса появляются разные конструктивные и расчетные схемы, испытывающие отличающиеся друг от друга напряженные состояния.

Конструктивные схемы каркасов сетчатых куполов и их пролеты часто определяют способы монтажа их каркасов [6; 7]. На выбор способа монтажа куполов оказывают влияние и размеры конструктивных элементов их каркасов, от которых зависит возможность восприятия монтажных нагрузок. При возведении реальных сетчатых куполов нередко применялся навесной монтаж [6; 7]. Для такого монтажа сопряжения стержневых элементов каркасов в узлах должны быть жесткими.

Данное исследование является развитием серии проведенных ранее исследований на ребристо-кольцевых куполах [8–10]. В сетчатых куполах, так же как и в ребристых, монтаж навесным способом выполняется от опорного контура, когда последовательно устанавливаются стержневые элементы каркасов от нижнего яруса до верхнего. Так же как и в ребристо-кольцевых куполах, после завершения установки стержневых элементов раскосного типа ниже расположенного яруса выполняется установка элементов кольцевого горизонтального контура, распо-

Evgeny V. Lebed, Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3926-8701, eLIBRARY SPIN-code: 5297-2700, Scopus Author ID: 57197822677; evglebed@mail.ru

ложенного выше. Замкнутое кольцо поверх каждого раскосного кругового яруса создает пространственную стержневую систему, включающую все ранее смонтированные ярусы купола. Каждая такая стержневая система на промежуточной стадии монтажа обладает достаточной жесткостью для восприятия монтажных нагрузок.

Так же как и в ребристо-кольцевых куполах, расчетные схемы частично смонтированных каркасов сетчатых куполов на всех стадиях монтажа, воспринимающие собственный вес, отличаются друг от друга и от проектной схемы. Поэтому и напряженное состояние элементов купольных каркасов в монтажных и проектной схемах тоже отличаются. Переход от одной стадии монтажа к другой приводит к преобразованию расчетных схем пространственной стержневой системы купольного каркаса не только из-за появления нового яруса, но и вследствие консольных схем раскосных элементов верхнего яруса. Для кольцевых элементов сетчатого каркаса такое преобразование не приведет к существенным изменениям напряженного состояния, поскольку не происходит изменения их расчетных схем [9].

### Методы

Для анализа напряженного состояния конструкций сетчатого купола при навесном монтаже выполнялось компьютерное исследование. Исследование посвящено установлению влияния монтажа каркаса навесным способом на напряженное состояние полностью собранного сетчатого купола. При этом для каждой стадии навесного монтажа металлического купола создавалась отдельная компьютерная модель.

В качестве объекта исследования принят сетчатый купол сферической формы пролетом 27,5 м и высотой 9,1 м, состоящий из шести повторяющихся секторов с треугольными ячейками, то есть секториально-сетчатый (рис. 1). По высоте сетчатый купол насчитывает пять ярусов, а треугольные ячейки характеризуются похожими по габаритам размерами. Все узлы сопряжения стержневых элементов каркаса между собой жесткие. Элементы купольного каркаса приняты в виде прокатных двутавров I 20Ш1 из стали С245, а их длина варьируется в интервалах 2,9–3,7 м для колец, 3,6–4,5 м для раскосов и 3,2–3,7 м для меридиональных стержней (на границах секторов). Купольный каркас установлен на короткие (0,5 м) стойки из двутавров I 30Ш1.

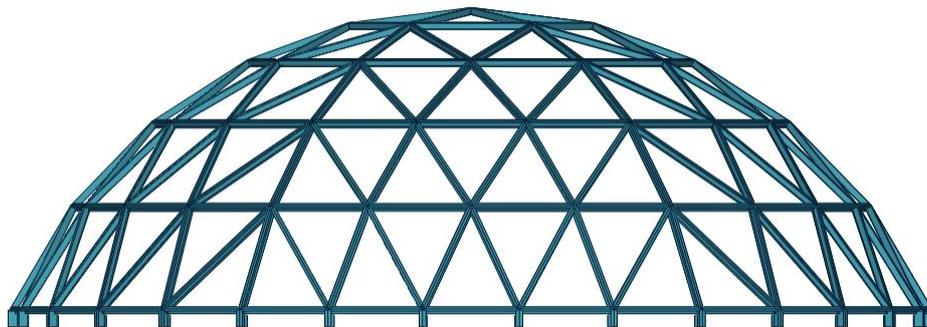
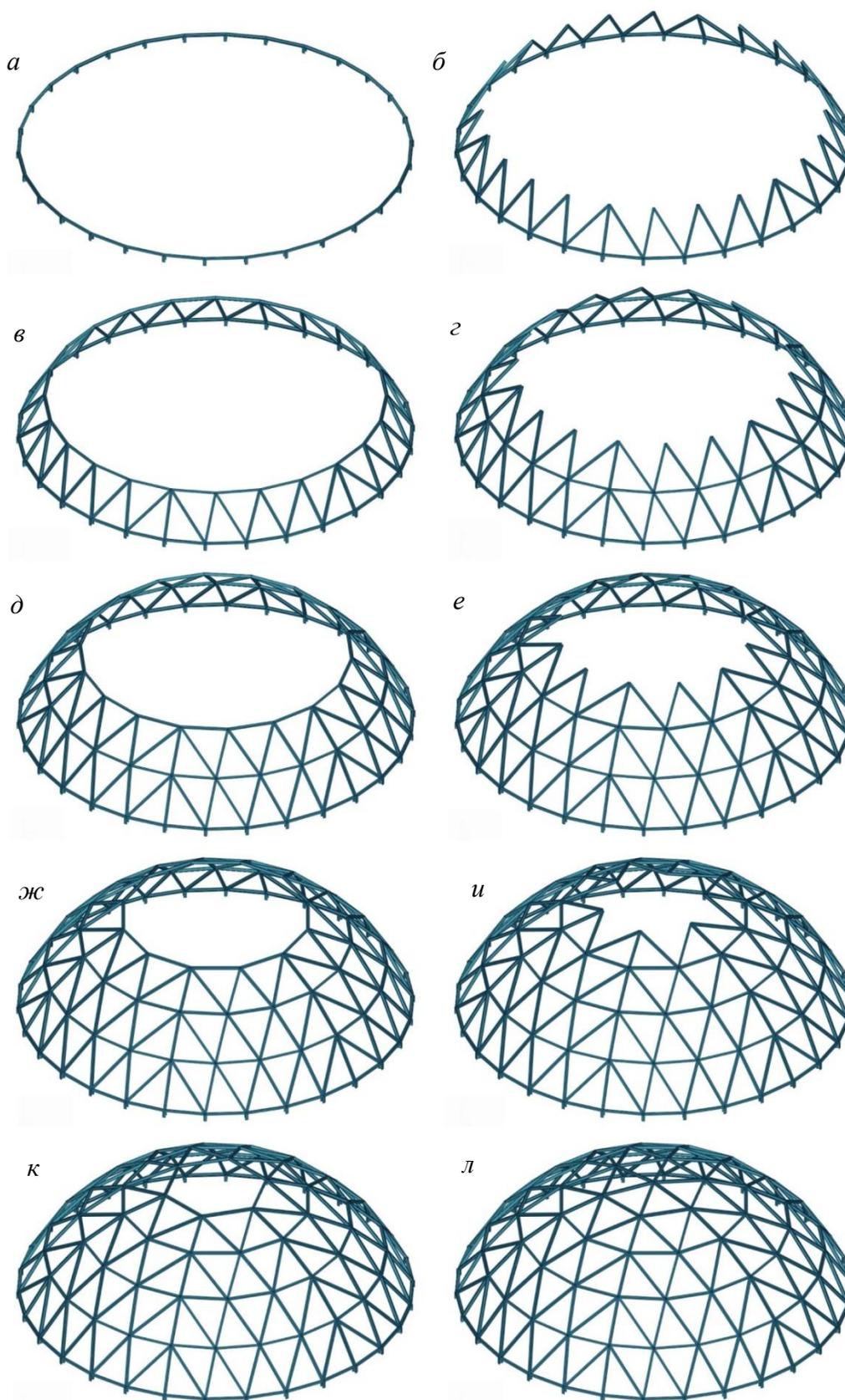


Рис. 1. Каркас исследуемого секториально-сетчатого купола  
Figure 1. The frame of the sectorial-lattice dome under study

Монтаж исследуемого каркаса сетчатого купола навесным способом выполняется в десять стадий. Сначала устраивается опорный контур, на котором монтируются раскосы первого яруса, потом устанавливаются кольцевые элементы второго яруса, на котором монтируются раскосы второго яруса и так далее до пятого яруса (рис. 2).

Установка стержневых элементов раскосного типа на каждом ярусе вызывает появление значительных изгибающих моментов. Это объясняется тем, что в монтажном состоянии работа таких стержней похожа на работу консольных наклонных рамок. Из-за разного наклона раскосных элементов изменяются и величины моментов. На рис. 3 показана общая картина изменений изгибающих моментов в стержнях сетчатого купола меридионального направления. Наибольшие по величине монтажные моменты наблюдаются в стержневых элементах крайнего яруса и в элементах предыдущего яруса, и, так же как и в ребристо-кольцевых куполах, они концентрируются возле узла крепления консольных раскосов к предыдущему ярусу. Максимальные монтажные изгибающие моменты в стержневых элементах по мере наращивания каркаса «перемещаются» к вершине купола. Так же как и в ребристо-кольцевых куполах, образование замкнутого контура на концах консольных раскосов закрепляет их деформированное состояние и тем самым сохраняет монтажные напряжения от изгиба.



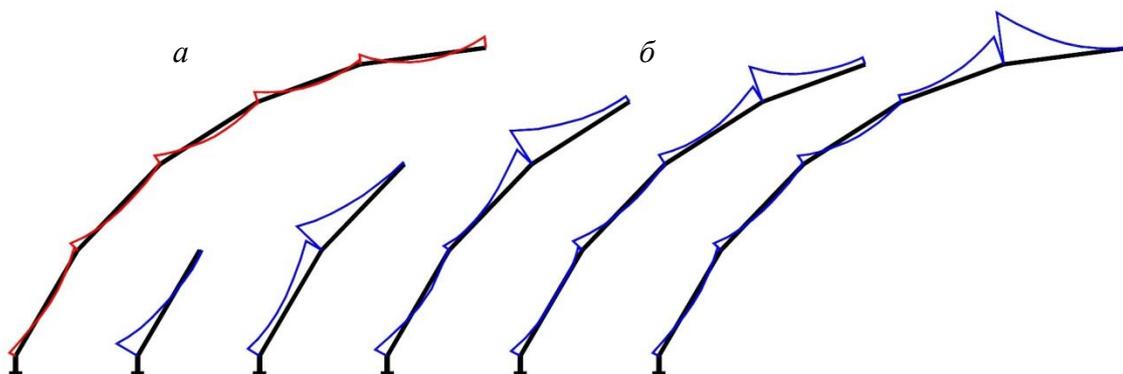
**Рис. 2.** Этапы монтажа каркаса исследуемого секториально-сетчатого купола:

*a* – 1; *б* – 2; *в* – 3; *г* – 4; *д* – 5; *e* – 6; *ж* – 7; *и* – 8; *к* – 9; *л* – 10

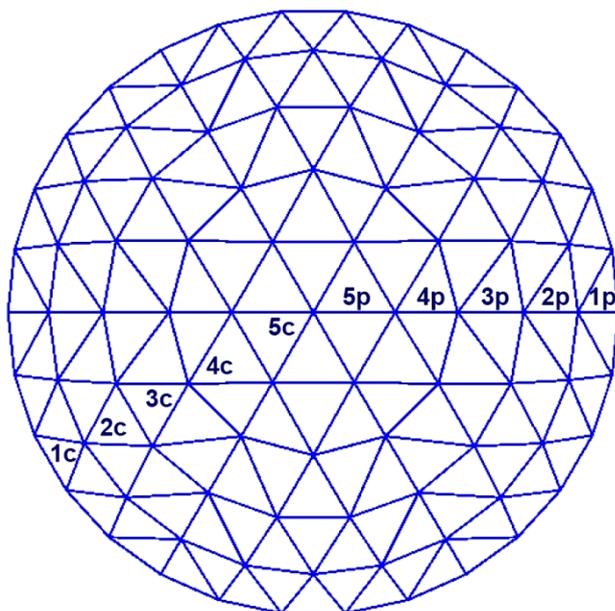
**Figure 2.** Stages of installation of the frame of sectorial-lattice dome:

*a* – 1; *б* – 2; *в* – 3; *г* – 4; *д* – 5; *e* – 6; *ж* – 7; *и* – 8; *к* – 9; *л* – 10

Разный наклон стержневых элементов раскосного типа в каждом ярусе к меридиональному направлению приводит к разным внутренним усилиям  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ . Поэтому в данном исследовании рассматривались два типа стержней (рис. 4): расположенные в середине секторов ( $1c - 5c$ ) и расположенные на границе секторов ( $1p - 5p$ ).



**Рис. 3.** Эпюры моментов  $M_x$  в стержнях меридионального направления проектной схемы (а) и на разных этапах (б) монтажа сетчатого купола  
**Figure 3.** Moment diagrams  $M_x$  in the rods of the meridional direction of the design scheme (a) and at different stages (b) of the installation of the lattice dome



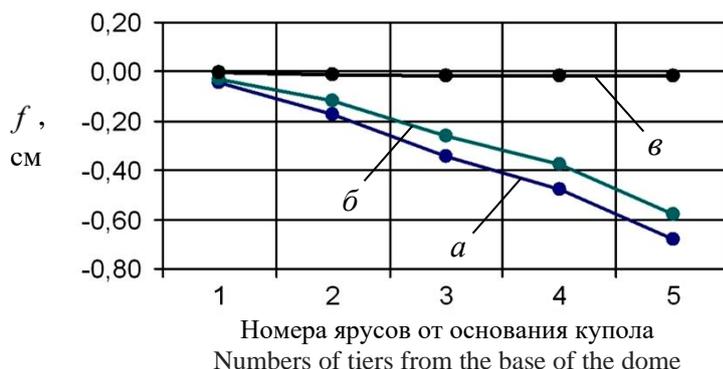
**Рис. 4.** Схема расчетных стержней исследуемого купола  
**Figure 4.** Scheme of design bars of the studied dome

Исследование выполнялось на компьютерных моделях купольных каркасов в программе SCAD [11; 12]. Критериями исследований служили деформации узлов каркаса сетчатого купола и напряжения в выбранных стержневых элементах раскосного типа каждого яруса, то есть  $1c - 5c$  и  $1p - 5p$ .

Так как установка кольцевых стержней не вызывает существенных изменений внутренних усилий элементов, то монтажные схемы купольного каркаса были представлены компьютерными моделями с консольными элементами раскосного типа по всему контуру (см. рис. 2, б, г, е, и, л). Для всех монтажных моделей сечатого купола и модели проектной схемы выполнены расчеты на действие нагрузки от собственного веса каркаса с целью оценки его напряженно-деформированного состояния.

Исследование деформации купольного каркаса  $f$  по ярусам в процессе монтажа показывает зависимости, изображенные на рис. 5. Здесь отражены вертикальные деформации как прогибы консольных

стержневых элементов при навесном монтаже с учетом их накопления. Из графиков видно, что монтажные деформации во много раз превышают деформации каркаса сетчатого купола проектной схемы.



**Рис. 5.** Вертикальные деформации каркаса купола  $d = 27,5$  м при навесном монтаже:

$a$  – монтажные 1с – 5с;  $b$  – монтажные 1р – 5р;  $e$  – проектные 1с – 5с и 1р – 5р

**Figure 5.** Vertical deformations of dome frames  $d = 27,5$  m at mounted assembly:  
 $a$  – for the assembly 1с – 5с;  $b$  – for the assembly 1р – 5р;  $e$  – for the design 1с – 5с и 1р – 5р

Анализ напряженно-деформированного состояния каркасов сетчатых куполов на компьютерных моделях выполнялись многими исследователями. Наибольшее распространение получили исследования, связанные с зависимостью от размеров (пролета и высоты) [13; 14], с разным геометрическим строением сетки купола [15] или с конструктивными особенностями, например локальными повреждениями каркаса [16].

Как уже отмечалось автором ранее [8–10], каркас купола при монтаже работает на действие собственного веса, при котором стержневые элементы меридионального направления испытывают одновременное действие усилий сжатия и изгиба. Поэтому напряженное состояние стержневых элементов раскосного типа на каждом ярусе на всех стадиях монтажа можно оценивать по нормальным напряжениям

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

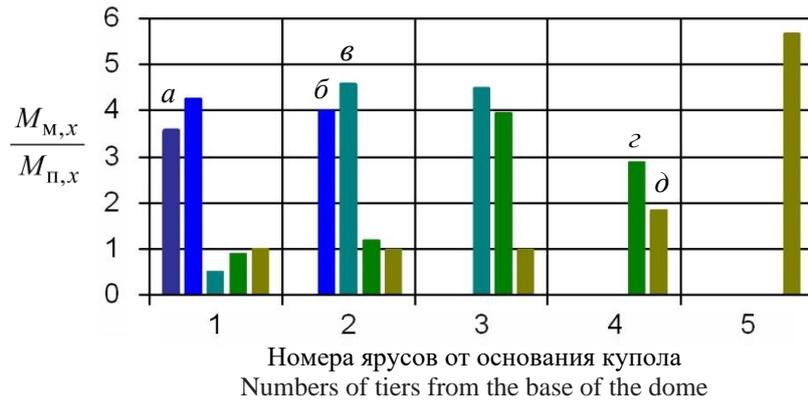
В отличие от меридиональных стержней ребристо-кольцевых куполов в стержнях раскосного типа сетчатых куполов (1с – 5с) от вертикальной симметричной нагрузки  $M_{y,i} \neq 0$ , за исключением стержней, расположенных на границах секторов (1р – 5р).

### Результаты

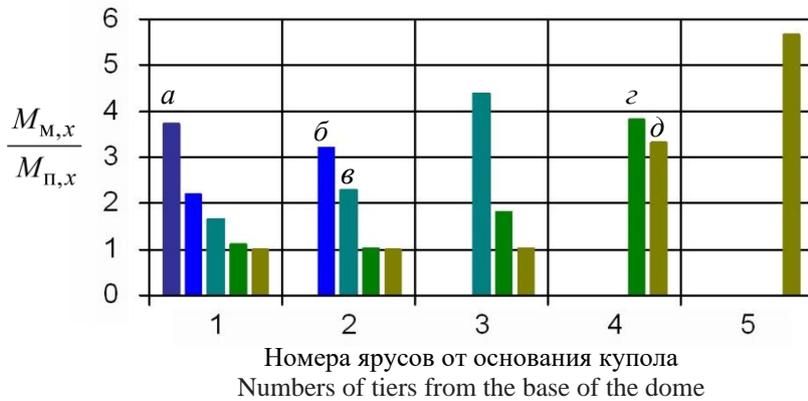
В процессе исследований получены сведения о внутренних усилиях  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  на каждом этапе навесного монтажа сетчатого купола, по которым определялись напряжения в стержневых элементах 1с – 5с и 1р – 5р по формуле (1). На рис. 6 и 7 показаны диаграммы отношений изгибающих моментов в стержнях раскосного типа при навесном монтаже  $M_{м,х}$  к изгибающим моментам в этих же стержнях проектной схемы  $M_{п,х}$ . Графические столбики соответствуют моментам в стержнях для каждой монтажной схемы или стадии монтажа по порядку ярусов (всего 5). Отсутствие столбика свидетельствует о том, что на данной стадии монтажа этого яруса еще нет в смонтированной части каркаса. Из этих диаграмм видно, что моменты в стержнях крайних и предыдущих ярусов в несколько раз превышают проектные, а в остальных, нижерасположенных ярусах, близки к проектным.

В отличие от ребристо-кольцевых куполов для напряжений стержневых элементов меридионального направления (1) нужно представить в виде суммы напряжений, вызываемых усилиями  $N$ ,  $M_y$ , и напряжений, вызываемых моментами  $M_x$ , то есть

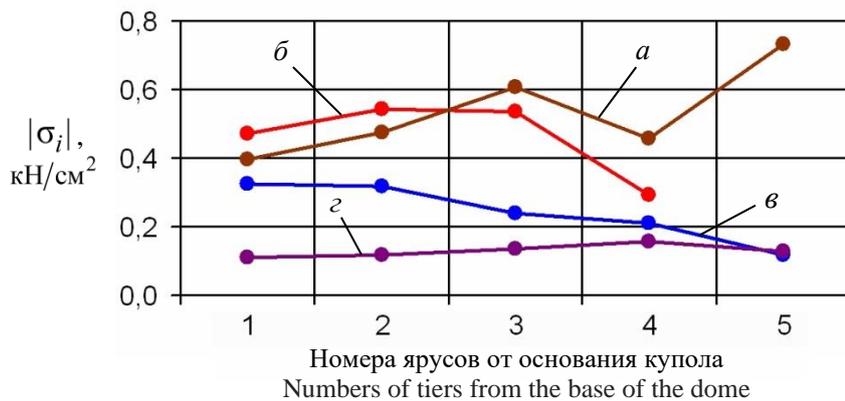
$$|\sigma_i| = |\sigma_{iNM_y}| + |\sigma_{iM_x}|. \quad (2)$$



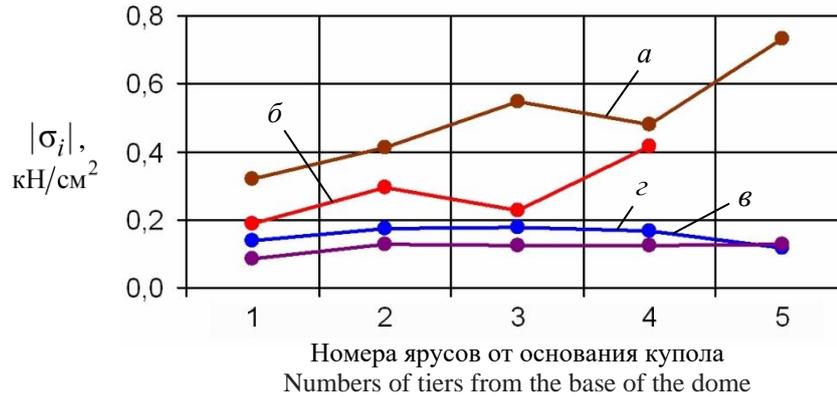
**Рис. 6.** Величины отношения моментов  $M_{M,x}/M_{П,x}$  при монтаже стержней 1с – 5с:  
*a* – 1-го яруса; *б* – 2-го яруса; *в* – 3-го яруса; *г* – 4-го яруса; *д* – 5-го яруса  
**Figure 6.** The ratio of moments  $M_{M,x}/M_{П,x}$  during the assembly of bars 1c – 5c:  
*a* – the 1<sup>st</sup> tier; *б* – the 2<sup>nd</sup> tier; *в* – the 3<sup>rd</sup> tier; *г* – the 4<sup>th</sup> tier; *д* – the 5<sup>th</sup> tier



**Рис. 7.** Величины отношения моментов  $M_{M,x}/M_{П,x}$  при монтаже стержней 1р – 5р:  
*a* – 1-го яруса; *б* – 2-го яруса; *в* – 3-го яруса; *г* – 4-го яруса; *д* – 5-го яруса  
**Figure 7.** The ratio of moments  $M_{M,x}/M_{П,x}$  during the assembly of bars 1p – 5p:  
*a* – the 1<sup>st</sup> tier; *б* – the 2<sup>nd</sup> tier; *в* – the 3<sup>rd</sup> tier; *г* – the 4<sup>th</sup> tier; *д* – the 5<sup>th</sup> tier



**Рис. 8.** Изменение напряжений  $|\sigma_i|$  в стержнях 1с – 5с по ярусам:  
*a* –  $|\sigma_{M,iMx}|$  от изгиба в консольном ярусе; *б* –  $|\sigma_{M,iMx}|$  от изгиба в предыдущем ярусе;  
*в* –  $|\sigma_{n,iNMy}|$  от сжатия в проектной схеме; *г* –  $|\sigma_{n,iMx}|$  от изгиба в проектной схеме  
**Figure 8.** Change in stresses  $|\sigma_i|$  in the rods 1c – 5c by tiers:  
*a* –  $|\sigma_{M,iMx}|$  from bending in the cantilever tier; *б* –  $|\sigma_{M,iMx}|$  from bending in the previous tier;  
*в* –  $|\sigma_{n,iNMy}|$  from compression in the design scheme; *г* –  $|\sigma_{n,iMx}|$  from bending in the design scheme



**Рис. 9.** Изменение напряжений  $|\sigma_i|$  в стержнях 1р – 5р по ярусам:

$a - |\sigma_{M,iMx}|$  от изгиба в консольном ярусе;  $\bar{b} - |\sigma_{M,iMx}|$  от изгиба в предыдущем ярусе;  
 $\bar{в} - |\sigma_{N,iNM_y}|$  от сжатия в проектной схеме;  $z - |\sigma_{N,iM_x}|$  от изгиба в проектной схеме

**Figure 9.** Change in stresses  $|\sigma_i|$  in the rods 1р – 5р by tiers:

$a - |\sigma_{M,iM_x}|$  from bending in the cantilever tier;  $\bar{b} - |\sigma_{M,iM_x}|$  from bending in the previous tier;  
 $\bar{в} - |\sigma_{N,iNM_y}|$  from compression in the design scheme;  $z - |\sigma_{N,iM_x}|$  from bending in the design scheme

На рис. 8 и 9 показаны графики изменения отдельных составных частей напряжения согласно формуле (2) в стержнях 1с – 5с и 1р – 5р соответственно: в монтажных схемах от  $M_x$  консольных или предыдущих ярусов  $|\sigma_{M,iM_x}|$ , в проектной схеме от  $N$ ,  $M_y$   $|\sigma_{N,iNM_y}|$ , в проектной схеме от  $M_x$   $|\sigma_{N,iM_x}|$ .

Из графиков рис. 8 и 9 видно, что влияние напряжений в монтажных схемах только от  $M_x$  консольных или предыдущих ярусов  $|\sigma_{M,iM_x}|$  по сравнению с аналогичными напряжениями от  $M_x$  в проектной схеме  $|\sigma_{N,iM_x}|$  на общее напряженное состояние существенно возрастает на всех ярусах в стержнях 1с – 5с и 1р – 5р. Продольные сжимающие силы  $N$  в стержневых элементах меридионального типа сетчатого купола при переходе от одной монтажной схемы к другой возрастают постепенно и на завершающей стадии монтажа становятся близкими к  $N$  в проектной схеме каркаса. Изгибающие моменты относительно оси  $y$  в стержнях раскосного типа в процессе монтажа  $M_{M_y}$  изменяются незначительно, а по величине близки к моментам проектной схемы каркаса  $M_{N_y}$ .

Поскольку наибольшие изгибающие моменты в стержневых элементах меридионального типа относительно оси  $x$  проектной схемы  $M_{N_x}$  возникают в узлах сопряжения на границе смежных ярусов, то по отношению  $M_{M_x}/M_{N_x}$  можно вычислить часть напряжений при навесном монтаже, которая зависит от  $M_{M_x}$  и сохранится до полного завершения сборки купольного каркаса, то есть

$$|\sigma_{M,iM_x}| = \frac{M_{M,i_x}}{M_{N,i_x}} |\sigma_{N,iM_x}|. \quad (3)$$

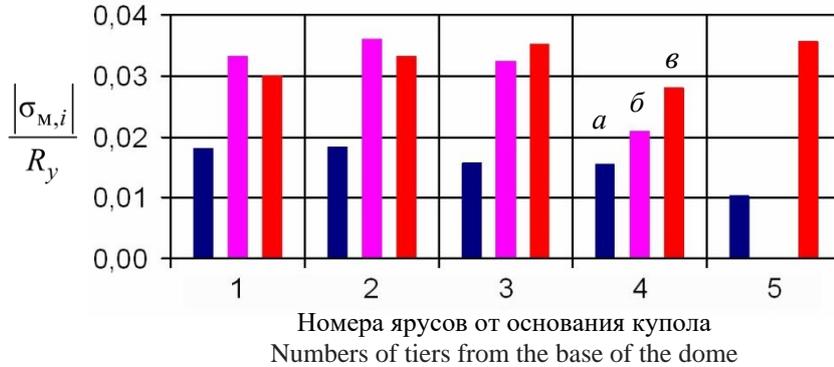
Если в правой части выражения (2) первое слагаемое взять из проектной схемы  $|\sigma_{N,iNM_y}|$ , а второе заменить на  $|\sigma_{M,iM_x}|$  (3), то получим формулу начальных напряжений в стержневых элементах раскосного типа при навесном монтаже каркаса сетчатого купола

$$|\sigma_{M,i}| = |\sigma_{N,iNM_y}| + |\sigma_{M,iM_x}|. \quad (4)$$

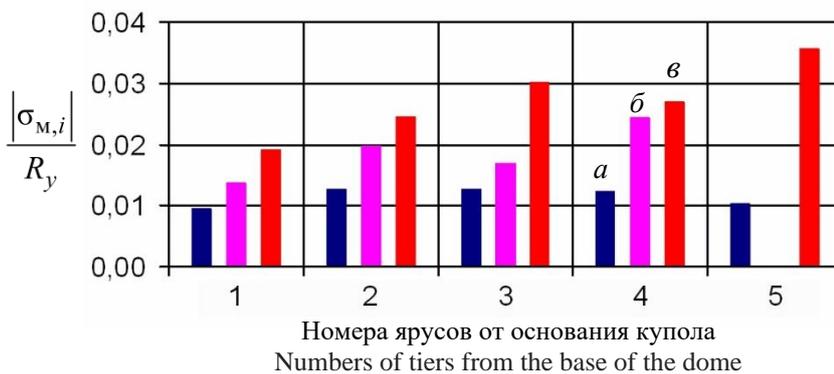
На рис. 10 и 11 показаны диаграммы степени использования прочности стержней раскосного типа в стержнях 1с – 5с и 1р – 5р соответственно консольных и предыдущих ярусов по отношению начальных сжимающих напряжений к расчетному сопротивлению стали  $|\sigma_{M,i}|/R_y$ . Здесь же приведены аналогичные диаграммы отношения напряжений к расчетному сопротивлению стали для проектной схемы  $|\sigma_{N,i}|/R_y$ , величины которых вычислялись по формуле (2), то есть

$$|\sigma_{N,i}| = |\sigma_{N,iNM_y}| + |\sigma_{N,iM_x}|. \quad (5)$$

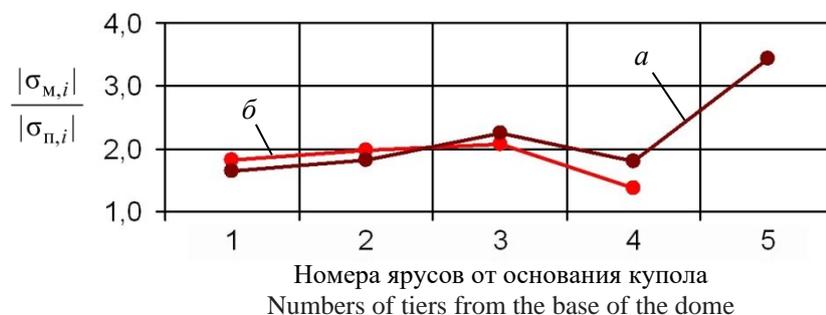
Из этих диаграмм видно, что в проектной схеме исследуемого сетчатого купола напряжения от собственного веса приводят к использованию только от 1 до 1,8 % прочности стали в стержнях раскосного типа. В монтажных же схемах из-за начальных напряжений в подавляющем большинстве ярусов используется уже от 2 до 3,5 % прочности стали в стержнях раскосного типа. Таким образом, это свидетельствует о существенном изменении напряженного состояния полностью купольного каркаса после завершения монтажа.



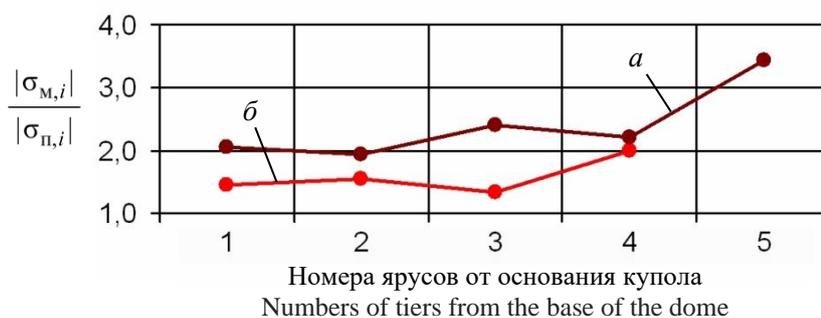
**Рис. 10.** Отношение  $|\sigma_{M,i}|/R_y$  в стержнях 1с – 5с при навесном монтаже купола:  
*a* – проектная схема  $|\sigma_{п,i}|/R_y$ ; *б* – предыдущий ярус; *в* – консольный ярус  
**Figure 10.** The ratio  $|\sigma_{M,i}|/R_y$  in the bars 1c – 5c during mounted assembly the dome:  
*a* – the design scheme  $|\sigma_{п,i}|/R_y$ ; *б* – the previous tier; *в* – the cantilever tier



**Рис. 11.** Отношение  $|\sigma_{M,i}|/R_y$  в стержнях 1р – 5р при навесном монтаже купола:  
*a* – проектная схема  $|\sigma_{п,i}|/R_y$ ; *б* – предыдущий ярус; *в* – консольный ярус  
**Figure 11.** The ratio  $|\sigma_{M,i}|/R_y$  in the bars 1p – 5p during mounted assembly the dome:  
*a* – the design scheme  $|\sigma_{п,i}|/R_y$ ; *б* – the previous tier; *в* – the cantilever tier



**Рис. 12.** Отношения начальных и проектных напряжений  $|\sigma_{M,i}|/|\sigma_{п,i}|$  в стержнях 1с – 5с:  
*a* – консольный ярус; *б* – предыдущий ярус  
**Figure 12.** The ratio of initial and design stresses  $|\sigma_{M,i}|/|\sigma_{п,i}|$  in the bars 1c – 5c:  
*a* – the cantilever tier; *б* – the previous tier



**Рис. 13.** Отношения начальных и проектных напряжений  $|\sigma_{м,i}|/|\sigma_{п,i}|$  в стержнях 1р – 5р:  
*a* – консольный ярус; *б* – предыдущий ярус

**Figure 13.** The ratio of initial and design stresses  $|\sigma_{м,i}|/|\sigma_{п,i}|$  in the bars 1p – 5p:  
*a* – the cantilever tier; *b* – the previous tier

Для более точной оценки степени влияния навесного монтажа на разных стадиях на работу каркаса сетчатого купола на собственный вес удобнее сравнивать полученные начальные напряжения с проектными напряжениями. На рис. 12 и 13 показаны графики отношений начальных монтажных напряжений  $|\sigma_{м,i}|$  к напряжениям проектной схемы  $|\sigma_{п,i}|$  в стержнях 1с – 5с и 1р – 5р соответственно консольных и предыдущих ярусов монтажных схем каркаса сетчатого купола, то есть  $|\sigma_{м,i}|/|\sigma_{п,i}|$ . В стержнях 1с – 5с начальные напряжения превосходят проектные в интервале от 1,7 до 3,4 раза в консольных ярусах и в интервале от 1,4 до 1,8 раза в предыдущих ярусах. В стержнях 1р – 5р начальные напряжения превосходят проектные в интервале от 1,9 до 3,4 раза в консольных ярусах и в интервале от 1,3 до 2,0 раза в предыдущих ярусах.

### Заключение

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы:

- в процессе навесного монтажа каркаса сетчатого купола в стержнях раскосного типа неизбежно появление монтажных напряжений, существенно превышающих проектные напряжения от собственного веса каркаса;
- причиной монтажных напряжений служит появление относительно больших изгибающих моментов при консольной установке стержней раскосного типа на каждом вновь монтируемом ярусе купольного каркаса;
- монтажные напряжения от консольного изгиба стержней раскосного типа сохраняются в купольном каркасе из-за колец, образованных установкой на их свободных концах кольцевых стержней, которые фиксируют их деформированное состояние;
- при выборе навесного монтажа для сетчатых куполов сферического очертания необходимо при проектировании производить расчет их каркасов на эксплуатационную надежность с учетом остаточных монтажных напряжений;
- в первом приближении монтажные напряжения в стержнях раскосного типа сетчатого купола можно учесть путем умножения напряжений от собственного веса купольного каркаса на повышающие коэффициенты от 2,0 в нижнем ярусе до 3,4 – в верхнем;
- при навесном монтаже деформации каркасов возрастают в несколько раз по сравнению с проектной схемой, поэтому следует предусматривать такие виды соединения элементов, которые способны компенсировать неточности в расстояниях между узлами.

### Список литературы

1. Тур В.И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности. М.: Изд-во АСВ, 2004. 96 с.
2. 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.

3. Металлические конструкции: справочник проектировщика: в 3 т. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений / под общ. ред. В.В. Кузнецова. М.: Изд-во АСВ, 1998. 512 с.
4. Торкатюк В.И. Монтаж конструкций большепролетных зданий. М.: Стройиздат, 1985. 170 с.
5. Гофштейн Г.Е., Ким В.Г., Нищев 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. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-1-4-16>
7. 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. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-6-481-494>
8. 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. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-278-290>
9. 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. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-111-121>
10. Лебедь Е.В. Влияние высоты ребристо-кольцевого купола на напряженное состояние его каркаса в процессе навесного монтажа // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 6. С. 452–464. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-6-452-464>
11. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD. М.: Изд-во АСВ, 2004. 592 с.
12. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. Киев: Факт, 2005. 344 с.
13. Eldhose M., Rajesh A.K., Ramadass S. Finite element analysis and parametric study of Schwedler dome using ABAQUS software // International Journal of Engineering Trends and Technology. 2015. Vol. 28. No. 7. Pp. 333–338.
14. Chandiwala A. Analysis and design of steel dome using software // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2014. Vol. 3. No. 3. Pp. 35–39. <https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0303006>
15. Makkar A., Abbas S., Muhammed Haslin S.M. Finite Element analysis of Diamatic, Schwedler and Diamatic – Schwedler hybrid domes // International Journal of Engineering Trends and Technology. 2016. Vol. 39. No. 1. Pp. 57–62. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V39P210>
16. Handruleva A., Matuski V., Kazakov K. Combined mechanisms of collapse of discrete single-layer spherical domes // Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA). December 2012. Vol. 1. No. 1. Pp. 19–27.

## References

1. Tur V.I. *Dome structures: morphogenesis, analysis, design, increase in effectiveness*. Moscow: ASV Publ.; 2004. (In Russ.)
2. Krivoshapko S.N. Metal ribbed-and-circular and lattice shells from the 19th until the first half of the 20th centuries. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2014;(6):4–15. (In Russ.)
3. Kuznetsov V.V. (ed.) *Metal structures: reference book of the designer. Vol. 2. Steel structures of buildings and constructions*. Moscow: ASV Publ.; 1998. (In Russ.)
4. Torkatyuk V.I. *Installation of structures of large-span buildings*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1985. (In Russ.)
5. Gofshteyn G.E., Kim V.G., Nishchev V.N., Sokolova A.D. *Installation of metal and reinforced concrete structures*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 2004. (In Russ.)
6. 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.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-1-4-16>
7. 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.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-6-481-494>
8. 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. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-278-290>

9. 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. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-111-121>
10. Lebed E.V. Influence of the height of the ribbed-ring dome on the stress state of its frame during the overhang mounting process. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2020;16(6):452–464. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-6-452-464>
11. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Perelmuter A.V., Perelmuter M.A. *SCAD Office. Computer system SCAD*. Moscow: ASV Publ.; 2004. (In Russ.)
12. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. *Computer models of structures*. Kiev: Fakt Publ.; 2005. (In Russ.)
13. Eldhose M., Rajesh A.K., Ramadass S. Finite element analysis and parametric study of Schwedler dome using ABAQUS software. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2015;28(7):333–338.
14. Chandiwala A. Analysis and design of steel dome using software. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014;3(3):35–39. <https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0303006>
15. Makkar A., Abbas S., Muhammed Haslin S.M. Finite element analysis of Diamatic, Schwedler and Diamatic – Schwedler hybrid domes. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2016;39(1):57–62. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V39P210>
16. Handruleva A., Matuski V., Kazakov K. Combined mechanisms of collapse of discrete single-layer spherical domes. *Study of Civil Engineering and Architecture*. December 2012;1(1):19–27.