



DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-5-417-427
УДК 624.074.2:624.014:693.8

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Влияние связей на напряженное состояние каркаса ребристо-кольцевого купола

Е.В. Лебедь

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

✉ evglebed@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 24 июля 2022 г.
Доработана: 24 сентября 2022 г.
Принята к публикации: 25 сентября 2022 г.

Для цитирования

Лебедь Е.В. Влияние связей на напряженное состояние каркаса ребристо-кольцевого купола // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 5. С. 417–427. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-5-417-427>

Аннотация. Цель – установление зависимости между напряженным состоянием каркаса ребристо-кольцевого купола и степенью оснащения его связями. Меридиональные ребра и кольца купольного каркаса приняты металлическими. Купольный каркас состоит из 24 ребер и насчитывает 7 колец. Исследование выполнено для ребристо-кольцевого купола сферической формы пролетом 39,3 м и высотой 11,0 м на компьютерных моделях. Разработана исходная компьютерная модель каркаса ребристо-кольцевого купола без связей из стальных двутавров. На основе исходной модели созданы модели каркаса со связями между меридиональными ребрами в четырех, восьми циклически симметричных секторах и во всех секторах. И для исходной модели, и для всех моделей каркаса купола со связями выполнены компьютерные расчеты на действие нагрузки от собственного веса несущих и ограждающих конструкций и двух вариантов снеговой нагрузки. В процессе расчетов определены деформации, внутренние усилия и напряжения в меридиональных ребрах, верхнем и промежуточных кольцах разных моделей, которые сравнивались между собой. Получены графики изменения деформаций каркаса, графики и диаграммы изменения внутренних усилий и напряжений в меридиональных ребрах, в верхнем и промежуточных кольцах купола в зависимости от степени оснащения купола связями. Дана оценка влияния связей на напряженное состояние каркаса ребристо-кольцевого купола. Отмечены особенности влияния разных схем связей на напряженное состояние купольного каркаса.

Ключевые слова: ребристо-кольцевой купол, металлический каркас, меридиональное ребро, верхнее кольцо, промежуточные кольца, связи, компьютерная модель, статический расчет, внутренние усилия, напряжения в элементах

The influence of bracing on the stress state of the ribbed-ring dome framework

Evgeny V. Lebed

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

✉ evglebed@mail.ru

Article history

Received: July 14, 2022
Revised: September 24, 2022
Accepted: September 25, 2022

Abstract. The aim of current research was to establish the relationship between the stress state of the ribbed-ring dome framework and the degree of its bracing. It was assumed that the meridional ribs and rings of the dome framework are made of metal. The framework of the dome consists of 24 ribs and 7 rings. The study

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, Scopus Author ID: 57197822677, eLIBRARY SPIN-код: 5297-2700; evglebed@mail.ru

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, Scopus Author ID: 57197822677, eLIBRARY SPIN-code: 5297-2700; evglebed@mail.ru

© Лебедь Е.В., 2022

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

was performed for a ribbed-ring dome of spherical shape with a span of 39.3 m and a height of 11.0 m on computer models. The initial computer model of the framework of a ribbed-ring dome made of steel I-beams without bracing has been developed. On the basis of the initial model, additional models were developed for the frameworks with bracing between meridional edges in four, eight cyclically symmetric sectors and in all sectors. Both for the initial model and for all models of the dome framework with bracing, computer calculations were performed for the effect of the load from the own weight of the load-bearing and enclosing structures, and two variants of the snow load. During the calculations, deformations, internal forces and stresses in the meridional ribs, upper and intermediate rings of different models were determined, which were compared with each other. Graphs of changes in deformations of the frame, graphs and diagrams of changes in internal forces and stresses in the meridional ribs, in the upper and intermediate rings of the dome, depending on the degree of bracing in the framework, are obtained. An assessment of the influence of bracing on the stress state of the rib-ring dome frame is performed. The peculiarities of the influence of different coupling schemes on the stressed state of the dome frame are noted.

For citation

Lebed E.V. The influence of bracing on the stress state of the ribbed-ring dome framework. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(5):417–427. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-5-417-427>

Keywords: ribbed-ring dome, metal framework, meridional rib, upper ring, intermediate rings, bracing, computer model, static analysis, internal forces, stresses in the elements

Введение

Купола применяются в качестве покрытий зданий и сооружений, как из-за выразительности своей геометрической формы, так и вследствие надежности своих конструктивных систем. Благодаря пространственной жесткости и экономичности расхода металла они занимают ведущее место среди пространственных покрытий [1–3].

Геометрические схемы каркасов металлических куполов многообразны, зависят от перекрываемых пролетов и назначения сооружения [4; 5]. Даже в ребристо-кольцевых куполах возможны различные геометрические схемы каркасов, например, обусловленные числом секторов или ярусов в каркасе. Другим значимым признаком такого различия в ребристо-кольцевых куполах является наличие связей и их количество.

Связи устраиваются для повышения пространственной жесткости несущих каркасов ребристо-кольцевых куполов. Их обычно устанавливают в четырех секторах купола циклически симметрично относительно друг друга между соседними меридиональными ребрами в каждой четырехугольной ячейке по всей высоте купола. Добавление связей в каркас купола усложняет его расчетную схему, направлено на предотвращение изгибно-крутильных явлений и приводит к изменению работы меридиональных ребер и верхнего кольца. Следовательно, отсутствие или наличие связей в купольном каркасе отражается на напряженно-деформированном состоянии его основных конструктивных элементов.

Наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние каркасов пространственных сооружений оказывает несимметричная нагрузка. К такой нагрузке относится второй вариант снеговой нагрузки на купольное покрытие¹. Именно она определяет необходимые сечения основных несущих элементов купольных каркасов.

Методы

С целью выяснения зависимости напряженного состояния каркаса ребристо-кольцевого купола от степени оснащения его связями выполнялись компьютерные исследования на разных моделях. При этом создавались компьютерные модели, соответствующие разной степени оснащения связями. Исследования выполнялись на компьютерных моделях купольных каркасов в программе SCAD как пространственных стержневых систем [6; 7]. Критериями исследований служили деформации f узлов купольного каркаса и напряжения σ в элементах меридиональных ребер, верхнего и промежуточных колец, которые определялись по внутренним усилиям N , M_x , M_y .

Аналогичные исследования стержневых систем купольного типа в различных компьютерных программах выполнялись многими учеными. Например, анализировалось напряженное состояние купольных каркасов при изменении параметров его элементов [8], при разных отношениях высоты купола к диаметру для разных пролетов [9], при разных размерах ячеек каркаса ребристо-кольцевого купола и включении в работу ограждения в них [10], при разных отношениях высоты купола к диаметру и разных сечениях элементов [11]. Ранее автором выполнялись исследования НДС ребристо-кольцевых куполов при различных способах монтажа [12] и при раз-

¹ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ, 2016. 102 с.

ных высотах его каркаса [13]. Представленный здесь материал автором получен в полном соответствии с общепринятыми принципами исследований аналогичных состояний пространственных стержневых систем.

Объектом исследования служил каркас ребристо-кольцевого купола сферической формы с радиусом кривизны 23 м, состоящий из 24 ребер и 7 колец. Диаметр нижнего кольца 39,3 м, диаметр верхнего кольца 5,0 м, высота купольного каркаса 11 м. Каркас опирается на короткие стойки высотой 0,5 м (рис. 1, а). На основе приближенного расчета все элементы купольного каркаса приняты в виде прокатных двутавров из стали С245: меридиональные ребра – I 50Ш1, верхнее кольцо – I 50Ш4, остальные кольца – I 20Ш1, стойки – I 50Ш3. Модель этого купольного каркаса без связей являлась исходной для исследования. На основе исходной модели созданы модели каркаса со связями между меридиональными ребрами в четырех (рис. 1, б) и восьми (рис. 1, в) циклически симметричных секторах, а также со связями во всех секторах (рис. 1, г). Связи приняты из трубы 114×5 мм.

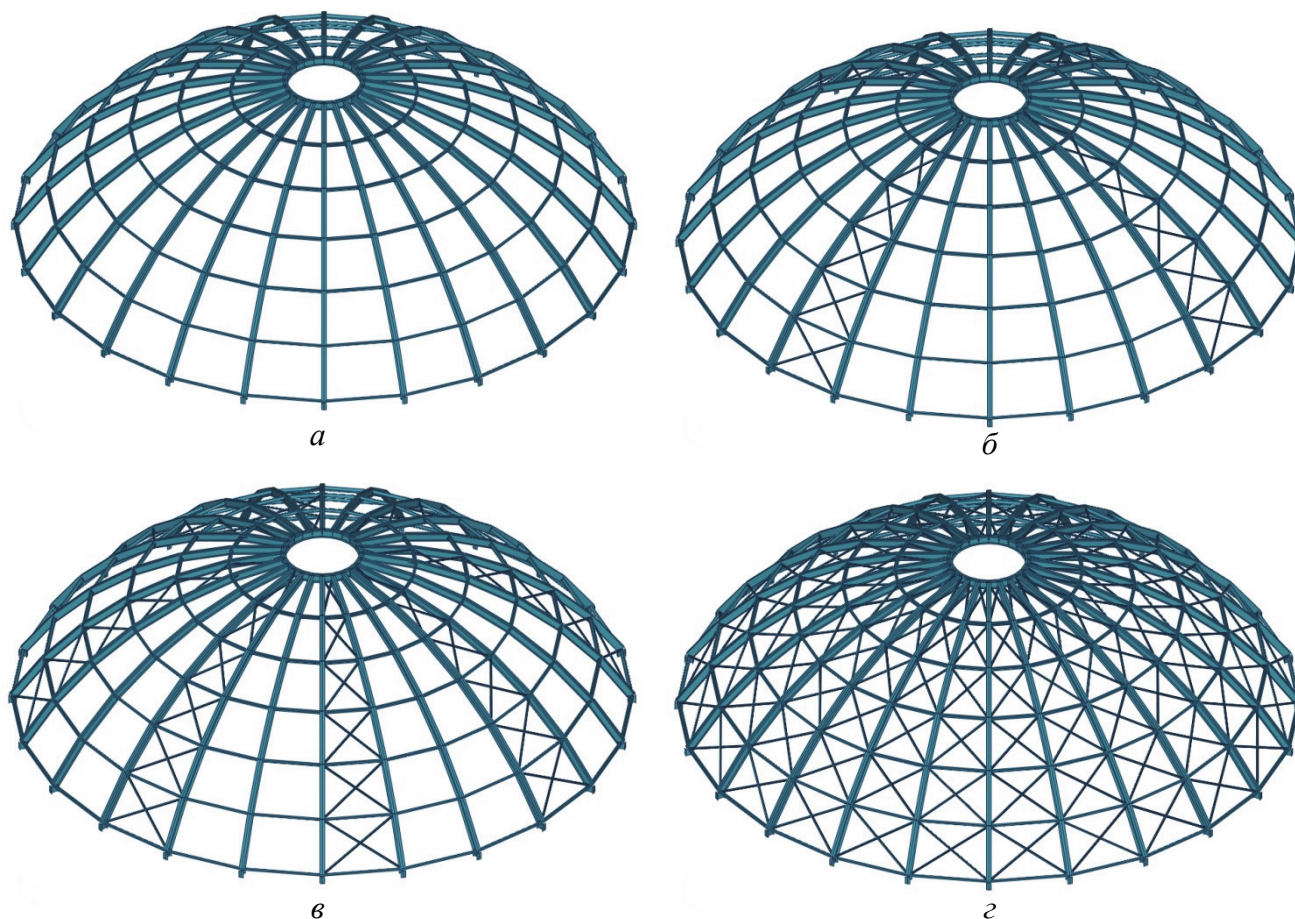


Рис. 1. Схемы каркасов ребристо-кольцевого купола:
 а – без связей; б – связи в четырех секторах; в – связи в восьми секторах; г – связи во всех секторах
Figure 1. Schemes of the frames of the ribbed-ring dome:
 а – without bracing; б – bracing in four sectors; в – bracing in eight sectors; г – bracing in all sectors

Все узлы сопряжения элементов купольного каркаса в нормальном направлении жесткие. Сопряжения меридиональных ребер с верхним и нижним кольцом, а также промежуточных колец с меридиональными ребрами в тангенциальном направлении шарнирные. Сопряжения купольного каркаса со стойками и сопряжение диагональных связей в ячейках купольного каркаса с узлами шарнирные в обоих направлениях.

И для исходной модели, и для всех моделей каркаса купола со связями выполнены компьютерные расчеты на действие нагрузок, представленных узловыми силами. Таких нагрузок насчитывалось четыре: от собственного веса ограждающих и несущих конструкций, двух вариантов снеговой нагрузки – симметричной (рис. 2, а) и несимметричной (рис. 2, б). Были составлены две комбинации нагрузок: комбинация 1 – постоянная вместе со снеговой симметричной нагрузкой; комбинация 2 – постоянная вместе со снеговой несимметричной нагрузкой. Именно несимметричная снеговая нагрузка в сочетании с нагрузкой от собственного веса всех конструкций вызывает наибольшие внутренние усилия N , M_x , M_y .

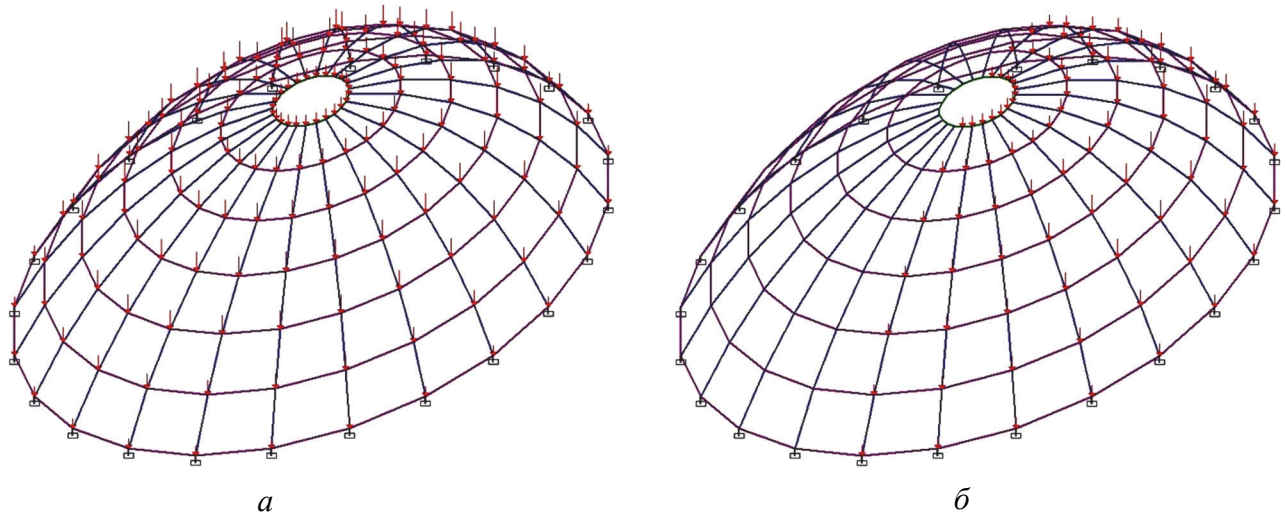


Рис. 2. Схемы снеговой нагрузки на купольный каркас:
a – симметричная; *б* – несимметричная
Figure 2. Schemes of snow load on the dome framework:
a – symmetrical; *б* – asymmetrical

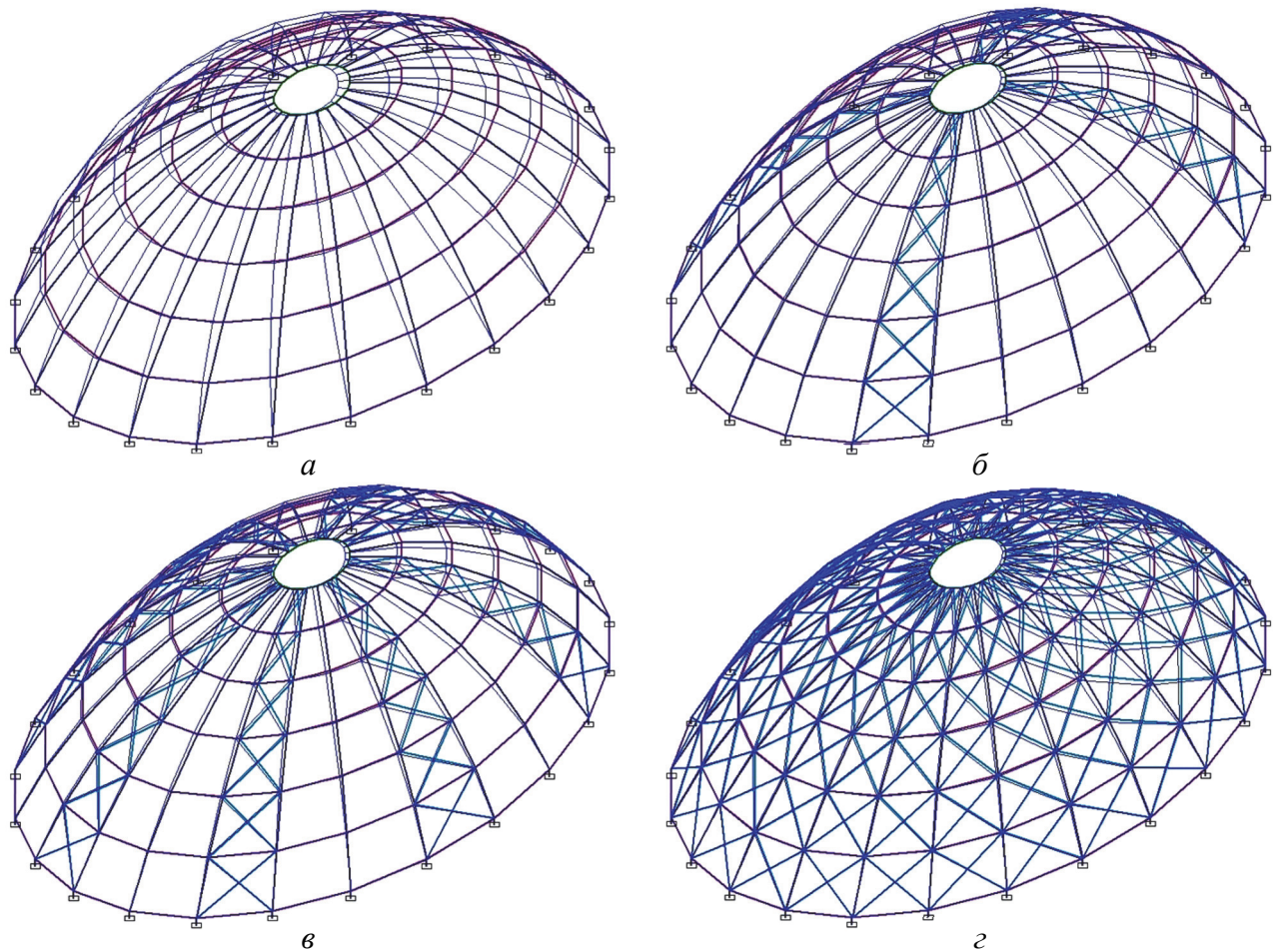


Рис. 3. Деформации купольного каркаса разных схем при комбинации нагрузок 2:
a – без связей; *б* – связи в четырех секторах; *в* – связи в восьми секторах; *г* – связи во всех секторах
Figure 3. Deformations of the dome framework of different schemes with a combination of loads 2:
a – without bracing; *б* – bracing in four sectors; *в* – bracing in eight sectors; *г* – bracing in all sectors

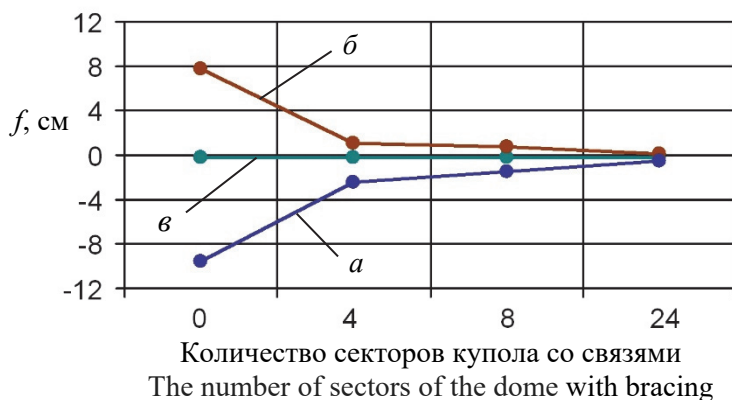


Рис. 4. Максимальные деформации каркаса купола разных схем связей и нагрузок:
a – комбинация 2 вниз; *b* – комбинация 2 вверх; *v* – комбинация 1
Figure 4. Maximum deformations of the dome frame of different bracing schemes and loads:
a – combination 2 down; *b* – combination 2 up; *v* – combination 1

В процессе компьютерных расчетов определялись деформации, внутренние усилия N , M_x , M_y и напряжения σ в ребрах, верхнем и промежуточных кольцах, которые для разных моделей купольного каркаса сравнивались между собой.

Исследование показало резкое уменьшение вертикальной деформации купольного каркаса для комбинации нагрузок 2 при установке связей, хотя изменения их общего характера не произошло (рис. 3). Наиболее ярко это происходит после установки связей в четырех секторах, когда величина максимальной деформации f вниз уменьшились в 3,9 раза, а вверх – в 7,2 раз (рис. 4). Переход к схеме каркаса со связями в восьми секторах от схемы в четырех секторах также снижает деформации в 1,65 раза вниз и 1,54 раза вверх, и стали эквивалентными $1/2650$ и $1/5600$ пролета соответственно. Переход к схеме купольного каркаса со связями во всех секторах от схемы в восьми секторах снижает эти незначительные деформации еще в несколько раз. В то же время для комбинации нагрузок 1, то есть симметричном загрузении, установка связей никак не отражается на величине деформации купольного каркаса.

Результаты

Постановка связей в купольном каркасе существенно сказывается на характере изгибающих моментов M_x в меридиональных ребрах и верхнем кольце (рис. 5). В то же время постановка связей не оказывает влияния на вид эпюр продольных сил N в элементах каркаса. Что касается величин внутренних усилий N , M_x , M_y , то зависимости их от постановки связей в разных элементах каркаса проявляется по-разному. В меридиональных ребрах постановка связей приводит к резкому снижению моментов M_x , незначительному изменению моментов M_y и небольшому увеличению сил N (рис. 6). В верхнем кольце постановка связей в четырех секторах приводит к резкому снижению моментов M_x , повышению моментов M_y и не изменяет силы N (рис. 7). В промежуточных кольцах постановка связей приводит к увеличению сил N , а также небольшому повышению моментов M_x (рис. 8).

Изменение внутренних усилий N , M_x , M_y при постановке связей в ребристо-кольцевом куполе происходит по-разному, без какой-либо корреляции между собой. Поэтому влияние связей анализировалось и по нормальным напряжениям в элементах купольного каркаса, вычисленным по формуле

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{W_x} \pm \frac{M_y}{W_y}.$$

Рассмотрены зависимости напряжений $\sigma_{(N+M_x+M_y)}$ в элементах купольного каркаса, а также влияние на них только изгибающих моментов M_x , M_y – $\sigma_{(M_x+M_y)}$, и отдельно продольных сил N – $\sigma_{(N)}$ (рис. 9–11). Необходимо отметить, что максимальные напряжения $\sigma_{(N+M_x+M_y)}$ на графиках не является суммой напряжений $\sigma_{(M_x+M_y)}$ и $\sigma_{(N)}$, поскольку последние определены для разных сечений (стержней) элементов купольного каркаса.

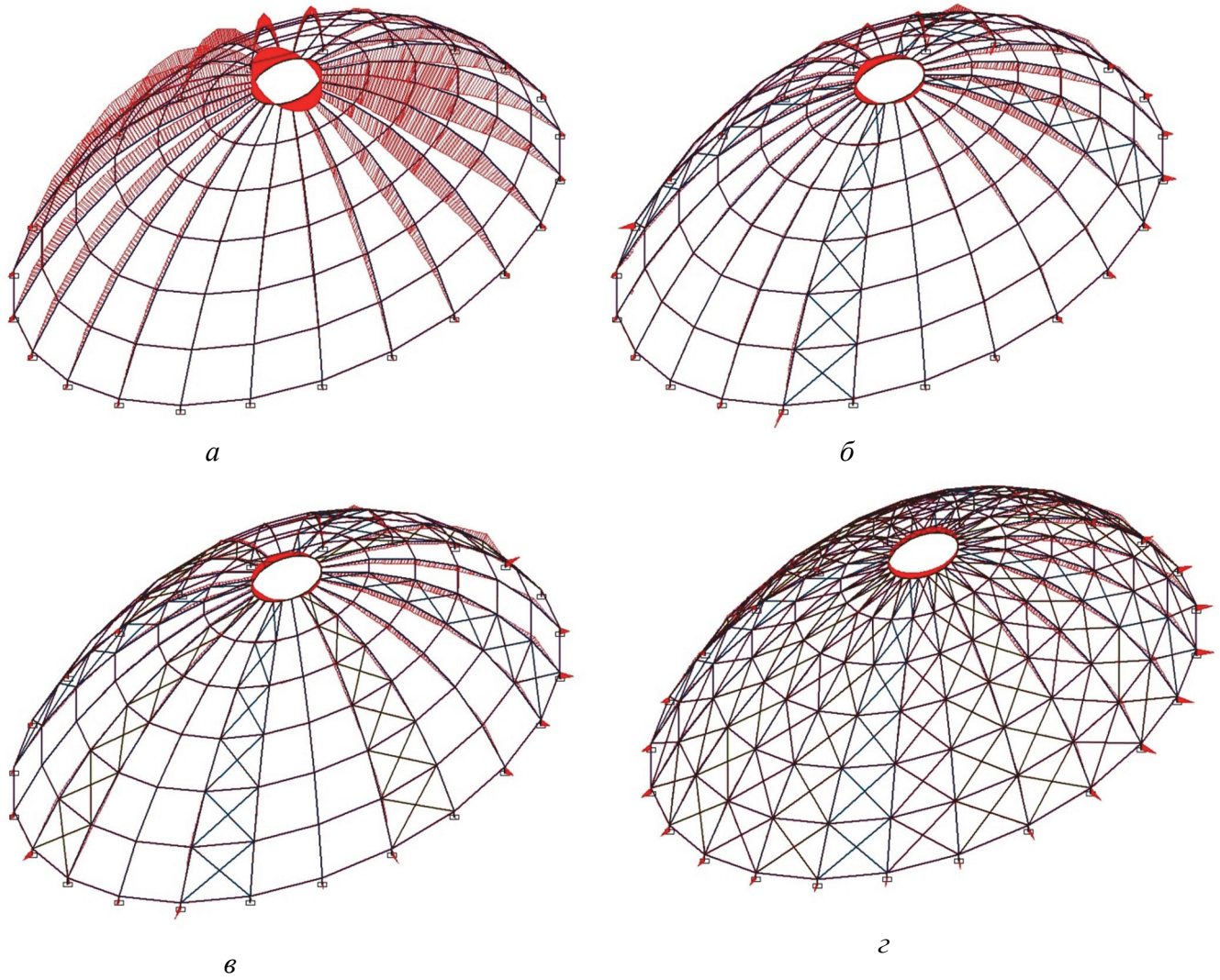


Рис. 5. Эпюры моментов M_x купольного каркаса разных схем при комбинации нагрузок 2:
a – без связей; *б* – связи в четырех секторах; *в* – связи в восьми секторах; *г* – связи во всех секторах
Figure 5. Diagrams of the moments M_x of the dome framework of different schemes with a combination of loads 2:
a – without bracing; *б* – bracing in four sectors; *в* – bracing in eight sectors; *г* – bracing in all sectors

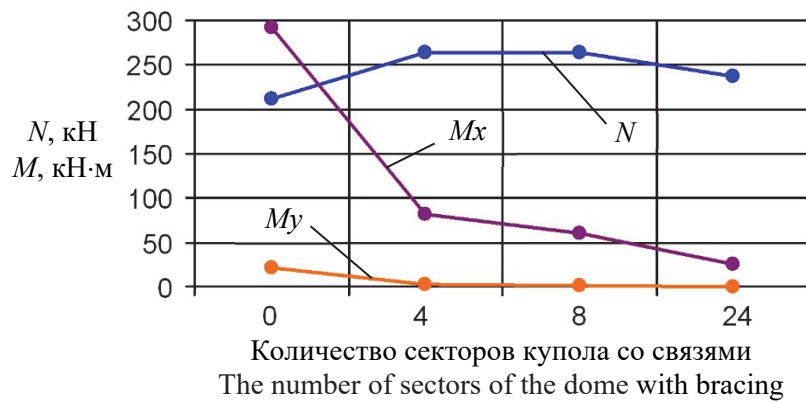


Рис. 6. Максимальные усилия N , M в меридиональных ребрах купола разных схем связей
Figure 6. Maximum forces N , M in the meridional ribs of the dome for different bracing schemes

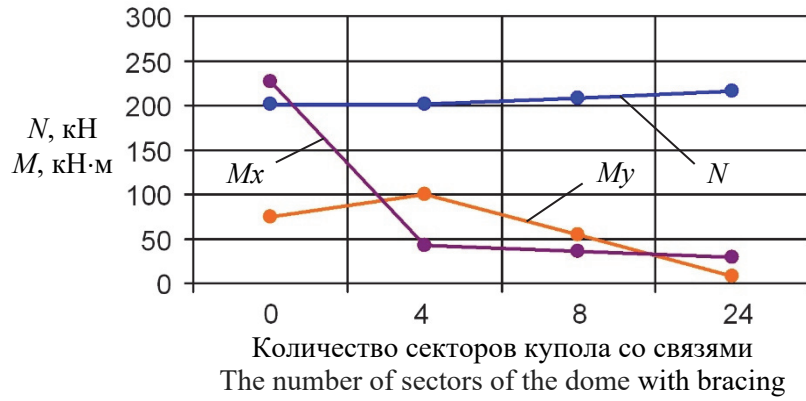


Рис. 7. Максимальные усилия N, M в верхнем кольце купола разных схем связей
Figure 7. Maximum forces N, M in the upper ring of the dome for different bracing schemes

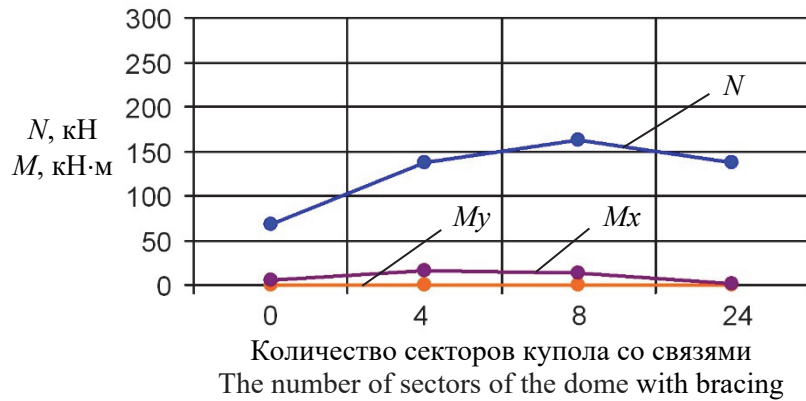


Рис. 8. Максимальные усилия N, M в промежуточных кольцах купола разных схем связей
Figure 8. Maximum forces N, M in the intermediate rings of the dome for different bracing schemes

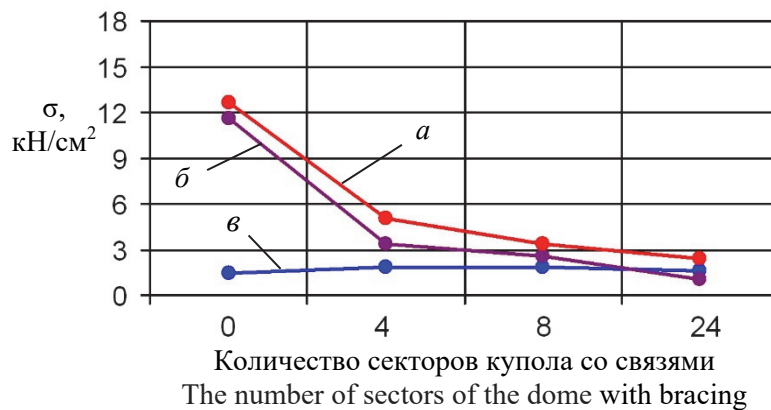


Рис. 9. Максимальные напряжения σ в меридиональных ребрах купола разных схем связей:

$$a - \sigma_{(N+M_x+M_y)}; \bar{\sigma} - \sigma_{(M_x+M_y)}; \sigma - \sigma_{(N)}$$

Figure 9. Maximum stresses σ in the meridional ribs of the dome for different bracing schemes:

$$a - \sigma_{(N+M_x+M_y)}; \bar{\sigma} - \sigma_{(M_x+M_y)}; \sigma - \sigma_{(N)}$$

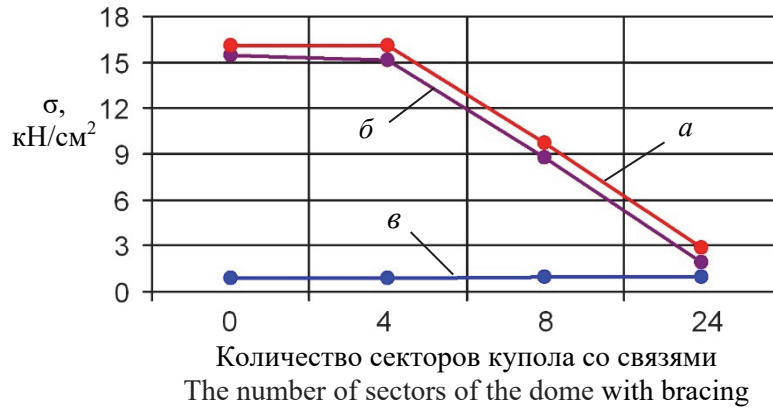


Рис. 10. Максимальные напряжения σ в верхнем кольце купола разных схем связей:

$$a - \sigma_{(N+M_x+M_y)}; \bar{b} - \sigma_{(M_x+M_y)}; \bar{v} - \sigma_{(N)}$$

Figure 10. Maximum stresses σ in the upper ring of the dome for different bracing schemes:

$$a - \sigma_{(N+M_x+M_y)}; \bar{b} - \sigma_{(M_x+M_y)}; \bar{v} - \sigma_{(N)}$$

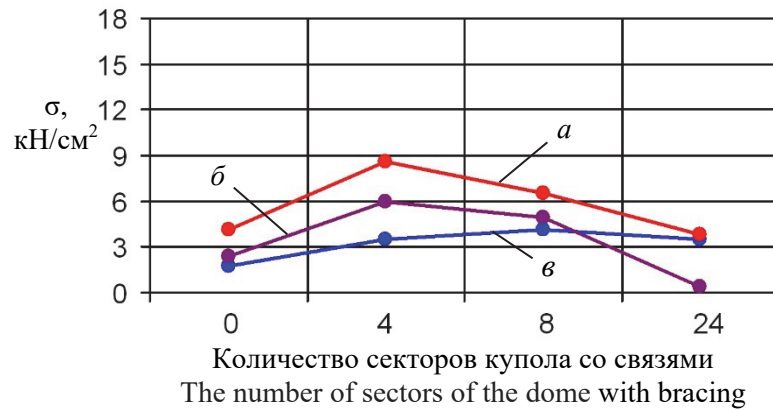


Рис. 11. Максимальные напряжения σ в промежуточных кольцах купола разных схем связей:

$$a - \sigma_{(N+M_x+M_y)}; \bar{b} - \sigma_{(M_x+M_y)}; \bar{v} - \sigma_{(N)}$$

Figure 11. Maximum stresses σ in the intermediate rings of the dome for different bracing schemes:

$$a - \sigma_{(N+M_x+M_y)}; \bar{b} - \sigma_{(M_x+M_y)}; \bar{v} - \sigma_{(N)}$$

Графики на рис. 9 показывает, что ведущую роль в максимальных нормальных напряжениях меридиональных ребер каркаса без связей играют моменты M_x, M_y . После постановки связей в четырех секторах и далее роль моментов в напряжениях меридиональных ребер резко снижается и становится сравнимой с ролью продольных сил N . Графики на рис. 10 показывают, что изгибающие моменты M_x, M_y определяют величины максимальных нормальных напряжений верхнего кольца как каркаса без связей, так и после постановки связей. В каркасе без связей ведущую роль играют моменты M_x , а после постановки связей – M_y . Графики на рис. 11 показывают, что влияние моментов M_x, M_y и продольных сил N на величины максимальных нормальных напряжениях промежуточных колец как каркаса без связей, так и со связями сопоставимо.

На рис. 12 представлены сравнительные диаграммы максимальных величин нормальных напряжений в меридиональных ребрах, верхнем кольце и промежуточных кольцах купольного каркаса. Эти диаграммы свидетельствуют о значительном влиянии связей в ребристо-кольцевом куполе на напряженное состояние всех групп элементов его каркаса.

Самое значимое влияние связи оказывают на меридиональные ребра, максимальные напряжения в которых уже при установке связей в четырех секторах снижаются до уровня 40 % от первоначальных значений, а при установке связей в восьми и во всех секторах – до уровней 27 и 19 % от первоначальных значений соответственно. В верхнем кольце установка связей в четырех секторах не изменяет макси-

мальных напряжений из-за роста моментов M_y , а установка связей в восьми и во всех секторах снижает напряжения до уровней 60 и 18 % от первоначальных значений соответственно. Максимальные напряжения в отдельных промежуточных кольцах с установкой связей в четырех и восьми секторах повышаются до уровней 208 и 159 % от первоначальных значений соответственно.

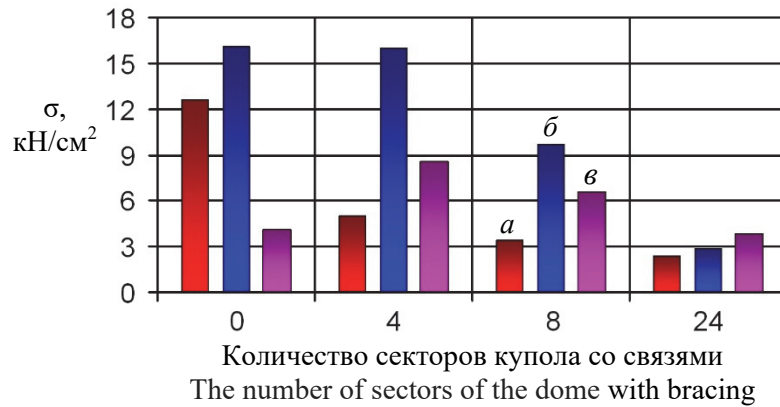


Рис. 12. Максимальные напряжения σ в элементах каркаса купола разных схем связей:
a – меридиональные ребра; *б* – верхнее кольцо; *в* – промежуточные кольца
Figure 12. Maximum stresses σ in the elements of the dome frame for different bracing schemes:
a – meridional ribs; *б* – upper ring; *в* – intermediate rings

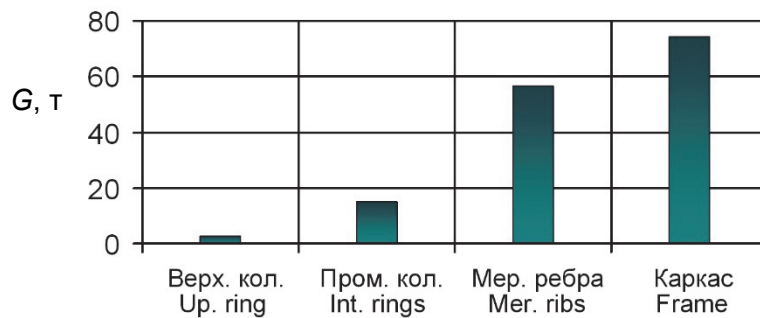


Рис. 13. Вес G каждой группы элементов купольного каркаса без связей
Figure 13. Weight G for each group of elements of the dome framework without bracing

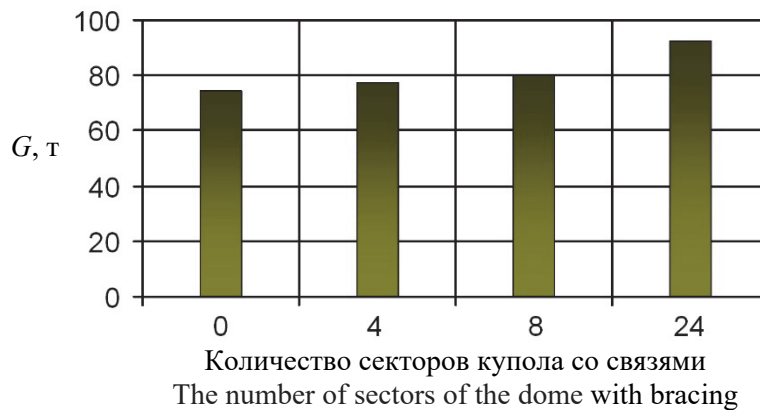


Рис. 14. Вес G металлических конструкций каркаса купола разных схем связей
Figure 14. Weight G of metal structures of the dome framework for different bracing schemes

Снижение максимальных напряжений в меридиональных ребрах и верхнем кольце каркаса после установки связей позволяет уменьшить их сечение и, тем самым, снизить металлоемкость купола. Повышение же максимальных напряжений в промежуточных кольцах после установки связей может привести дополнительным затратам металла. На рис. 13 показаны веса каждой группы конструктивных элементов как частей купольного каркаса без связей. Меридиональные ребра (Мер. ребра) составляют 76 % общего веса каркаса, промежуточные кольца (Пром. кол.) – 20 %, верхнее кольцо (Верх. кол.) – 4 %. Поэтому влияние связей на напряжения в меридиональных ребрах являются определяющим для принятия решения о схеме связей в каркасе ребристо-кольцевого купола.

Установка связей сопровождается добавлением элементов в каркас ребристо-кольцевого купола и, следовательно, к увеличению его металлоемкости. Для принятых здесь сечений связевых стержней, устанавливаемых в четырех секторах, общий вес каркаса увеличивается на 4 %, а после установки связей во всех секторах – на 24 % (рис. 14).

Сопоставление диаграмм рис. 12 с диаграммами рис. 13 и 14 позволяет сделать обоснованное предположение, что несмотря на очевидную эффективность схемы связей в четырех секторах ребристо-кольцевого купола, все же предпочтительнее для более рационального использования сечений элементов и для обеспечения жесткости пространственной конструктивной системы является схема связей в восьми секторах из-за снижения напряжений в верхнем кольце и меньшими напряжениями в промежуточных кольцах.

Заключение

На основании изложенного материала можно сделать следующие **выводы**:

- установка связей в ребристо-кольцевом куполе существенно изменяет напряженное состояние конструктивных элементов каркаса и повышает пространственную жесткость сооружения в целом, что благоприятно сказывается на его надежности;
- установка связей только в четырех секторах ребристо-кольцевого купола является вполне оправданным и весьма эффективным способом повышения жесткости каркаса и снижения расхода металла из-за резкого уменьшения напряжений в меридиональных ребрах как основных элементах каркаса;
- установка связей в восьми секторах ребристо-кольцевого купола предпочтительнее варианта с четырьмя секторами как схемы купольного каркаса с более рациональным расходом металла на его конструктивные элементы;
- установка связей во всех секторах ребристо-кольцевого купола приводит к максимальному снижению напряжений во всех элементах каркаса, но для экономичного расхода металла рекомендуется применение гибких крестовых связей, стержневые элементы которых будут работать только на растяжение.

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. Кривошапко С.Н. К вопросу о применении параболических оболочек вращения в строительстве в 2000–2017 годах // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 4. С. 4–14. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2017-4-4-14>
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.: Изд-во АСВ, 1998. 512 с.
5. 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>
6. 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.
7. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. К.: Факт, 2005. 344 с.
8. 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>
9. Chacko P., Dipu V.S., Manju P.M. Finite element analysis of ribbed dome // International Journal of Engineering Research and Applications. Kerala, 2014. Pp. 25–32.

10. Jasim N.A., Saleh I.S., Faleh S.K. Structural analysis of ribbed domes using finite element method // *International Journal of Civil Engineering Research*. 2017. Vol. 8. No. 2. Pp. 113–130.
11. Anu J.S., Preethi M. Parametric analysis of single layer ribbed dome with diagonal members // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4. Issue 8. Pp. 870–877.
12. 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://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-278-290>
13. 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>

References

1. Tur V.I. *Dome structures: morphogenesis, analysis, design, increase in effectiveness*. Moscow: ASV Publ.; 2004.
2. Krivoschapko S.N. Metal ribbed-and-circular and lattice shells from the XIXth until the first half of the XXth century. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2014;(6):4–15. (In Russ.)
3. Krivoschapko S.N. On application of parabolic shells of revolution in civil engineering in 2000–017. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017;(4):4–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2017-4-4-14>
4. Kuznetsov V.V. (ed.) *Metal structures. Vol. 2. Steel structures of buildings and constructions: reference book the designer*. Moscow: ASV Publ.; 1998. (In Russ.)
5. 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>
6. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Perelmuter A.V., Perelmuter M.A. *SCAD Office. Computer system SCAD*. Moscow: ASV Publ.; 2004.
7. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. *Computer models of structures*. Kiev: Fakt Publ.; 2005.
8. 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>
9. Chacko P., Dipu V.S., Manju P.M. Finite element analysis of ribbed dome. *International Journal of Engineering Research and Applications*. Kerala; 2014. p. 25–32.
10. Jasim N.A., Saleh I.S., Faleh S.K. Structural analysis of ribbed domes using finite element method. *International Journal of Civil Engineering Research*. 2017;8(2):113–130.
11. Anu J.S., Preethi M. Parametric analysis of single layer ribbed dome with diagonal members. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017;4(8):870–877.
12. 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.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-4-278-290>
13. 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>