

DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-14-26  
УДК 624.074.2:624.014:693.8  
EDN: YPWZQU

Научная статья / Research article

## Работа металлического каркаса ребристо-кольцевого купола при уменьшении количества поддерживающих его колонн

Е.В. Лебедь 

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

✉ evglebed@mail.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 6 июля 2023 г.  
Доработана: 20 декабря 2023 г.  
Принята к публикации: 30 декабря 2023 г.

### Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Аннотация.** Исследовалось напряженное состояние металлического каркаса ребристо-кольцевого купола, если под ним постепенно уменьшать количество поддерживающих колонн. При этом сохраняется одинаковость расстояний или шагов между колоннами по всему контуру опорного кольца. Основные элементы купольного каркаса и колонны приняты из стальных двутавров. В качестве объектов исследования рассматривались каркасы, купола которых опираются на разное количество циклически симметричных колонн. Все купола характеризуются одинаковым геометрическим строением и размером, одинаковыми сечениями однотипных элементов каркаса и подвержены воздействию одинаковых нагрузок. Исследования проводились на компьютерных моделях посредством расчетов на совместное действие нагрузки от веса несущих и ограждающих конструкций и несимметричной снеговой нагрузки. Модели с уменьшенным количеством колонн получены регулярным их удалением из исходной компьютерной модели. В процессе расчетов определялись напряжения в элементах каркасов всех моделей, которые сравнивались между собой. Получены графики деформаций, сравнительные диаграммы зависимостей напряженного состояния элементов каркасов исходной и преобразованных моделей. Дана оценка изменения напряженного состояния каркаса ребристо-кольцевого купола с уменьшением количества колонн. Отмечены значительные изменения напряженного состояния опорного кольца.

**Ключевые слова:** ребристо-кольцевой купол, меридиональные ребра, верхнее кольцо, опорное кольцо, колонны, компьютерная модель, статический расчет, напряженное состояние

### Для цитирования

Лебедь Е.В. Работа металлического каркаса ребристо-кольцевого купола при уменьшении количества поддерживающих его колонн // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 1. С. 14–26. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-1-14-26>

Лебедь Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия; ORCID: 0000-0003-3926-8701; E-mail: evglebed@mail.ru

© Лебедь Е.В., 2024



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

# Behavior of Metal Frame of Ribbed-ring Dome with Decrease in Number of Supporting Columns

Evgeny V. Lebed  

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

✉ evglebed@mail.ru

## Article history

Received: July 6, 2023

Revised: December 20, 2023

Accepted: December 30, 2023

## Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

**Abstract.** Investigation of the stress state of the metal frame of a ribbed-ring dome, when the number of supporting columns under it is gradually reduced. With that, the same distances or steps between the columns are maintained along the entire contour of the support ring. The main elements of the dome frame and columns are made of steel I-beams. Frames, the domes of which are supported by a different number of cyclically symmetrical columns, were considered as subjects of research. All the domes are characterized by the same geometric structure and size, the same cross sections of the same type of frame elements and are exposed to the same loads. The research was carried out on computer models by calculating the combined effect of the load from the weight of load-bearing and enclosing structures and an asymmetric snow load. The models with a reduced number of columns are obtained by regularly removing them from the original computer model. During the analysis, the stresses in the elements of the frames of all models were determined, which were compared with each other. Deformation graphs and comparative diagrams of the stress state relationships of the frame elements of the original and transformed models are obtained. An assessment of the change in the stress state of the ribbed-ring dome frame with a decrease in the number of columns is given. Significant changes in the stress state of the support ring were noted.

**Keywords:** ribbed-ring dome, meridional ribs, upper ring, support ring, columns, computer model, statical calculation, stress state

## For citation

Lebed E.V. Behavior of metal frame of ribbed-ring dome with decrease in number of supporting columns. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024;20(1):14–26. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-1-14-26>

## 1. Введение

Металлические купола применяются в качестве покрытий зданий во всем мире благодаря выразительности своей геометрической формы, а также из-за надежности таких конструктивных систем. Благодаря пространственной жесткости и экономичности расхода металла они занимают ведущее место среди большепролетных пространственных покрытий [1–3].

Геометрические схемы каркасов металлических куполов зависят от перекрываемых пролетов и назначения здания [4; 5]. Наиболее простыми по геометрической схеме считаются ребристо-кольцевые купола. Но даже в ребристо-кольцевых куполах возможны различные геометрические схемы, связанные с числом секторов по окружности и ярусов по высоте. Кроме этого, важным фактором работы купольного каркаса служит количество поддерживающих их колонн. От этого зависит статическая схема всего каркаса здания и напряженное состояние элементов купольных каркасов.

Обычно колонны в ребристо-кольцевых куполах располагают под каждым меридиональным ребром. Однако при большом числе секторов или ребер в купольном каркасе такое конструктивное решение может оказаться неудобным по разным причинам. В этом случае прибегают к использованию меньшего количества колонн по сравнению с числом меридиональных ребер. Такой подход приводит к изменению работы купола и, как следствие, изменению напряженного состояния элементов купольного каркаса.

---

*Evgeny V. Lebed*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; ORCID: 0000-0003-3926-8701; E-mail: evglebed@mail.ru

Исследованию различных аспектов ребристо-кольцевых куполов в различных компьютерных программах посвящено много публикаций. Например, анализировалось напряженное состояние купольного каркаса при изменении параметров его геометрической схемы [6], при разных отношениях высоты купола к диаметру для разных пролетов [7], при включении в работу кирпичного заполнения ячеек каркаса между стальными ребрами и кольцами [8], при разных отношениях высоты купола и разных сечениях стержневых элементов [9], при разной высоте по сравнению с пролетом купольного каркаса со связями [10]. На примере большепролетного ребристо-кольцевого купола покрытия резервуара уточняется методика расчета в линейной и нелинейной постановках [11]. Однако отсутствуют сравнительные исследования ребристо-кольцевых куполов, опирающихся на колонны, число которых меньше числа меридиональных ребер.

## 2. Методы

С целью выяснения зависимости напряженного состояния ребристо-кольцевого купола от количества поддерживающих его колонн выполнялись данные компьютерные исследования. В качестве объектов исследования рассматривались каркасы, купола которых опираются на разное количество циклически симметричных колонн. Все купола характеризуются одинаковой геометрической схемой, одинаковым пролетом и высотой, одинаковыми сечениями меридиональных ребер, колец и колонн, а также подвергались воздействию одинаковых нагрузок. Для этого был запроектирован купол исходного каркаса с максимальным количеством колонн, который впоследствии корректировался для расчета каркасов с уменьшенным числом колонн.

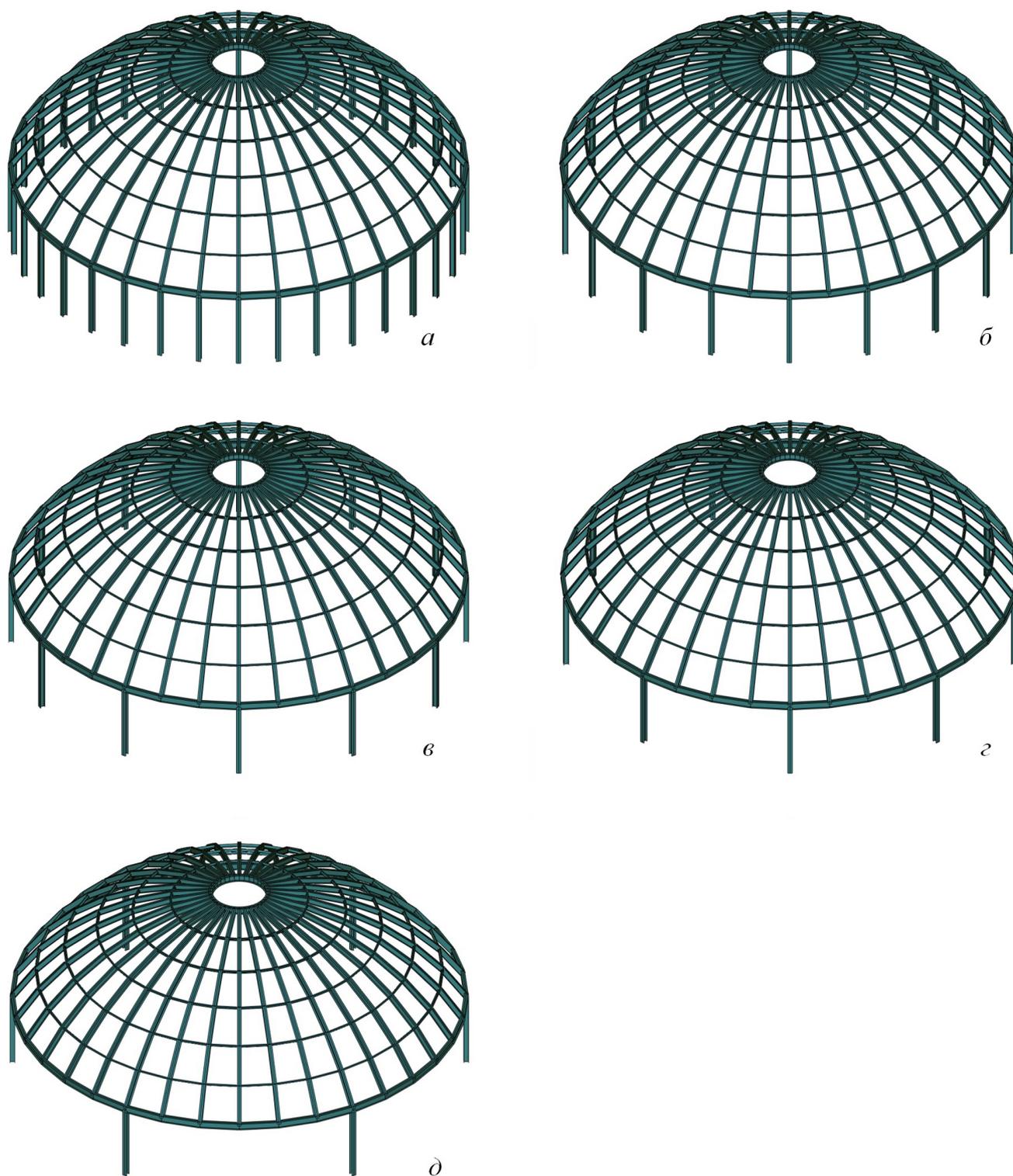
Объектом для исследования служил каркас ребристо-кольцевого купола сферической формы с радиусом кривизны 23 м, состоящий из 36 ребер и 7 колец. Таким образом, купол разделен ребрами на 36 секторов. Диаметр нижнего кольца 39,3 м, диаметр верхнего кольца 5,0 м, высота купольного каркаса 11 м. Купол опирается на колонны высотой 7,0 м, которых в исходном каркасе насчитывается 36. Все элементы каркаса сооружения с куполом приняты, по результатам расчета, из прокатных двутавров: меридиональные ребра — I 50Ш1, верхнее кольцо — I 60Ш1, нижнее кольцо — I 60Ш4, остальные кольца — I 20Ш1, колонны — I 40К3. Особо отметим, что узлы сопряжения элементов купольного каркаса друг с другом в нормальном направлении жесткие. Сопряжения меридиональных ребер с верхним и нижним кольцами в кольцевом направлении, а также промежуточных колец с ребрами в тангенциальном направлении — шарнирные. Сопряжение купольного каркаса через нижнее (опорное) кольцо с колоннами шарнирное как в радиальном, так и кольцевом направлениях.

Компьютерная модель этого каркаса являлась исходной для исследования. На основе исходной созданы модели с уменьшенным количеством колонн посредством их регулярного удаления из исходной компьютерной модели (рис. 1). Отличительным признаком этих моделей друг от друга являлось число секторов между колоннами. При максимальном количестве колонн оно было равно 1, а при минимальном — 6. Исследования выполнялись на компьютерных моделях каркасов с ребристо-кольцевым куполом в программе SCAD как пространственных стержневых систем [12; 13]. Ранее автором выполнялось исследование ребристо-кольцевых куполов при различных способах монтажа [14; 15], а также при разном количестве установленных связей [16]. Представленные здесь результаты получены в соответствии с общепринятыми принципами исследований пространственных стержневых систем.

Расчет каркасов производился на совместное действие нагрузки от веса ограждающих или кровельных конструкций и несущего каркаса, симметричной и несимметричной снеговых нагрузок (рис. 2), для которых были составлены соответствующие комбинации нагрузок. Наибольшее влияние на напряженное состояние каркасов пространственных сооружений оказывает комбинация загрузений с несимметричной снеговой нагрузкой<sup>1</sup>. Именно она определяет необходимые сечения основных несущих элементов купольных каркасов.

В процессе расчетов определялись внутренние усилия  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_t$  в элементах каркасов всех моделей, которые сравнивались между собой. Главными же критериями оценки работы рассматриваемых каркасов служили напряжения  $\sigma$  в наиболее нагруженных элементах меридиональных ребер, верхнего кольца, нижнего кольца и колонн, а также деформации куполов, которые определялись по максимальным перемещениям их узлов  $f$ .

<sup>1</sup> СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85\*. Москва: Минстрой России, 2016. 102 с. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/13673/> (дата обращения: 12.09.2023).

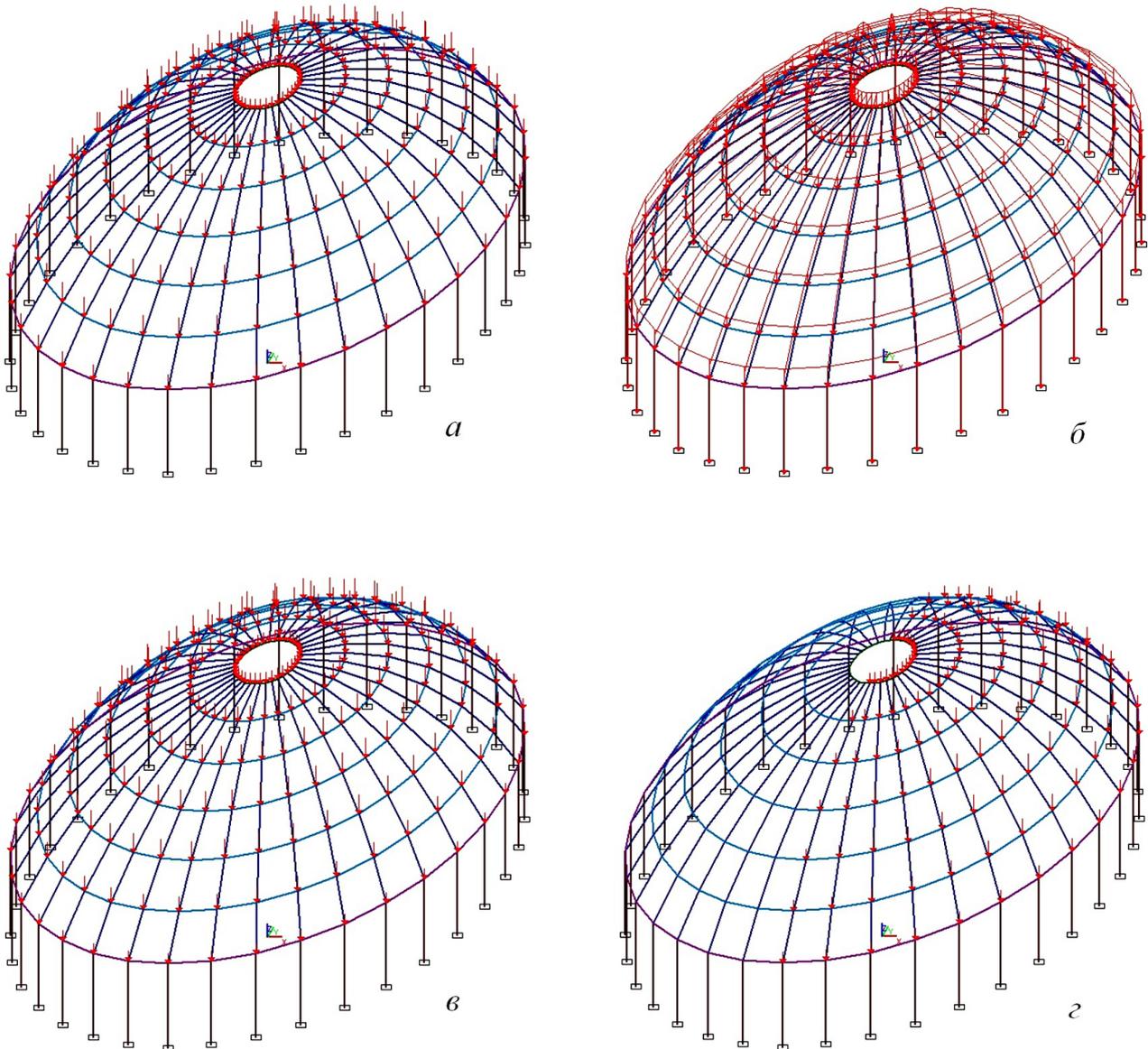


**Рис. 1.** Схемы купольных каркасов с разным числом секторов между колоннами:  
*a* — 1 сектор, *б* — 2 сектора, *в* — 3 сектора, *г* — 4 сектора, *д* — 6 секторов

Источник: выполнено автором

**Figure 1.** Models of dome frames with different number of sectors between columns:  
*a* — 1 sector, *б* — 2 sectors, *в* — 3 sectors, *г* — 4 sectors, *д* — 6 sectors

Source: made by the author

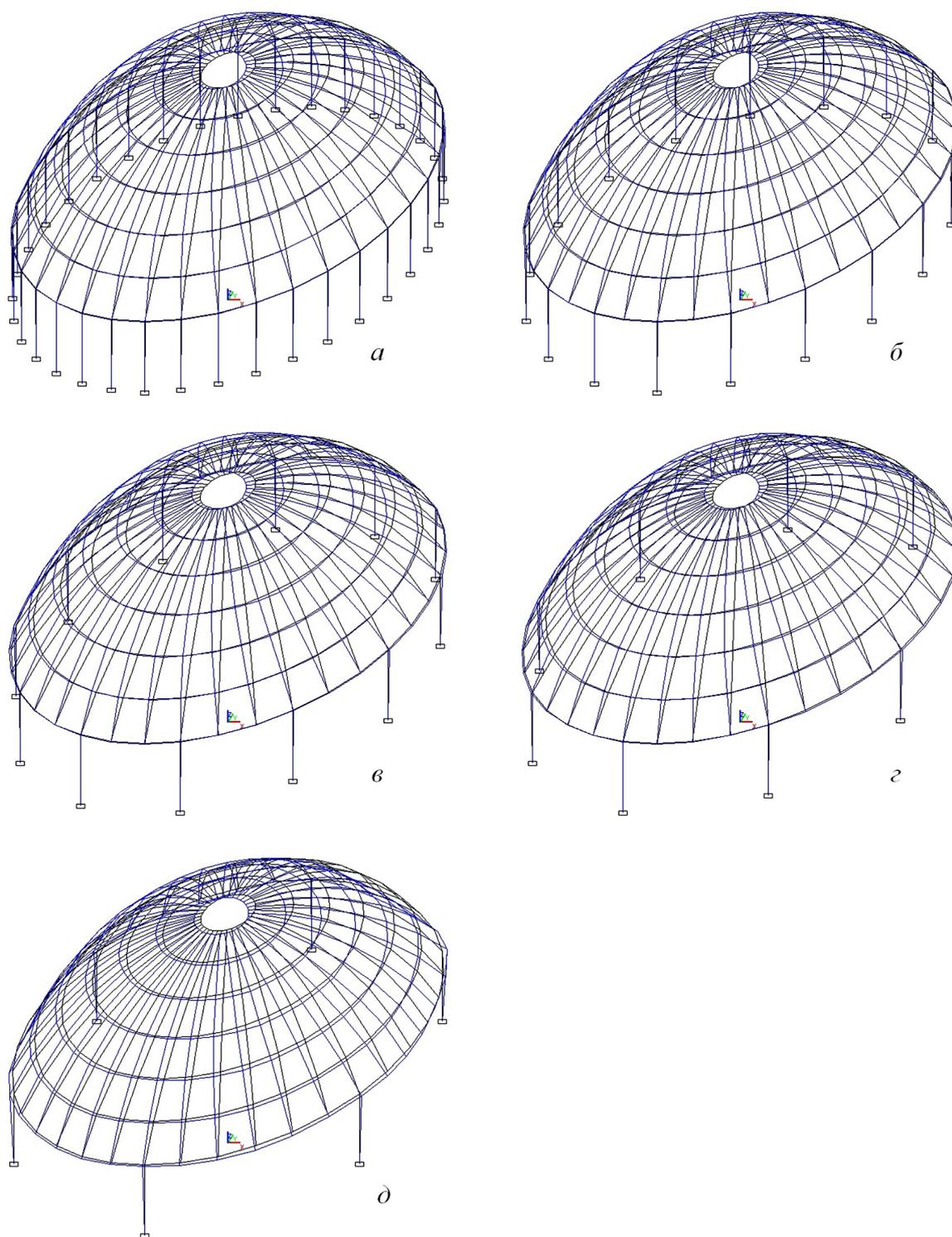


**Рис. 2.** Схемы загрузок куполов на примере исходного каркаса от веса:  
*a* — кровельных конструкций, *б* — каркаса, *в* — симметричного снега, *г* — несимметричного снега  
 Источник: выполнено автором

**Figure 2.** Dome loading patterns, illustrated on the original frame, from the weight of:  
*a* — roofing structures, *б* — supporting frame, *в* — symmetrical snow, *г* — asymmetrical snow  
 Source: made by the author

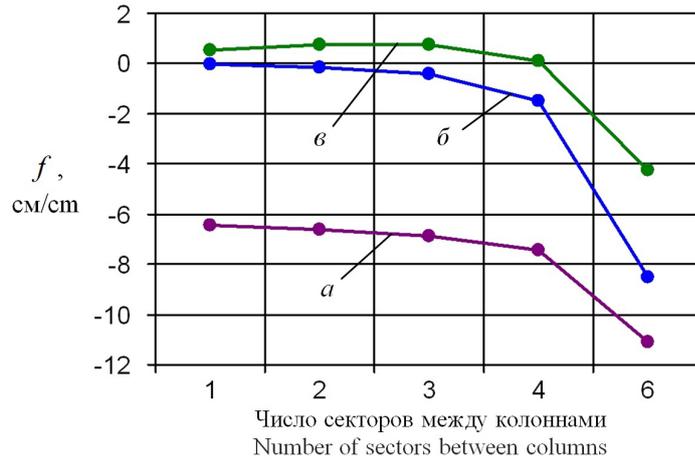
Исследование показало, что с уменьшением количества колонн общий характер деформаций купольных каркасов в основном остается неизменным (рис. 3). Тем не менее происходит увеличение прогибов  $f_z$  купольного каркаса в целом (рис. 4, *a*) и их увеличение в опорном кольце (рис. 4, *б*), которое в последней модели (шесть секторов) превосходит максимальные прогибы исходной модели.

А горизонтальные смещения  $f_x$  опорного кольца сначала происходят в сторону увеличения диаметра, а затем — его уменьшения (рис. 4, *в*).



**Рис. 3.** Деформации купольных каркасов с разным числом секторов между колоннами:  
*a* — 1 сектор; *б* — 2 сектора; *в* — 3 сектора; *г* — 4 сектора; *д* — 6 секторов  
Источник: выполнено автором

**Figure 3.** Deformations of dome frames with different number of sectors between columns:  
*a* — 1 sector; *б* — 2 sectors; *в* — 3 sectors; *г* — 4 sectors; *д* — 6 sectors  
Source: made by the author



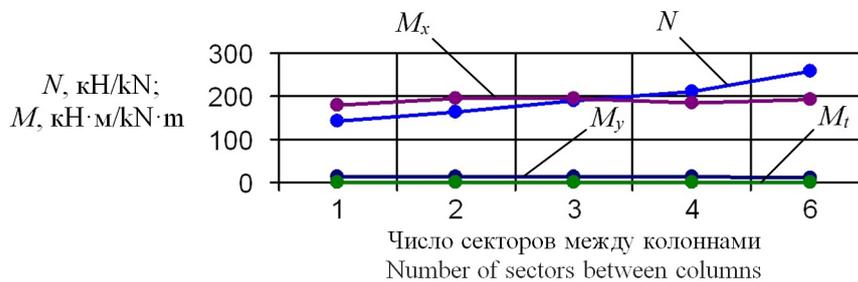
**Рис. 4.** Величины максимальных деформаций купольных каркасов с разным числом секторов между колоннами: *a* — в целом купола по *z*; *b* — опорное кольцо по *z*; *v* — опорное кольцо по *x*  
 Источник: выполнено автором

**Figure 4.** The values of maximum deformations in dome frames with a different number of sectors between columns: *a* — whole dome in *z*; *b* — support ring in *z*; *v* — support ring in *x*  
 Source: made by the author

### 3. Результаты

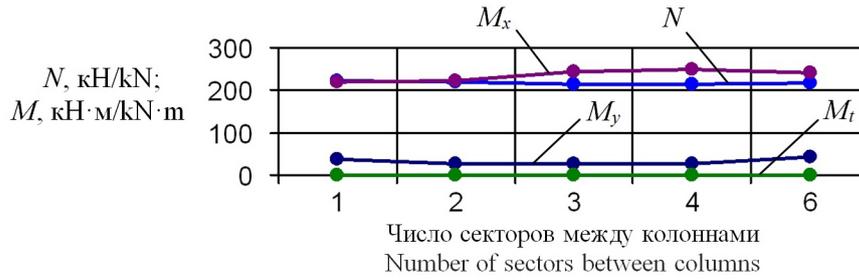
При регулярном удалении колонн из исходной компьютерной модели в купольном каркасе происходят изменения внутренних усилий  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_t$ , но в разных элементах его по-разному. Следует отметить, что наряду с продольными силами  $N$ , изгибающими моментами в плоскости наибольшей и наименьшей жесткости  $M_x$ ,  $M_y$ , фиксировались и крутящие моменты  $M_t$ .

В меридиональных ребрах купола увеличение числа секторов между колоннами практически не влияет на изгибающие моменты  $M_x$ ,  $M_y$  (рис. 5), но приводит к небольшому увеличению продольных сил  $N$  в тех ребрах, под которыми установлены колонны. В верхнем кольце купола увеличение числа секторов между колоннами практически не влияет на внутренние усилия (рис. 6), хотя незначительный рост наблюдается в моментах  $M_x$ .



**Рис. 5.** Максимальные усилия  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_t$  в меридиональных ребрах купола с разным числом секторов между колоннами  
 Источник: выполнено автором

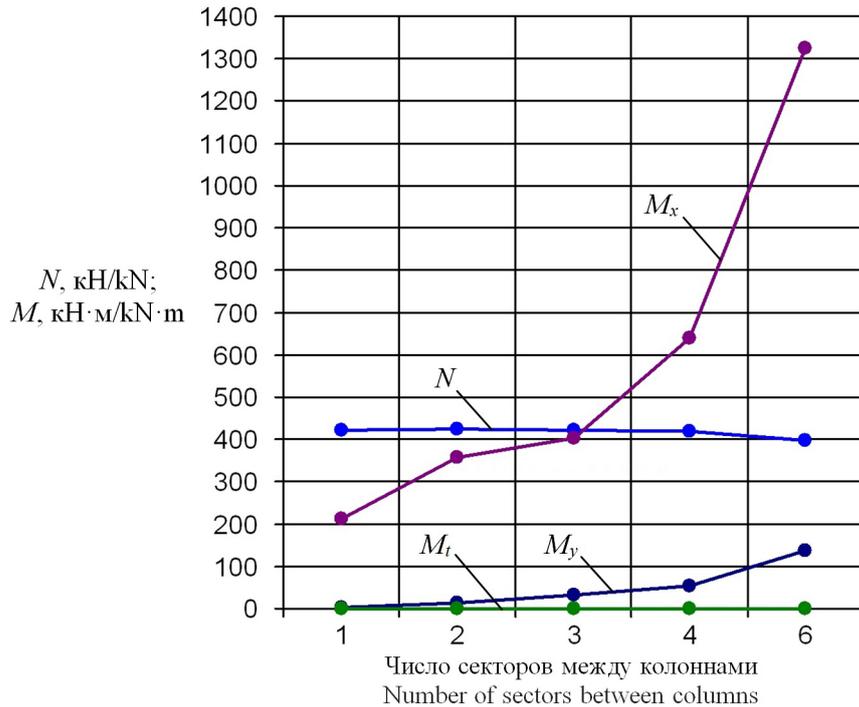
**Figure 5.** Maximum values of  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_t$  in the meridional edges of the dome with a different number of sectors between the columns  
 Source: made by the author



**Рис. 6.** Максимальные усилия  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_t$  в верхнем кольце купола с разным числом секторов между колоннами  
Источник: выполнено автором

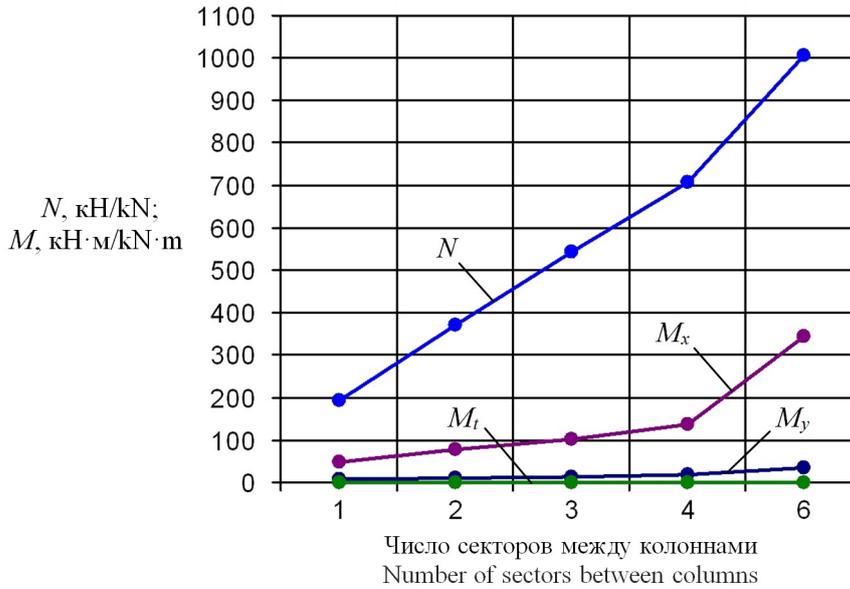
**Figure 6.** Maximum values of  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_t$  in the upper ring of the dome with a different number of sectors between the columns  
Source: made by the author

В опорном кольце купола с увеличением числа секторов между колоннами происходит резкое, в несколько раз, увеличение наиболее значимых моментов  $M_x$ , а также моментов  $M_y$  (рис. 7), продольные же силы  $N$  практически не изменяются. В колоннах каркаса с куполом с увеличением числа секторов между колоннами происходит ожидаемое кратное увеличение значительных продольных сил  $N$  (рис. 8), а также существенное увеличение моментов  $M_x$  и небольшой рост моментов  $M_y$ .



**Рис. 7.** Максимальные усилия  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_t$  в опорном кольце купола с разным числом секторов между колоннами  
Источник: выполнено автором

**Figure 7.** Maximum values of  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_t$  in the support ring of the dome with a different number of sectors between the columns  
Source: made by the author



**Рис. 8.** Максимальные усилия  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_t$  в колоннах каркаса с разным числом секторов между колоннами

Источник: выполнено автором

**Figure 8.** Maximum values of  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_t$  in the columns of the frame with a different number of sectors between the columns  
Source: made by the author

Крутящие моменты  $M_t$  во всех элементах каркаса и в исходной модели, и в других оказались чрезвычайно маленькими. Но их явный рост с увеличением числа секторов между колоннами наблюдается только в опорном кольце.

Не всегда значения внутренних усилий  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_t$  отражают степень их влияния на сечения элементов каркаса. Поэтому работа каркаса при уменьшении количества колонн, поддерживающих купол, анализировалась и по напряжениям, вычисленным по формуле

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{W_x} \pm \frac{M_y}{W_y}. \quad (1)$$

При наличии крутящих моментов  $M_t$  появляются и касательные напряжения

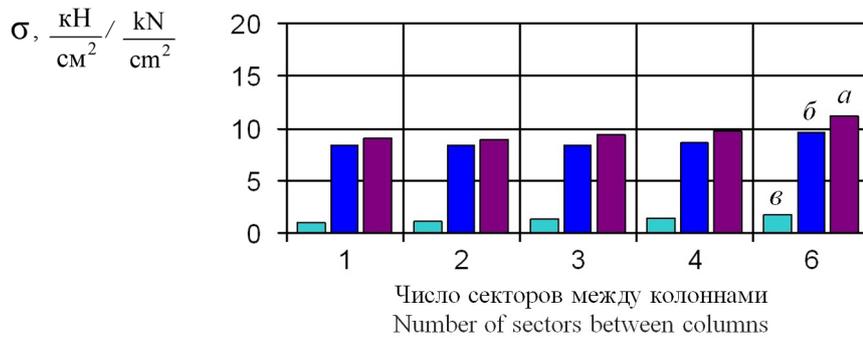
$$\tau = \frac{M_t}{W_t}. \quad (2)$$

В таком случае следует учитывать приведенные напряжения

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}. \quad (3)$$

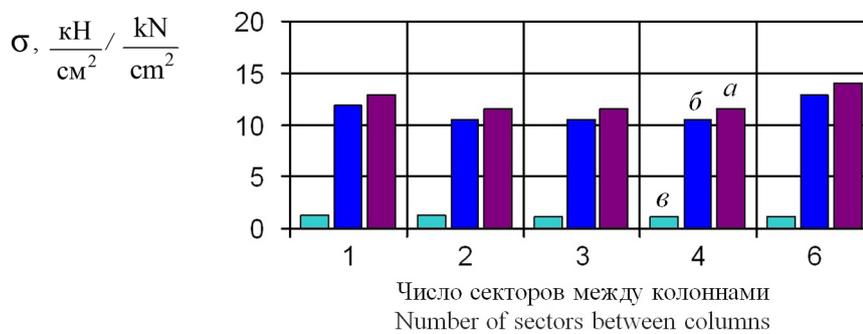
Значения крутящих моментов  $M_t$  по сравнению с другими внутренними усилиями  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  оказывались близкими к нулю (см. рис. 4–8). Это привело к тому, что отличие  $\sigma_{\text{пр}}$  от  $\sigma$  было несущественным и кручением в исследуемых каркасах можно пренебречь.

Были рассмотрены зависимости максимальных напряжений  $\sigma$  в различных элементах каркаса от увеличения числа секторов между колоннами, а также влияние на них напряжений только от изгибающих моментов  $\sigma_M$  и отдельно от продольных сил  $\sigma_N$  (рис. 9–12). Необходимо отметить, что максимальные напряжения  $\sigma$  на представленных диаграммах не являются суммой максимальных напряжений  $\sigma_M$  и  $\sigma_N$ , поскольку последние определены для разных сечений (стержней) элементов каркаса. Диаграммы на рис. 9–12 показывают, что ведущую роль в максимальных напряжениях  $\sigma$  всех элементов каркаса играют изгибающие моменты  $M_x, M_y$ .



**Рис. 9.** Максимальные напряжения  $\sigma$  в меридиональных ребрах купола с разным числом секторов между колоннами:  $a$  — суммарные;  $b$  — только от  $M$ ;  $v$  — только от  $N$   
 Источник: выполнено автором

**Figure 9.** Maximum stresses  $\sigma$  in the meridional ribs of the dome with a different number of sectors between the columns:  $a$  — total;  $b$  — only from  $M$ ;  $v$  — only from  $N$   
 Source: made by the author



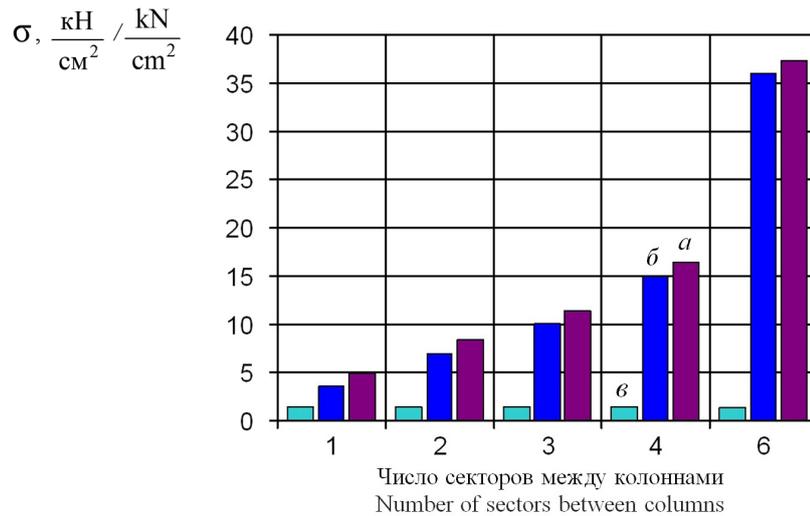
**Рис. 10.** Максимальные напряжения  $\sigma$  в верхнем кольце купола с разным числом секторов между колоннами:  $a$  — суммарные;  $b$  — только от  $M$ ;  $v$  — только от  $N$   
 Источник: выполнено автором

**Figure 10.** Maximum stresses  $\sigma$  in the upper ring of the dome with a different number of sectors between the columns:  $a$  — total;  $b$  — only from  $M$ ;  $v$  — only from  $N$   
 Source: made by the author

В меридиональных ребрах купола с числом секторов между колоннами до трех включительно максимальные напряжения  $\sigma$  практически не изменяются (см. рис. 9). При числе секторов между колоннами 4 и 6 максимальные напряжения  $\sigma$  увеличиваются по сравнению с исходной моделью на 7 % и 23 % соответственно. В верхнем кольце купола с числом секторов между колоннами от двух до четырех включительно максимальные напряжения  $\sigma$  даже уменьшились на 10 % (см. рис. 10) по сравнению с исходной

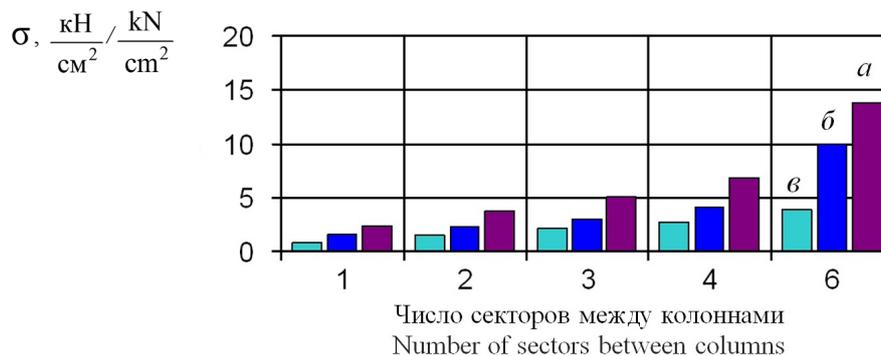
моделью. Однако при числе секторов между колоннами, равными шести, максимальные напряжения  $\sigma$  увеличиваются по сравнению с исходной моделью на 8 %.

В нижнем кольце купола с увеличением числа секторов между колоннами от двух до шести максимальные напряжения  $\sigma$  увеличиваются по сравнению с исходной моделью в 1,7; 2,3; 3,3 и 7,5 раза (рис. 11) соответственно, что объясняется быстрым ростом моментов  $M_x$ ,  $M_y$ . Причем при переходе от 4-х до 6-и секторов между колоннами показывают резкий скачок максимальные напряжения  $\sigma$ . В колоннах каркаса с увеличением числа секторов между колоннами от двух до шести максимальные напряжения  $\sigma$  увеличиваются по сравнению с исходной моделью в 1,6; 2,1; 2,9 и 5,9 раза (рис. 12) соответственно, что объясняется ростом продольных сил  $N$  и моментов  $M_x$ .



**Рис. 11.** Максимальные напряжения  $\sigma$  в опорном кольце купола с разным числом секторов между колоннами: *a* — суммарные; *b* — только от  $M$ ; *v* — только от  $N$   
Источник: выполнено автором

**Figure 11.** Maximum stresses  $\sigma$  in the dome support ring with a different number of sectors between the columns: *a* — total; *b* — only from  $M$ ; *v* — only from  $N$   
Source: made by the author



**Рис. 12.** Максимальные напряжения  $\sigma$  в колоннах каркаса с разным числом секторов между колоннами: *a* — суммарные; *b* — только от  $M$ ; *v* — только от  $N$   
Источник: выполнено автором

**Figure 12.** Maximum stresses  $\sigma$  in the columns of the frame with a different number of sectors between the columns: *a* — total; *b* — only from  $M$ ; *v* — only from  $N$   
Source: made by the author

Сопоставление диаграмм на рис. 9–12 позволяет заключить, что увеличение числа секторов между колоннами повышает напряжение в основном в опорном кольце купола и в колоннах. Причем напряжение в опорном кольце возрастает намного быстрее, чем в колоннах.

#### 4. Заключение

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. Уменьшение количества колонн, поддерживающих купол, приводит к резкому повышению напряжений в опорном кольце и постепенному увеличению напряжений в колоннах. Напряжения в меридиональных ребрах и верхнем кольце купола изменяются мало.
2. При жестком сопряжении меридиональных ребер с опорным и верхним кольцами купола в нормальном направлении уменьшение количества поддерживающих колонн существенных по величине крутящих моментов не вызывает.
3. При проектировании куполов с числом меридиональных ребер, кратно превышающих количество колонн, сечение опорного кольца следует также кратно увеличивать в предположении его работы на изгиб.
4. Не рекомендуется проектировать ребристые купола, опирающиеся на меньшее по сравнению с ребрами количество колонн, при котором между колоннами окажутся более трех ребер или секториальный угол между соседними колоннами будет больше  $40^\circ$ .
5. В случае шарнирного сопряжения меридиональных ребер с опорным и верхним кольцами купола в нормальном направлении при уменьшении количества колонн следует выполнить дополнительные исследования.

#### Список литературы

1. Тур В.И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности. М.: Изд-во АСВ, 2004. 96 с. ISBN 5-93093-249-2
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. EDN: SYZJFN
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. М.: Изд-во АСВ, 1998. 512 с. ISBN 5-87829-081-2
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. Chandiwala A. Analysis and design of steel dome using software // International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET). 2014. Vol. 3. No. 3. P. 35–39. <https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0303006>
7. Chacko P., Dipu V.S., Manju P.M. Finite Element Analysis of Ribbed Dome // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 2014. P. 25–32.
8. 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. P. 113–130. URL: [https://ripublication.com/ijcer17/ijcerv8n2\\_04.pdf](https://ripublication.com/ijcer17/ijcerv8n2_04.pdf) (accessed: 22.03.2023).
9. Anu J.S., Preethi M. Parametric Analysis of Single layer Ribbed dome with Diagonal members // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2017. Vol. 4. No. 8. P. 870–877. URL: <https://www.irjet.net/archives/V4/i8/IRJET-V4I8150.pdf> (accessed: 22.03.2023).
10. Merilmol E., 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. P. 333–338. URL: <https://ijettjournal.org/archive/ijett-v28p264> (accessed: 22.03.2023).
11. Кардапольцев А.В., Каравайченко М.Г., Кантемиров И.Ф. Анализ прочности ребристо-кольцевой купольной крыши резервуара с учетом физической нелинейности металла // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2021. № 5–6. С. 37–43.
12. 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. ISBN 978-5903686-02-4
13. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. Киев: Факт, 2005. 344 с. ISBN 966-359-027-0

14. 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>

15. Lebed E. Analysis of the stress state of the ribber-ring metal dome under different methods of installation // XXIV International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2021). Moscow, 2021. Vol. 263. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126302046>

16. 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>

## References

1. Tur V.I. *Dome Structures: Morphogenesis, Analysis, Design, Increase in Effectiveness*. Moscow: ASV Publ.; 2004. (In Russ.) ISBN 5-93093-249-2

2. Krivoshapko S.N. Metal ribbed-and-circular and lattice shells from the XIXth until the first half of the XXth centurie. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2014;6:4–15. (In Russ.) EDN: SYZJFN

3. Krivoshapko S.N. On application of parabolic shells of revolution in civil engineering in 2000–2017. *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. *Metal Structures. Vol. 2. Steel structures of buildings and constructions. Reference book the designer*. Moscow: ASV Publ.; 1998. (In Russ.) ISBN 5-87829-081-2

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. Chandiwala A. Analysis and design of steel dome using software. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*. 2014;03(03):35–39. <https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0303006>

7. 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.

8. 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. Available from: [https://ripublication.com/ijcer17/ijcerv8n2\\_04.pdf](https://ripublication.com/ijcer17/ijcerv8n2_04.pdf) (accessed: 22.03.2023).

9. Anu J.S., Preethi M. Parametric Analysis of Single layer Ribbed dome with Diagonal members. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017;04(08):870–877. Available from: <https://www.irjet.net/archives/V4/i8/IRJET-V4I8150.pdf> (accessed: 22.03.2023).

10. 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. Available from: <https://ijettjournal.org/archive/ijett-v28p264> (accessed: 22.03.2023).

11. Kardapoltsev A.V., Karavaychenko M.G., Kantemirov I.F. Numerical simulation of the ribbed-ring dome roof of a tank, taking into account the physical nonlinearity. *Transport and storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2021; 5–6:37–43.

12. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A. *SCAD Office. Computer system SCAD*. Moscow: ASV Publ.; 2004. (In Russ.) ISBN 978-5903686-02-4.

13. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. *Computer models of structures*. Kiev: Fakt Publ.; 2005. (In Russ.) ISBN 966-359-027-0

14. 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>

15. Lebed E. Analysis of the stress state of the ribber-ring metal dome under different methods of installation. XXIV International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2021). Moscow. 2021; 263:02046. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126302046>

16. 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>