

DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-6-452-464
УДК 624.074.2:624.014:693.8

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Влияние высоты ребристо-кольцевого купола на напряженное состояние его каркаса в процессе навесного монтажа

Е.В. Лебедь

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

История статьи

Поступила в редакцию: 27 августа 2020 г.
Доработана: 14 октября 2020 г.
Принята к публикации: 11 ноября 2020 г.

Аннотация

Цель. Выполнить анализ напряженного состояния конструкций ребристо-кольцевых куполов разной высоты при навесном монтаже. Купола имеют металлические каркасы сферической формы и опорный контур одинакового диаметра. Из-за разной высоты изменяется крутизна геометрической формы куполов. Исследование посвящено установлению зависимости между напряженным состоянием каркаса и крутизной купола при навесном монтаже. Выяснялось, как высота ребристо-кольцевого купола влияет на напряженное состояние его каркаса при навесном монтаже. **Методы.** Разработаны компьютерные модели проектных каркасов ребристо-кольцевых куполов разной высоты из стальных двутавров. На основе проектных моделей созданы монтажные модели неполного каркаса для разных стадий монтажа. И для проектной, и для всех монтажных моделей каркасов куполов разной высоты выполнены компьютерные расчеты на действие нагрузки от собственного веса. В результате расчетов для всех куполов и на всех стадиях монтажа определены деформации и напряжения в меридиональных ребрах, которые сравнивались с проектными схемами. **Результаты.** Получены сравнительные графики деформаций купольных каркасов, диаграммы изменения степени использования прочности стали в меридиональных ребрах на всех стадиях навесного монтажа. Показаны также сравнительные графики монтажных и проектных напряжений в меридиональных ребрах на разных ярусах для всех стадий навесного монтажа. Дана оценка монтажным напряженным состояниям, отмечена их неизбежность и степень влияния на напряженное состояние купольных каркасов.

Ключевые слова: ребристо-кольцевой купол, металлический каркас, меридиональные ребра, навесной монтаж, компьютерная модель, напряжения в элементах

Для цитирования

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. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-6-452-464>

Influence of the height of the ribbed-ring dome on the stress state of its frame during the overhang mounting process

Evgeny V. Lebed

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

Article history

Received: August 27, 2020
Revised: October 14, 2020
Accepted: November 11, 2020

Abstract

The aim of the research. To analyze the stress state of structures of ribbed-ring domes of different heights during overhang erection. The domes have spherical metal frames and a support contour of the same diameter. Due to different heights, the steepness of the geometric shape of the domes changes. The study is

Лебедь Евгений Васильевич, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 5297-2700, Scopus Author ID: 57197822677.

Evgeny V. Lebed, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures, Candidate of Technical Science; eLIBRARY SPIN-code: 5297-2700, Scopus Author ID: 57197822677.

© Лебедь Е.В., 2020



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

For citation

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.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-6-452-464>

devoted to establishing the relationship between the stress state of the frame and the steepness of the dome when mounted. It was investigated how the height of the ribbed-ring dome affects the stress state of its frame during overhang mounting process. *Methods*. Computer models of design frames of ribbed-ring domes of different heights made of steel I-beams were developed. Based on design models, a sequence of assembly models for incomplete frames was created for different stages of installation. Both for the design and for all installation models of dome frames of different heights, computer calculations were performed for the effect of the load from its own weight. As a result of calculations for all domes and at all stages of installation, deformations and stresses in the meridional ribs were determined, which were compared with the design diagrams. *Results*. Comparative graphs of deformations of dome frames and diagrams of changes in the degree of use of steel strength in meridional ribs at all stages of mounted installation are obtained. Comparative graphs of installation and design stresses in the meridional ribs on different tiers for all stages of mounted installation are also shown. The assessment of the installation stress states is given, their inevitability and the degree of influence on the stress state of the dome frames are noted.

Keywords: ribbed-ring dome, metal frame, meridional ribs, mounted installation, computer model, stresses in elements

1. Введение

Каркасы металлических куполов представляют собой пространственные конструктивные системы. Поэтому они обладают жесткостью, необходимой для надежной работы куполов в качестве покрытий зданий. Купола экономичны по расходу металла и обладают выразительным внешним обликом. Они занимают ведущее место в мировой строительной практике среди всех пространственных конструкций [1; 2]. Обычно купола применяются в качестве покрытий зданий при больших пролетах [3].

Как и другие большепролетные пространственные конструктивные системы, купола не появляются сразу и целиком. Свою проектную форму они приобретают постепенно в процессе возведения и в течение длительного времени [4; 5]. В начале монтажа появляются лишь отдельные конструкции или фрагменты купольного каркаса. Затем к ним добавляются новые конструкции, в результате чего поэтапно формируется покрытие. Только после монтажа всех элементов каркаса образуются и конструктивная, и расчетная схемы купола, предусмотренные проектом. Монтаж купольного каркаса сопровождается появлением и преобразованием сложных конструктивных систем. На разных стадиях монтажа каркаса возникают разные расчетные схемы промежуточных конструктивных систем, воспринимающих нагрузки от собственного веса [5; 6].

Вид и статический характер монтажных расчетных схем зависят от конструктивного решения купольного каркаса и принятого способа его возведения. Способ возведения или монтажа выбирается исходя из размеров купольного каркаса и его конструктивного решения [7; 8]. При выборе способа монтажа учитываются и размеры конструктивных элементов каркаса, и их способности воспринимать монтажные нагрузки. От способа монтажа зависят сроки строительства, характер технологических операций и выбор подъемно-транспортных машин и механизмов. Большинство металлических куполов построено с применением разных систем временных опор [8; 9], и при относительно невысоких или пологих куполах этот способ был предпочтителен. В высоких куполах применялся навесной монтаж, когда временные опоры вообще не используются.

Монтаж куполов навесным способом осуществляется от опорного контура, когда сначала устанавливают первый ярус купольного каркаса, затем ярус за ярусом остальные его конструктивные элементы. В этом случае должно быть обеспечено жесткое сопряжение элементов купольного каркаса друг с другом, хотя бы по отношению к разным ярусам. При навесном монтаже ребристо-кольцевого купола после завершения установки элементов меридиональных ребер расположенного ниже яруса по всему контуру выполняется установка элементов кольца расположенного выше яруса. Появление замкнутого кольца поверх каждого стержневого кругового яруса приводит к образованию пространственной стержневой системы, включающей все смонтированные ярусы купола и обладающей достаточной жесткостью для восприятия монтажных нагрузок [10]. Причем самое верхнее кольцо частично смонтированного купольного каркаса, так же как и все предыдущие, эффективно сопротивляется деформации замкнутой стержневой системы.

Расчетные схемы частично смонтированных купольных каркасов на всех стадиях монтажа, работающих на нагрузку от собственного веса, отличаются друг от друга и отличаются от проектной схемы. Поэтому и напряженное состояние элементов купольных каркасов в монтажных схемах и проектной схеме

тоже отличаются. Переход от одной стадии монтажа к другой приводит к преобразованию расчетных схем пространственной стержневой системы купольного каркаса. Для отдельных конструктивных элементов каркаса с не меняющимися узловыми креплениями такое преобразование не приведет к существенным изменениям напряженного состояния по отношению к проектной схеме. В ребристо-кольцевых куполах к ним относятся элементы колец. В меридиональных же ребрах при навесном монтаже узловое сопряжение верхнего конца каждого элемента изменяется от свободного (незакрепленного) до жестко закрепленного по отношению к следующему ярусу.

В монтажном состоянии работа элементов ребер похожа на работу консольных наклонных стержней. Консольная установка элементов меридиональных ребер купола приводит к появлению в них значительных изгибающих моментов. В процессе возведения купольного каркаса изгибающие моменты в меридиональных ребрах изменяются. Наибольшие по величине монтажные моменты в меридиональных ребрах наблюдаются в элементах меридиональных ребер монтируемого яруса и в элементах ранее смонтированного яруса [10]. При этом они концентрируются возле узла крепления консольного стержня меридионального ребра к крайнему кольцу и оказывают основное влияние на возникновение монтажных напряжений в элементах купольного каркаса. Максимальные монтажные изгибающие моменты в меридиональных ребрах по мере наращивания каркаса «перемещаются» к вершине купола [11]. Следует отметить, что установка колец купола с образованием замкнутого контура на концах консольных элементов ребер фактически закрепляет деформированное состояние их как консолей и тем самым сохраняет монтажные напряжения.

2. Методы

Считается, что применение навесного монтажа именно в крутых куполах не приводит к значительным деформациям каркаса и характеризуется появлением минимальных начальных напряжений в его элементах. С целью выяснения зависимости напряженного состояния каркаса от высоты ребристо-кольцевого купола выполнялись компьютерные исследования для разных куполов. При этом для каждого металлического купола создавались компьютерные модели, соответствующие разным стадиям навесного монтажа. Компьютерные модели купольных каркасов исследовались в программе SCAD как пространственные стержневые системы [12; 13]. Критериями исследований служили деформации узлов купольного каркаса и напряжения в элементах меридиональных ребер, которые определялись по внутренним усилиям N и M .

В качестве основных объектов исследования приняты каркасы ребристо-кольцевых куполов сферической формы, состоящие из 30 секторов и насчитывающие 7 ярусов. Все купола имеют одинаковый диаметр опорного контура или пролет 40 м, но разную высоту: 19,83; 16,87; 14,02; 11,54; 9,35; 7,31 м (рис. 1). Все узлы сопряжения элементов каркасов жесткие. На основе приближенного расчета все элементы купольного каркаса приняты в виде прокатных двутавров из стали С245: меридиональные ребра – \mathbf{I} 26Ш1, верхнее кольцо – \mathbf{I} 30Ш1, остальные кольца – \mathbf{I} 23Ш1.

Предыдущие исследования напряженного состояния купольного каркаса в процессе монтажа [10; 11] показали, что установка колец не вызывает существенных изменений внутренних усилий в элементах каркаса, в том числе и в меридиональных ребрах. Поэтому монтажные стержневые системы купольных каркасов были представлены компьютерными моделями с консольными элементами меридиональных ребер по всему контуру. Эти модели были созданы для всех шести видов купольных каркасов и для семи стадий монтажа по числу ярусов каждого купола. С учетом проектных схем расчет на нагрузки от собственного веса купольных каркасов с целью оценки их напряженно-деформированных состояний был выполнен для 48 компьютерных моделей.

При навесном монтаже всех представленных видов куполов неизбежна установка элементов меридиональных ребер каждого монтируемого яруса как консолей под наклоном по отношению к вертикальной оси купола. Чем меньше высота купола, тем больше наклон меридиональных ребер (рис. 2). Однако следует обратить внимание на следующие особенности: во-первых, наклон элементов ребер в нижних ярусах в куполах разной высоты различен, а в верхних – становится одинаковым; во-вторых, длина отдельных элементов меридиональных ребер с уменьшением высоты куполов становится меньше.

Изменение отношения высоты к диаметру (пролету) h/d рассматриваемых куполов выглядит плавным, очень близким к пропорциональной зависимости (рис. 3). Исследование деформации каркаса в процессе монтажа показало иной характер ее изменения. Если проследить, как изменяется деформация купольного каркаса по вертикали f от яруса к ярусу в процессе монтажа, то получим зависимости, изображенные на рис. 4. Здесь учтены только вертикальные монтажные деформации от прогибов консольных

элементов меридиональных ребер с учетом накопления прогибов при навесном монтаже всех предыдущих ярусов. Из графиков видно, что до четвертого яруса монтажные деформации у купольных каркасов меньшей высоты накапливаются быстрее, а с пятого яруса суммарные деформации у высоких куполов становятся больше других. Вместе с тем видно, что у пологих куполов, в отличие от крутых, деформации возрастают по плавной кривой с уменьшением отношения h/d .

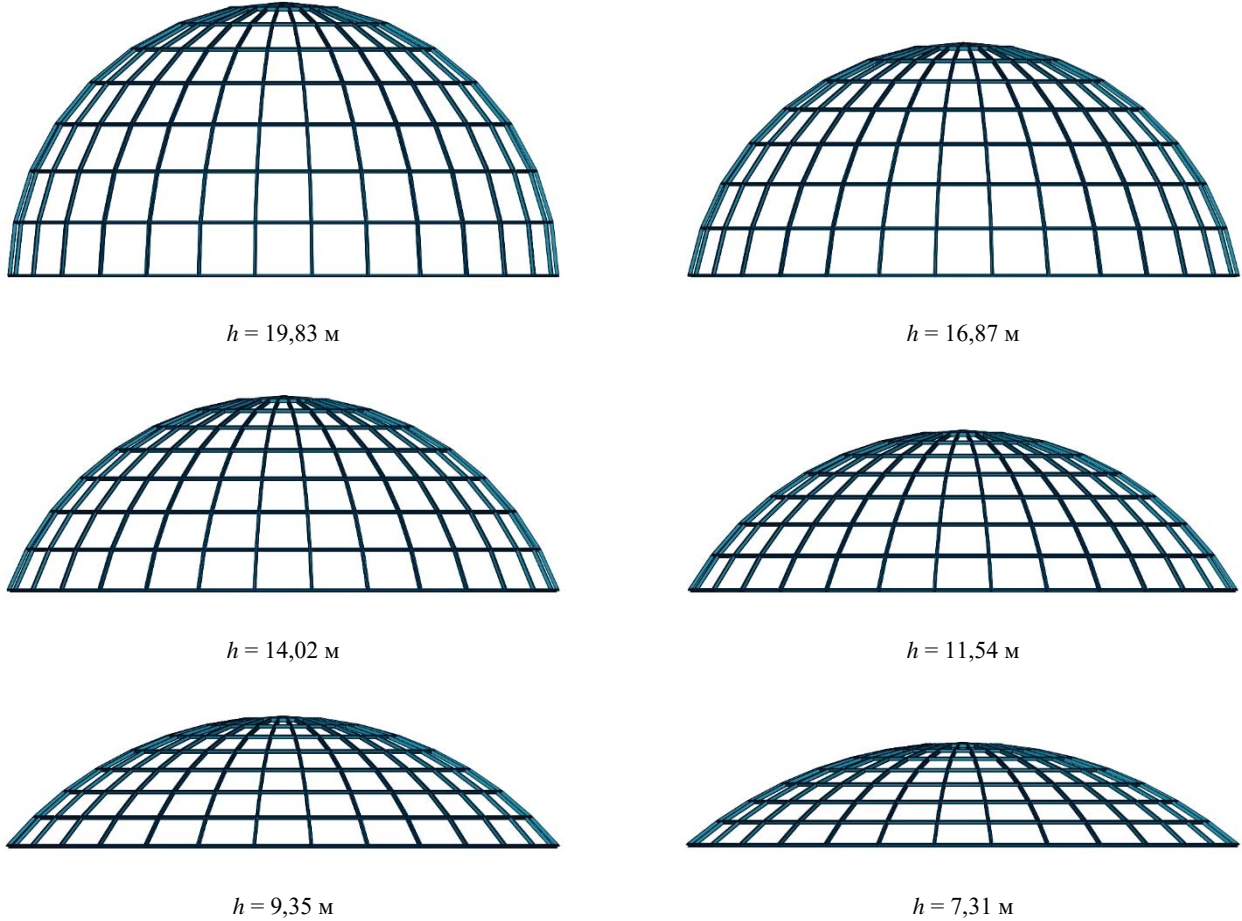


Рис. 1. Каркасы ребристо-кольцевых куполов $d = 40$ м
 [Figure 1. The frames of the ribbed-ring domes $d = 40$ m]

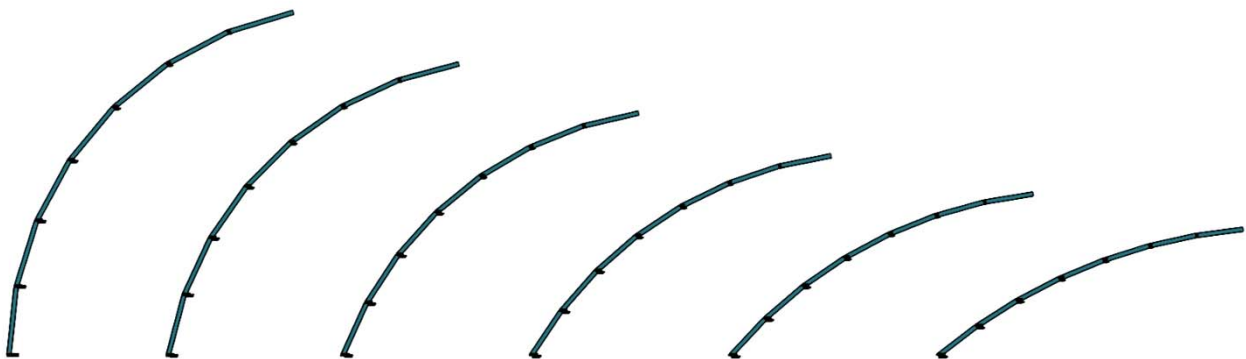


Рис. 2. Положение меридиональных ребер куполов разной высоты
 [Figure 2. Position of meridional ribs of domes of different heights]

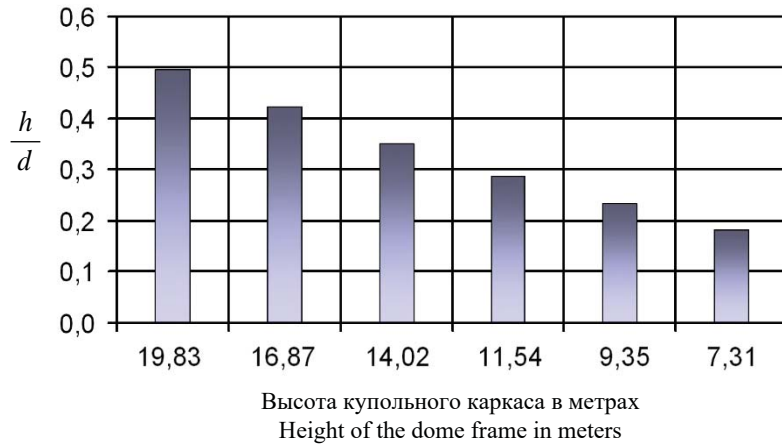


Рис. 3. Отношения h/d куполов $d = 40$ м разной высоты
 [Figure 3. Ratios h/d of domes of $d = 40$ m for different heights]

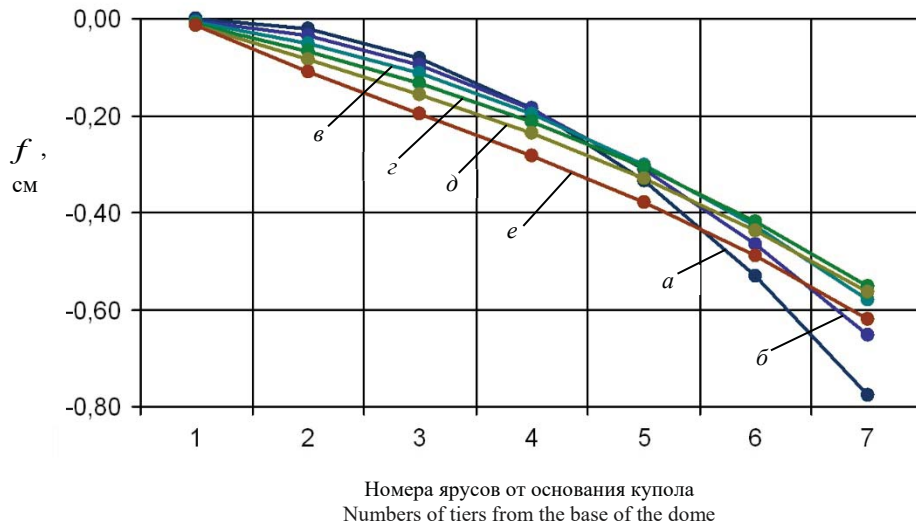


Рис. 4. Вертикальные деформации f каркасов куполов $d = 40$ м при навесном монтаже:
 $a - h = 19,83$ м; $b - h = 16,87$ м; $в - h = 14,02$ м; $г - h = 11,54$ м; $д - h = 9,35$ м; $e - h = 7,31$ м
 [Figure 4. Vertical deformations f of dome frames $d = 40$ m at mounted installation:
 $a - h = 19,83$ m; $b - h = 16,87$ m; $в - h = 14,02$ m; $г - h = 11,54$ m; $д - h = 9,35$ m; $e - h = 7,31$ m]

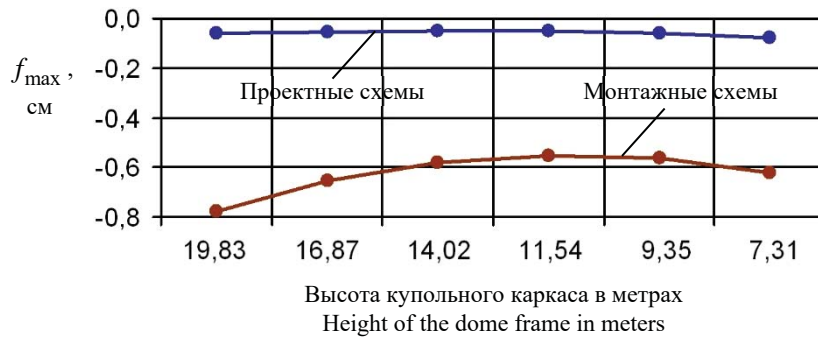


Рис. 5. Максимальные деформации f купольных каркасов разной высоты
 [Figure 5. Maximum deformations f of dome frames of different heights]

Максимальные деформации каркасов монтажных схем превосходят деформации проектных схем с увеличением высоты куполов в 8,1–13,0 раз (рис. 5).

Исследование напряженного состояния стержневых систем купольного типа на компьютерных расчетных моделях выполнялось многими учеными. Например, анализировалось напряженное состояние купольных каркасов при изменении его геометрических параметров [14; 15], при выключении из работы нескольких элементов [16], при отличающихся геометрических схемах каркасов [17], при разных отношениях высоты к диаметру купола [18], при изменении пролетов купольных каркасов [19], при включении в работу каркасов ограждающих элементов [20].

Каркасы исследуемых куполов, независимо от того, частично или полностью они смонтированы, работают на действие собственного веса их элементов. При этом меридиональные ребра испытывают одновременное действие усилий сжатия и изгиба. Напряженные состояния меридиональных ребер всех куполов и на всех стадиях монтажа определялись по нормальным напряжениям в сечениях их элементов, которые вычисляются по формуле

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

Учитывая, что наибольшие по абсолютной величине напряжения будут сжимающими, это выражение можно интерпретировать как сумму численных значений напряжений, вызываемых сжатием, и напряжений, вызываемых изгибом, то есть

$$|\sigma_i| = |\sigma_{iN}| + |\sigma_{iM}|. \quad (2)$$

Из-за того, что на каркасы куполов действует только вертикальная нагрузка, а все компьютерные модели имеют симметричное геометрическое строение, $M_{y,i} = 0$. Следовательно, на величину изгибной составляющей нормальных напряжений оказывает влияние только работа в вертикальной плоскости.

3. Результаты

В процессе исследований получены сведения об уровне напряжений в меридиональных ребрах каркасов куполов разной высоты и на всех стадиях навесного монтажа под воздействием собственного веса. На рис. 6 показаны поярусные диаграммы степени использования прочности элементов меридиональных ребер по отношению вычисленных сжимающих напряжений к расчетному сопротивлению стали $|\sigma_i|/R_y$ для куполов пролетом 40 м и высотой 19,83; 16,87; 14,02; 11,54; 9,35 и 7,31 м.

Графические столбики в каждом ярусе соответствуют напряженным состояниям элементов меридиональных ребер для каждой монтажной схемы или стадии монтажа по порядку (всего 7) плюс столбик проектной схемы. Отсутствие столбика свидетельствует о том, что на данной стадии монтажа элемента меридионального ребра этого яруса еще нет в смонтированной части каркаса купола. Поскольку монтаж начинается с 1-го яруса, то при монтаже 7-го яруса в уровне 1-го яруса будет 7 графических монтажных столбиков и проектный, а в уровне 7-го яруса только 1 монтажный столбик и проектный. Диаграммы рис. 6 показывают, что в процессе навесного монтажа напряжения в поярусных элементах меридиональных ребер с 3-го яруса начинают превосходить проектные значения. Максимальные напряжения $|\sigma_i|$ в монтажных схемах появляются в 6-м ярусе и их уровень от прочности R_y в куполах высотой 19,83; 16,87; 14,02; 11,54; 9,35 и 7,31 м достигает значений 3,11; 2,68; 2,35; 2,13; 2,01 и 1,97 % соответственно. Максимальные напряжения проектных схем появляются в 1-м ярусе и их уровень от прочности в куполах той же последовательности достигает значений 2,08; 1,95; 1,86; 1,81; 1,83 и 2,21 % соответственно.

Диаграммы рис. 6 в целом демонстрируют снижение монтажных напряжений в элементах меридиональных ребер в ярусах с 3-го по 7-й, некоторую стабильность их во 2-м ярусе, а также повышение монтажных напряжений в 1-м ярусе при высоте куполов 9,35 и 7,31 м. Однако из-за непрерывных преобразований расчетных схем от первой монтажной стадии ко второй, а от нее к третьей и так далее до седьмой стадии диаграммы рис. 6 не позволяют оценить те напряжения, которые будут сочетаться с напряжениями полностью смонтированного купольного каркаса, то есть проектной схемы.

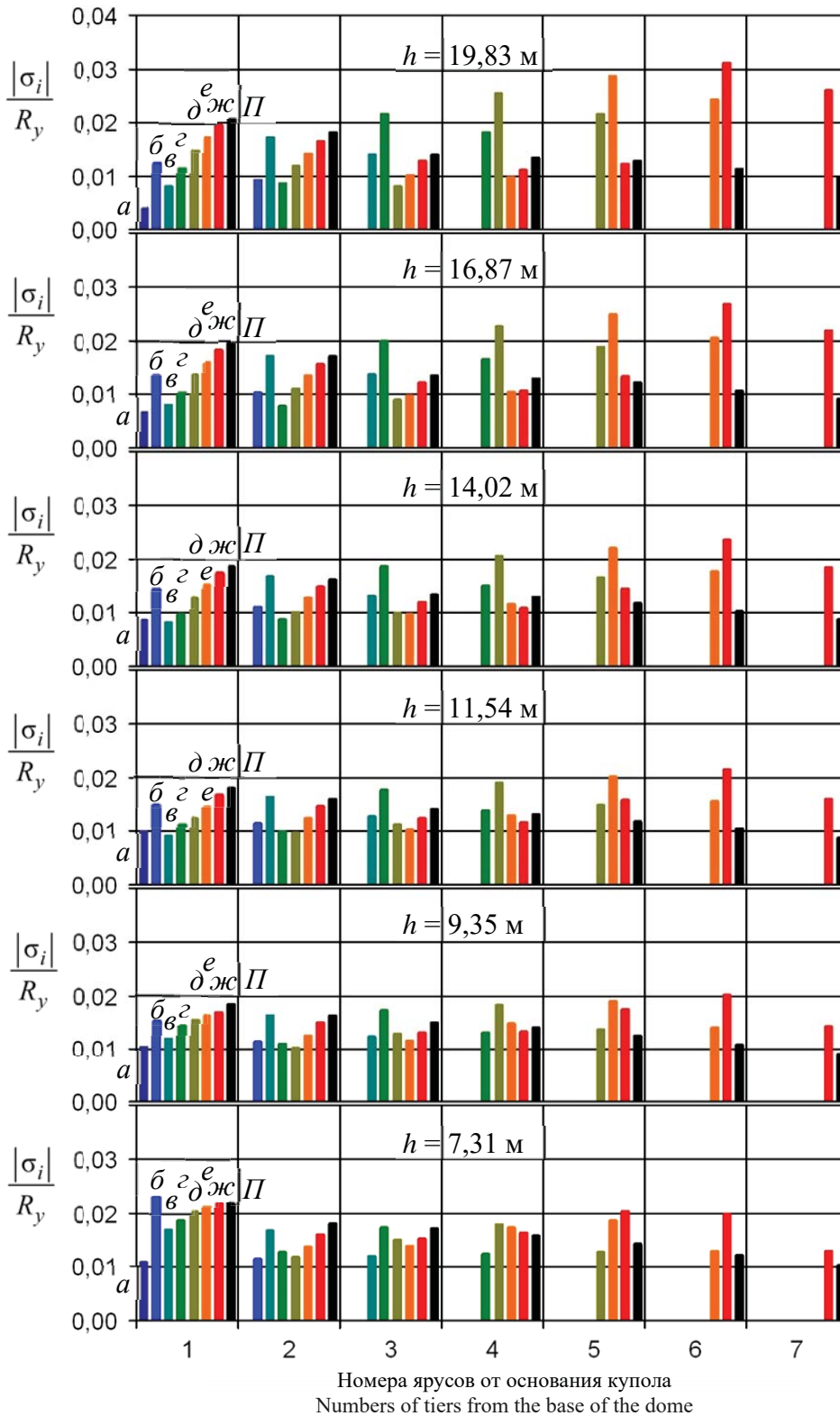


Рис. 6. $|\sigma_i|/R_y$ в элементах ребер при монтаже куполов разной высоты h на разных стадиях:
 П – проектная схема; а – монтаж 1-го яруса; б – монтаж 2-го яруса; в – монтаж 3-го яруса; г – монтаж 4-го яруса;
 д – монтаж 5-го яруса; е – монтаж 6-го яруса; ж – монтаж 7-го яруса
[Figure 6. $|\sigma_i|/R_y$ in the elements of rings at different stages of the assembly of the dome at different h :
 П – design scheme; а – installation of the 1st tier; б – installation of the 2nd tier; в – installation of the 3rd tier; г – installation of the 4th tier;
 д – installation of the 5th tier; е – installation of the 6th tier; ж – installation of the 7th tier]

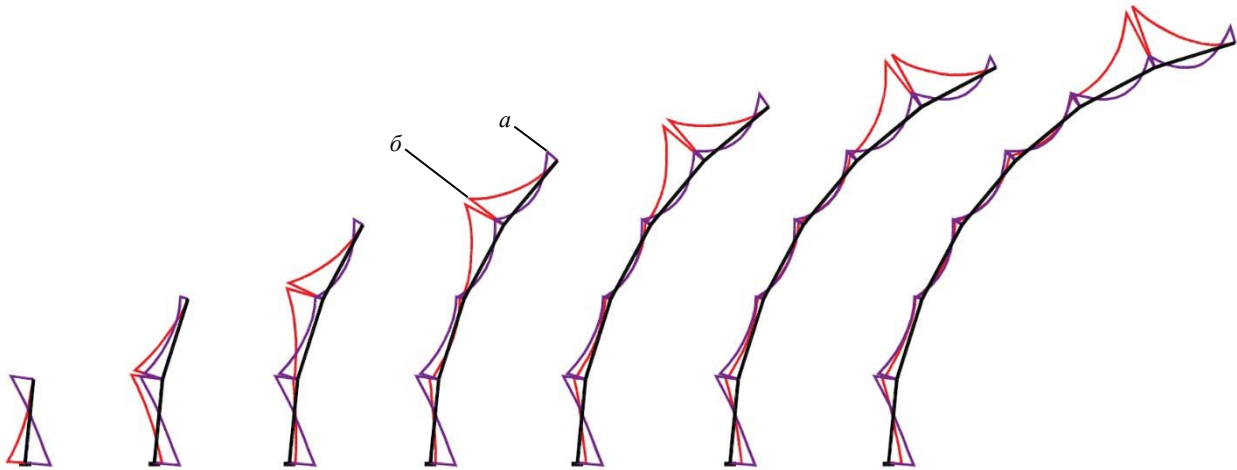


Рис. 7. Эпюры моментов M в меридиональном ребре купола $h = 19,83$ м проектной (а) и монтажных (б) схем на разных стадиях
 [Figure 7. Moment diagrams M in the meridional rib of the dome $h = 19,83$ m for the design (a) and for the assembly (б) schemes at different stages]

Продольные сжимающие силы N в элементах меридиональных ребер во всех монтажных схемах от 1-й стадии до 7-й возрастают постепенно путем добавления долевых частей, зависящих от веса уже смонтированных ярусов купольных каркасов. На завершающей стадии монтажа величины N в элементах меридиональных ребер становятся близкими к N в проектной схеме каркаса. Изгибающие моменты M в консольно устанавливаемых элементах меридиональных ребер во всех монтажных схемах от 1-й стадии до 7-й отличаются от проектной схемы и по характеру, и по величине [11]. Это относится также и к элементам меридиональных ребер, предшествующих консольным в монтажных схемах. Причем, начиная с 3-го яруса, величина M в меридиональных ребрах двух крайних ярусов монтажных схем в несколько раз превышает M в этих же ярусах проектной схемы (рис. 7).

При монтаже кольцевых элементов каждого яруса купольного каркаса их надежно соединяют с меридиональными ребрами. Поэтому смонтированные на концах консольных элементов ребер замкнутые кольца препятствуют свободным возвратным деформациям реберных консолей и, следовательно, сохраняют возникшие монтажные напряжения. Иначе говоря, связанные с монтажным изгибающим моментом M_M напряжения σ_{MiM} накладываются на напряжения σ_{PiM} от проектных моментов M_P .

Наибольшие изгибающие моменты в элементах меридиональных ребер проектной схемы купольного каркаса M_P возникают в узлах сопряжения разных ярусов. Поэтому по отношению M_M/M_P можно вычислить ту часть напряжений при навесном монтаже, которая сохранится в поярусных элементах меридиональных ребер до полного завершения сборки купольного каркаса. По известной доле напряжений проектной схемы $|\sigma_{PiM}|$, вызываемых изгибом, вычисляем долю напряжений монтажных схем $|\sigma_{MiM}|$, вызываемых изгибом при навесном монтаже, по формуле

$$|\sigma_{MiM}| = \frac{M_{Mi}}{M_{Pi}} |\sigma_{PiM}|. \quad (3)$$

На рис. 8 показаны графики поярусного изменения сжимающих напряжений в меридиональных ребрах для куполов пролетом 40 м и высотой 19,83; 16,87; 14,02; 11,54; 9,35 и 7,31 м: во время монтажа в элементах перед консолью только от изгиба $|\sigma_{MiM}|$, в консольных элементах только от изгиба $|\sigma_{PiM}|$, в элементах проектной схемы каркаса только от сжатия $|\sigma_{PiN}|$, в элементах ребер проектной схемы только от изгиба $|\sigma_{PiM}|$. Из этих графиков видно, что в проектных схемах всех куполов напряжения от сжатия $|\sigma_{PiN}|$ существенно превосходят напряжения от изгиба $|\sigma_{PiM}|$, зачастую в несколько раз. Доля напряжений от изгиба $|\sigma_{PiM}|$ в суммарных напряжениях проектных схем $|\sigma_{Pi}| = |\sigma_{PiN}| + |\sigma_{PiM}|$ на разных ярусах, начиная с 3-го, куполов высотой 19,83; 16,87; 14,02; 11,54; 9,35 и 7,31 м находится в интервалах 19,3–43,7; 18,3–38,2; 17,9–32,4; 16,7–27,0; 15,4–22,0; 13,2–16,5 % соответственно. При навесном монтаже изгибающий момент резко возрастает и отношение M_M/M_P для консольных элементов на разных ярусах с 3-го по 7-й куполов высотой 19,83; 16,87; 14,02; 11,54; 9,35 и 7,31 м изменяется в интервалах 4,7–6,0; 5,1–6,2;

5,2–6,4; 5,2–6,7; 5,1–7,0; 5,1–7,6 соответственно. А в элементах перед консольными отношение M_M/M_{II} на ярусах, начиная с 3-го по 6-й, куполов высотой в том же порядке изменяется в интервалах 6,6–6,3; 6,5–6,1; 6,2–6,0; 5,9–6,1; 5,5–6,3; 5,4–6,8 соответственно.

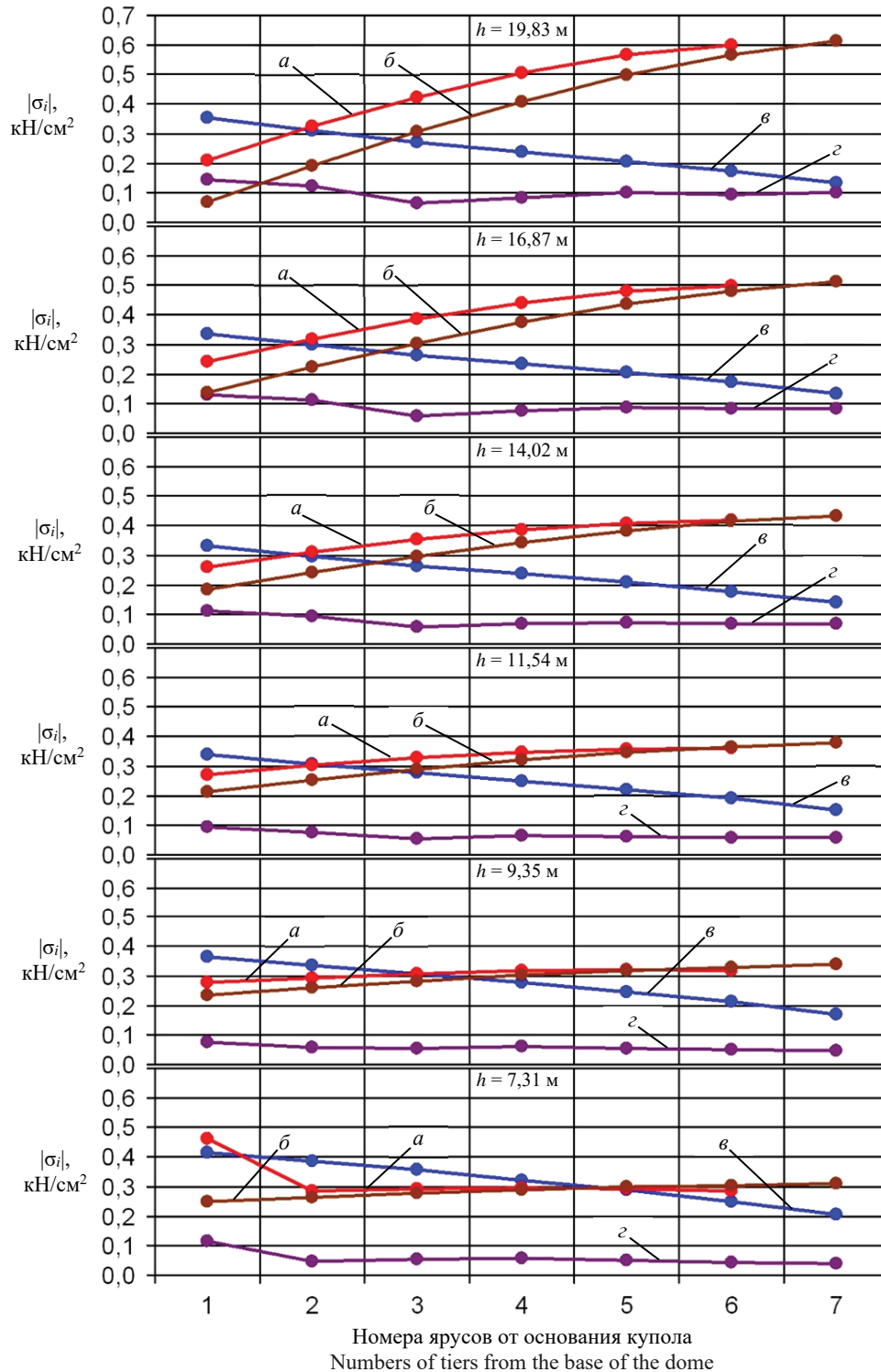


Рис. 8. Изменение сжимающих напряжений $|\sigma_i|$ в элементах меридиональных ребер по ярусам в куполах разной высоты h :
 $a - |\sigma_{\text{min}}|$ в элементе перед консолью во время монтажа только от изгиба; $\bar{b} - |\sigma_{\text{min}}|$ в консольном элементе во время монтажа только от изгиба;
 $\bar{в} - |\sigma_{\text{min}}|$ в элементе проектной схемы только от сжатия; $\bar{г} - |\sigma_{\text{min}}|$ в элементе проектной схемы только от изгиба

[Figure 8. Changes in compressive stresses $|\sigma_i|$ in elements of meridional ribs along tiers in domes of different heights h :
 $a - |\sigma_{\text{min}}|$ in the element in front of the cantilever during installation only from bending; $\bar{b} - |\sigma_{\text{min}}|$ in the cantilever element during installation only from bending;
 $\bar{в} - |\sigma_{\text{min}}|$ in the element of the design scheme from the compression alone; $\bar{г} - |\sigma_{\text{min}}|$ in the element of the design scheme from the bending]

Изгибающие моменты при навесном монтаже вызывают напряжения $|\sigma_{MiM}|$, превышающие напряжения проектной схемы $|\sigma_{pi}|$, и величина отношения $|\sigma_{MiM}|/|\sigma_{pi}|$ находится на разных ярусах с 3-го по 7-й куполов высотой 19,83; 16,87; 14,02; 11,54; 9,35 и 7,31 м в интервалах 1,3–2,6; 1,2–2,4; 1,1–2,1; 1,0–1,8; 0,9–1,5; 0,7–1,3.

Из графиков рис. 8 видно, что напряжения в элементах меридиональных ребер проектной схемы каркаса только от сжатия $|\sigma_{piN}|$ с уменьшением высоты куполов от 19,83 до 7,31 м в целом постепенно увеличиваются, а напряжения только от изгиба $|\sigma_{piM}|$ немного уменьшаются. В то же время напряжения во время монтажа в элементах перед консолью только от изгиба $|\sigma_{MiM}|$ и напряжения в консольных элементах только от изгиба $|\sigma_{MiM}|$ с уменьшением высоты куполов от 19,83 до 7,31 м постепенно уменьшаются. Эти тенденции подтверждают графики осредненных по ярусам сжимающих напряжений $|\sigma_{cp}|$ в элементах меридиональных ребер в куполах разной высоты h (рис. 9).

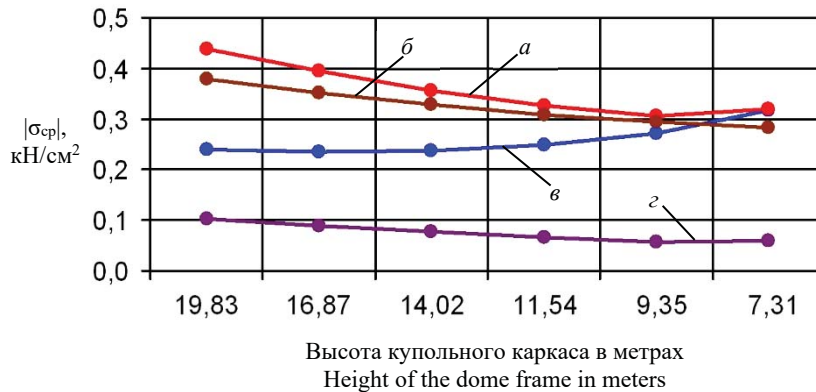


Рис. 9. Осредненные по ярусам сжимающие напряжения $|\sigma_{cp}|$ в элементах меридиональных ребер в куполах разной высоты h : $a - |\sigma_{McpM}|$ в элементе перед консолью во время монтажа только от изгиба; $b - |\sigma_{McpM}|$ в консольном элементе во время монтажа только от изгиба; $c - |\sigma_{NcpN}|$ в элементе проектной схемы только от сжатия; $z - |\sigma_{NcpM}|$ в элементе проектной схемы только от изгиба
[Figure 9. Compressive stresses $|\sigma_{cp}|$ averaged over tiers in elements of meridional ribs in domes of different heights h : $a - |\sigma_{McpM}|$ in the element in front of the cantilever during installation from bending alone; $b - |\sigma_{McpM}|$ in the cantilever element at installation from bending alone; $c - |\sigma_{NcpN}|$ in the element of the design scheme from compression alone; $z - |\sigma_{NcpM}|$ in the element of the design scheme from bending alone]

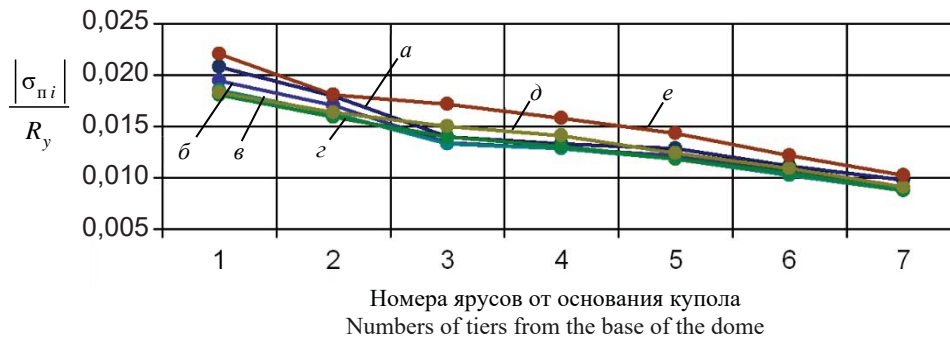


Рис. 10. Поярусные величины отношения $|\sigma_{pi}|/R_y$ проектной схемы в элементах ребер куполов разной высоты h : $a - h = 19,83$ м; $b - h = 16,87$ м; $c - h = 14,02$ м; $z - h = 11,54$ м; $d - h = 9,35$ м; $e - h = 7,31$ м
[Figure 10. Tiered values of the ratio $|\sigma_{pi}|/R_y$ of the design scheme in the elements of ribs of domes of different heights h : $a - h = 19,83$ м; $b - h = 16,87$ м; $c - h = 14,02$ м; $z - h = 11,54$ м; $d - h = 9,35$ м; $e - h = 7,31$ м]

Уровни напряжений в меридиональных ребрах проектной схемы $|\sigma_{pi}|$ по отношению к прочности R_y во всех куполах от 1-го яруса к 7-му уменьшаются (рис. 10). При этом максимальные отношения $|\sigma_{pi}|/R_y$ появляются в 1-м ярусе и в куполах высотой 19,83; 16,87; 14,02; 11,54; 9,35 и 7,31 м достигают значений 2,08; 1,95; 1,86; 1,81; 1,83 и 2,21 % соответственно. А минимальные отношения $|\sigma_{pi}|/R_y$ появляются в 7-м ярусе и в куполах той же последовательности достигают значений 0,98; 0,91; 0,87; 0,87; 0,91 и 1,03 % соответственно.

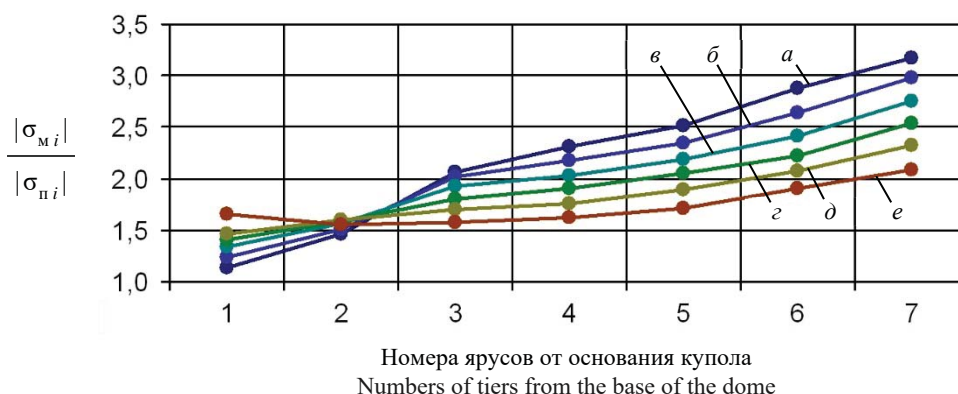


Рис. 11. Поярусные величины отношений начальных напряжений $|\sigma_{Mi}|$ к напряжениям проектной схемы $|\sigma_{Pi}|$ для куполов разной высоты h :

$a - h = 19,83$ м; $b - h = 16,87$ м; $v - h = 14,02$ м; $z - h = 11,54$ м; $d - h = 9,35$ м; $e - h = 7,31$ м

[Figure 11. Tiered values of ratios of initial stress $|\sigma_{Mi}|$ to stress in the design scheme $|\sigma_{Pi}|$ for domes of different heights h :

$a - h = 19,83$ m; $b - h = 16,87$ m; $v - h = 14,02$ m; $z - h = 11,54$ m; $d - h = 9,35$ m; $e - h = 7,31$ m]

Если долю напряжений от изгиба $|\sigma_{PiM}|$ в элементах проектной схемы каркаса заменить на монтажные напряжения $|\sigma_{MiM}|$, то получим начальные монтажные напряжения $|\sigma_{Mi}| = |\sigma_{Pi}| + |\sigma_{MiM}|$, которые будут испытывать меридиональные ребра по завершении навесного монтажа. Отношения начальных монтажных напряжений $|\sigma_{Mi}|$ к напряжениям проектной схемы $|\sigma_{Pi}|$ во всех куполах существенно возрастают от 1-го яруса к 7-му (рис. 11). Причем с увеличением высоты купола величина отношения $|\sigma_{Mi}|/|\sigma_{Pi}|$ от яруса к ярусу возрастает.

4. Выводы

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы.

В процессе навесного монтажа каркасов большепролетных ребристо-кольцевых металлических куполов разной высоты в сечениях меридиональных ребер неизбежно появление монтажных напряжений, существенно превышающих проектные напряжения от собственного веса каркаса.

Причиной монтажных напряжений служит то обстоятельство, что на каждом вновь монтируемом ярусе купольного каркаса элементы меридиональных ребер устанавливаются консольно, что приводит к появлению относительно больших изгибающих моментов.

Изгибное состояние всех элементов меридиональных ребер каждого яруса после установки колец характеризуется иным очертанием эпюр моментов по сравнению с изгибным состоянием этих же элементов при консольной монтажной установке, что свидетельствует о чередующемся изменении расчетных схем каркаса в процессе возведения.

Монтажные напряжения от консольного изгиба монтируемых элементов меридиональных ребер сохраняются в купольном каркасе из-за колец, образованных установкой на свободных концах реберных консолей элементов колец, которые фиксируют их деформированное состояние в пространстве.

Выбирая навесной монтаж для большепролетных ребристо-кольцевых куполов сферического очертания, необходимо при проектировании производить расчет их каркасов с учетом влияния монтажных напряжений на эксплуатационную надежность сооружения.

В первом приближении можно учитывать монтажные напряжения в меридиональных ребрах умножением поярусных напряжений от собственного веса купольного каркаса на повышающие коэффициенты. Для высоких куполов такие коэффициенты изменяются от 1,2 в ярусе у опорного кольца до 3,2 в ярусе у верхнего кольца. Для низких куполов эти коэффициенты изменяются от 1,5 в нижнем ярусе до 2,3 – в верхнем.

Не следует применять навесной монтаж в куполах с отношением высоты к диаметру h/d менее 0,24 из-за значительного возрастания изгибающего момента в первом ярусе меридионального ребра.

При навесном монтаже деформации каркасов возрастают во много 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.: 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. URL: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/10910> (дата обращения: 21.09.2020).
3. Гохарь-Хармандарян И.Г. Большепролетные купольные здания. М.: Стройиздат, 1978. 150 с.
4. Торкатюк В.И. Монтаж конструкций большепролетных зданий. М.: Стройиздат, 1985. 170 с.
5. Гофштейн Г.Е., Ким В.Г., Ниццев В.Н., Соколова А.Д. Монтаж металлических и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 2004. 528 с.
6. Металлические конструкции: справочник проектировщика: в 3 т. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений / под общ. ред. В.В. Кузнецова; ЦНИИпроектстальконструкция имени Н.П. Мельникова. М.: АСВ, 1998. 512 с.
7. Лебедь Е.В., Алукаев А.Ю. Большепролетные металлические купольные покрытия и их возведение // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 1. С. 4–16. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-1-4-16>
8. Лебедь Е.В. Особенности работы каркасов большепролетных металлических куполов в процессе их возведения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 6. С. 481–494. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-6-481-494>
9. Youichi M., Terumasa F., Yoshihiko K., Takashi U. Erection Methods for Space Structures // Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia. Spain, 2009. Pp. 1951–1962.
10. 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>
11. 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>
12. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маларенко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD: М.: АСВ, 2004. 592 с.
13. Городоцкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. К.: Факт, 2005. 344 с.
14. Chandiwala A. Analysis and design of steel dome using software // International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET). 2014. Vol. 3. Issue 3. Pp. 35–39.
15. Jadhav H.S., Patil Ajit S. Parametric Study of Double Layer Steel Dome with Reference to Span to Height Ratio // International Journal of Science and Research (IJSR). 2013. Vol. 2. Issue 8. Pp. 110–118.
16. Handruleva A., Matuski V., Kazakov K. Combined Mechanisms of Collapse of Discrete Single-Layer Spherical Domes // Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA). 2012, December. Vol. 1. Issue 1. Pp. 19–27.
17. Amjatha Makkar, Sumayya Abbas, Muhammed Haslin S.M. Finite Element Analysis of Diamatic, Schwedler and Diamatic-Schwedler Hybrid Domes // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2016. Vol. 39. No. 1. Pp. 57–62.
18. Chacko P., Dipu V.S., Manju P.M. Finite Element Analysis of Ribbed Dome // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 2014. Pp. 25–32.
19. Merilmol Eldhose, Rajesh A.K., Ramadass S. Finite Element Analysis and Parametric Study of Schwedler Dome Using ABAQUS Software // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2015. Vol. 28. No. 7. Pp. 333–338.
20. Nabeel Abdulrazzaq Jasim, Ihab Sabri Saleh, Saddam Khalaf Faleh. Structural Analysis of Ribbed Domes Using Finite Element Method // International Journal of Civil Engineering Research. 2017. Vol. 8. No. 2. Pp. 113–130.

References

1. Tur V.I. *Kupol'nye konstruktsyi: formoobrazovanie, raschet, konstruirovaniye, povysheniye Effektivnosti [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 XIXth until the first half of the XXth centuries. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2014;(6):4–15. (In Russ.) Available from: <http://journals.rudn.ru/structural-mechanics/article/view/10910> (accessed: 21.09.2020).
3. Gokhar-Harmadaryan I.G. *Bol'sheproletnye kupol'nye zdaniya [Wide-Span Dome Buildings]*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1978. (In Russ.)
4. Torkatyuk V.I. *Montazh konstruktsiy bol'sheproletnykh zdaniy [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. *Montazh metallicheskih i zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Installation of Metal and Reinforced Concrete Structures]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 2004. (In Russ.)
6. Kuznetsov V.V. (ed.) *Metallicheskie konstruktsii* [Metal Structures]. Vol. 2. Stal'nye konstruktsii zdaniy i sooruzheniy [Steel structures of buildings and constructions]. Moscow: ASV Publ.; 1998. (In Russ.)
7. Lebed E.V., Alukaev A.U. Large-span metal dome roofs and their construction. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018;14(1):4–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-1-4-16>
8. Lebed E.V. Behavior of the Frames of Large-span Metal Domes in the Process of their Installation. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018;14(6):481–494. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-6-481-494>
9. Youichi M., Terumasa F., Yoshihiko K., Takashi U. Erection Methods for Space Structures. *Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia*. Spain; 2009. p. 1951–1962.
10. 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>
11. 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*. 2019;15(4):278–290. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-111-121>
12. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Perelmutter A.V., Perel'muter M.A. *SCAD Office. Vychislitel'nyy kompleks SCAD* [Computer system SCAD]. Moscow: ASV Publ.; 2004. (In Russ.)
13. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. *Komp'uternye modeli konstruktsiy* [Computer models of structures]. Kiev: Fakt Publ.; 2005. (In Russ.)
14. Chandiwala Anuj. Analysis and design of steel dome using software. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*. 2014;3(3):35–39.
15. Jadhav H.S., Patil Ajit S. Parametric Study of Double Layer Steel Dome with Reference to Span to Height Ratio. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2013;2(8):110–118.
16. Handruleva A., Matuski V., Kazakov K. Combined Mechanisms of Collapse of Discrete Single-Layer Spherical Domes. *Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA)*. 2012(December);1(1):19–27.
17. Amjatha Makkar, Sumayya Abbas, Muhammed Haslin S.M. Finite Element Analysis of Diamatic, Schwedler and Diamatic-Schwedler Hybrid Domes. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. 2016;39(1):57–62.
18. 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.
19. 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.
20. Nabeel Abdulrazzaq Jasim, Ihab Sabri Saleh, Saddam Khalaf Faleh. Structural Analysis of Ribbed Domes Using Finite Element Method. *International Journal of Civil Engineering Research*. 2017;8(2):113–130.