

## Расчет и проектирование строительных конструкций

УДК 624.074.2:624.014:693.8

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-261-272

### Компьютерное исследование работы каркасов большепролетных металлических куполов при различных способах монтажа

Е.В. Лебедь

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Ярославское шоссе, 26, Москва, Российская Федерация, 129337*(поступила в редакцию: 18 июня 2018 г.; принята к публикации: 02 августа 2018 г.)*

В статье дается краткая характеристика процесса формирования каркасов большепролетных металлических куполов в процессе возведения. Выполнено общее описание конструктивных решений каркасов ребристо-кольцевых и сетчатых большепролетных металлических куполов. Указано на разные расчетные способы сопряжения элементов каркасов между собой в куполах различного конструктивного решения. Вследствие работы конструкций при монтаже купольных каркасов по расчетным схемам, отличающимся от проектной, в их конструктивных элементах возникают монтажные усилия.

Для проведения исследований разработаны проектные компьютерные модели ребристо-кольцевого и секториально-сетчатого однополюсных металлических куполов пролетом 48 м и высотой 12 м из стальных двутавров с жесткими сопряжениями в узлах. Исследуемые купольные каркасы опираются по контуру на постоянные стойки через шарнирные сопряжения. На основе проектных моделей созданы дополнительные модели неполного каркаса для исследования различных способов монтажа куполов, которые отличались друг от друга количеством временных опор при шарнирном сопряжении с каркасом и шарнирными узловыми сопряжениями стержневых элементов над ними. Каждая из этих моделей интерпретировала промежуточное состояние монтируемого купольного каркаса с характерной для него расчетной схемой. В зависимости от количества временных опор для ребристо-кольцевого купола рассмотрено три монтажных схемы, а для секториально-сетчатого – четыре.

Монтажные расчетные схемы включали в себя следующие виды временных опор: центральная опора, центральная и 1 ряд промежуточных опор, центральная и 3 ряда промежуточных опор, опора под каждым узлом каркаса. Для каждой монтажной модели купольного каркаса выполнены компьютерные расчеты на действие собственного веса с целью определения их напряженно-деформированного состояния. В результате расчетов определены напряжения в конструктивных элементах каркасов, которые сравнивались с напряжениями соответствующих элементов на действие собственного веса в каркасе проектной схемы. По полученным данным построены графики и диаграммы, отражающие уровень монтажных напряжений в конструктивных элементах каркаса по сравнению с проектными величинами с учетом характера – сжатие или растяжение. При этом рассмотрены различные группы элементов по всей высоте купольных каркасов.

Сделан вывод о неизбежности появления напряжений в элементах каркасов большепролетных металлических куполов при их возведении, а также о существенной их величине для отдельных способов монтажа. Указаны способы возведения и виды конструктивных элементов, которые могут оказать влияние на надежность купольных каркасов. Отмечена необходимость обязательных расчетов каркасов на монтажные состояния при проектировании большепролетных металлических куполов.

**Ключевые слова:** большепролетные купола, металлические каркасы, геометрические схемы, конструктивные решения, способы возведения, монтаж конструкций, компьютерная модель, напряжения в элементах

#### Введение

Купола широко применяются в качестве покрытий зданий и сооружений не только из-за выразительности геометрической формы, но и благодаря надежности образуемых конструктивных систем. Вследствие повышенной пространственной жестко-

сти в сочетании с экономичностью расхода металла они занимают ведущее положение среди пространственных выпуклых покрытий [1; 2]. Это объясняет их большое распространение в мировой практике строительства большепролетных покрытий.

Каркасы большепролетных металлических куполов не появляются на строительной площад-

ке сразу и целиком. Приобретают они свою проектную форму, реализующуюся во внешнем облике [3; 4], постепенно в течение длительного времени. Сначала появляются лишь отдельные конструкции, затем эти конструкции объединяются во фрагменты купольных каркасов, фрагменты каркасов увеличиваются (или объединяются) с образованием цельного купольного каркаса [5]. Купольные каркасы собираются из большого количества металлических конструкций, по-разному ориентированных в пространстве. Конструктивная сложность купольных каркасов и способ их монтажа во многом зависят от геометрической схемы и размеров их пролетов.

Купольные каркасы даже одинаковых геометрических схем могут существенно отличаться друг от друга конструктивным исполнением. Самым важным конструктивным признаком является количество поясов. По этому признаку ребристые и ребристо-кольцевые купола могут быть одноясными и двухясными, а сетчатые купола – односетчатыми и двухсетчатыми. Элементы каркасов одноясных ребристых и ребристо-кольцевых куполов, односетчатых купольных каркасов работают в основном на сжатие с изгибом. Поэтому их сечения обычно назначают двутавровыми.

Важным конструктивным и расчетным фактором является способ сопряжения элементов купольных каркасов между собой. Стержневая пространственная система в одноясных ребристо-кольцевых и односетчатых куполах для сохранения геометрической неизменяемости в нормальном к условной оболочке направлении должна иметь жесткие узловые сопряжения.

Реальные конструкции в большепролетных металлических куполах обладают собственным весом, а их каркасы формируются постепенно. В этом процессе отдельные элементы, конструкции или части каркасов устанавливаются на временные опоры или посредством крепления к уже смонтированной части каркаса. И в том и в другом случае монтажная схема работы конструкций или частей купольных каркасов коренным образом отличается от проектной схемы. Поэтому в процессе возведения куполов в их конструктивных элементах возникают внутренние усилия, отличающиеся по характеру и величине от тех, что появляются при работе каркасов по проектным схемам. При этом величины и характер распределения усилий в элементах каркаса для разных способов возведения куполов и на разных его стадиях отличаются друг от друга. Наиболь-

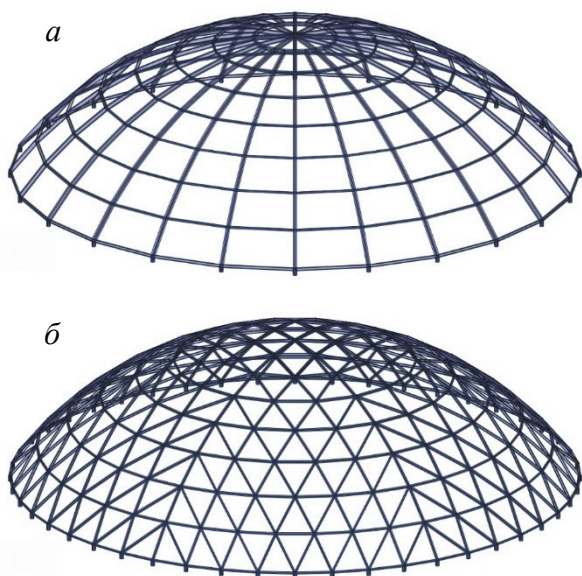
шее влияние на эти усилия оказывает способ возведения купольного каркаса.

Возведение каркасов большепролетных металлических куполов может выполняться различными способами [5–7]: с временной центральной опорой, несколькими временными опорами, со строительных лесов, подъемом собранного на земле, монтаж навесным способом и комбинированными способами. Временная центральная опора устанавливается под вершиной купола, обычно на ней устраивается верхнее кольцо ребристо-кольцевого купола или аналогичная ему часть сетчатого купола. Если применяются несколько временных опор, то дополнительно к центральной на равном расстоянии от нее (по окружности) устанавливаются еще ряд нескольких опор [8]. Таких рядов может быть несколько и оси этих рядов напоминают концентрические окружности разного диаметра. При любом способе возведения купольные каркасы собираются как из отдельных конструкций, так и из фрагментов каркасов разной степени укрупнения [9].

### Методология

С целью выяснения характера и величин внутренних усилий в стержнях в процессе возведения каркасов большепролетных металлических куполов были выполнены специальные исследования. Исследования проводились на компьютерных моделях пространственных стержневых систем в программе SCAD [10]. В качестве объектов исследования рассматривались каркасы ребристо-кольцевого и секториально-сетчатого куполов, изображенных на рис. 1. Для этого были разработаны компьютерные модели каркасов [11], параметры которых были приближены к реальным купольным сооружениям. Купола сферические с радиусом кривизны 30 м, пролетом 48,2 м и высотой 12,2 м. Каждый купольный каркас насчитывает по высоте 8 ярусов. Сопряжения стержневых элементов между собой во всех узлах каркасов приняты жесткими. В ребристо-кольцевом куполе ребра назначены из стального двутавра 35Ш1, кольца – из двутавра 23Ш1. В сетчатом куполе все элементы назначены из стального двутавра 20Ш1. В проектных схемах купольные каркасы установлены через шарнирные сопряжения на короткие стойки из стальных труб, которые располагаются под каждым узлом нижнего кольцевого контура. Максимальные вертикальные перемещения от собственного веса каркаса в

ребристо-кольцевом куполе равны 0,08 см, в секториально-сетчатом – 0,06 см.



**Рис. 1. Исследуемые купольные каркасы:**

*a* – ребристо-кольцевой купол;

*б* – секториально-сетчатый купол

**[Figure 1. Investigated dome frames:**

*a* – the ribbed-rings dome; *б* – the sectoral-lattice dome]

Анализ работы пространственных стержневых систем купольного типа на компьютерных расчетных моделях для различных задач распространен среди многих исследователей. Таким образом, например, исследуется работа каркасов на изменение геометрических параметров купола [12; 13], выхода из строя групп элементов [14], разные геометрические схемы каркаса [15], разные отношения высоты купола к диаметру [16], изменение пролетов куполов [17], устройство ограждения в ячейках каркаса [18]. Автором представленного здесь материала выполнялись исследования в полном соответствии с принципами аналогичных исследований работы пространственных стержневых систем, но поставленная задача была совершенно другой. Рассматривались конкретные стадии возведения при различных способах монтажа, для каждого из которых создавалась отдельная расчетная модель (монтажная схема) купольного каркаса.

Для ребристо-кольцевого купола рассмотрены три схемы монтажа с временными опорами (рис. 2): центральной и 3 рядами промежуточных опор, центральной и 1 рядом промежуточных опор, с центральной опорой. Во всех схемах центральная опора поддерживает верхнее кольцо, к которому кре-

пятся меридиональные ребра. Для секториально-сетчатого купола рассмотрены четыре схемы монтажа с временными опорами (рис. 3): со сплошными лесами, центральной и 3 рядами промежуточных опор, центральной и 1 рядом промежуточных опор, с центральной опорой.

Все временные стойки в монтажных расчетных моделях условно приняты из стальных толстостенных труб, сопряжения которых с узлами купольных каркасов приняты шарнирными.

Во всех монтажных схемах расчетных моделей ребристо-кольцевого купола (см. рис. 2) и секториально-сетчатого купола (см. рис. 3) условно считалось, что отдельные части каркасов над опорами еще не соединены между собой жестко, но тем не менее установлены на временные опоры без смещения. Поэтому сопряжения элементов каркаса друг с другом приняты шарнирными. Сопряжения стержней в местах примыкания к верхнему кольцу или временной центральной стойке также приняты шарнирными.

Исследование производилось на основе статического расчета моделей купольных каркасов проектной и каждой из монтажных схем на действие нагрузки только от собственного веса конструктивных элементов каркаса. Вес временных и постоянных опорных стоек не учитывался. Рассматривались стадии возведения, когда уже установлены на временные и постоянные стойки стержневые части или отдельные элементы трех из шести не связанных между собой секторов купольного каркаса. Нагрузка от их собственного веса передается как на постоянные контурные, так и на все внутриконтурные временные опоры в каждом конкретном способе возведения.

В результате расчетов было получено напряженно-деформированное состояние каждой из сложившихся монтажных стержневых систем, которое сравнивалось с проектной схемой купольного каркаса. Максимальные вертикальные перемещения от собственного веса каркаса в монтажных схемах ребристо-кольцевого купола равны 0,06, 0,08 и 0,14 см соответственно схемам рис. 2, в секториально-сетчатом куполе – 0,00, 0,13, 0,15 и 0,19 см соответственно схемам рис. 3.

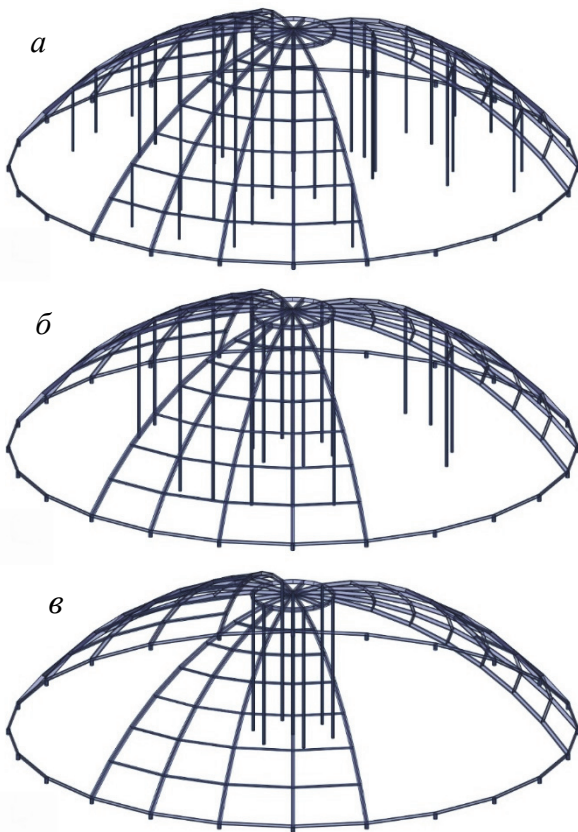
Внутренние усилия  $N_i$  и  $M_i$  в элементах каждой из многочисленных расчетных схем стержневых систем характеризуются большим разбросом в широком интервале значений, включающих и разные знаки. Поэтому анализ напряженных состояний купольных каркасов производился по отношению нормальных напряжений в конструктивных элемен-

тах в монтажных схемах  $\sigma_{M,i}$  к нормальным напряжениям в проектной схеме  $\sigma_{п,i}$ , т.е.  $\sigma_{M,i} / \sigma_{п,i}$ .

Элементы пространственных стержневых систем, к которым относятся купольные каркасы, находятся в состоянии действия продольной силы одновременно с изгибом. В большинстве стержневых элементов купольных каркасов – это сжимающие напряжения, но для кольцевых элементов у опорного контура (3 нижних кольца в ребристо-кольцевом куполе и опорное кольцо в секториально-сетчатом куполе) – это растягивающие напряжения.

Нормальные напряжения в каждом  $i$ -ом элементе рассматриваемых купольных каркасов вычислялись по формуле

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

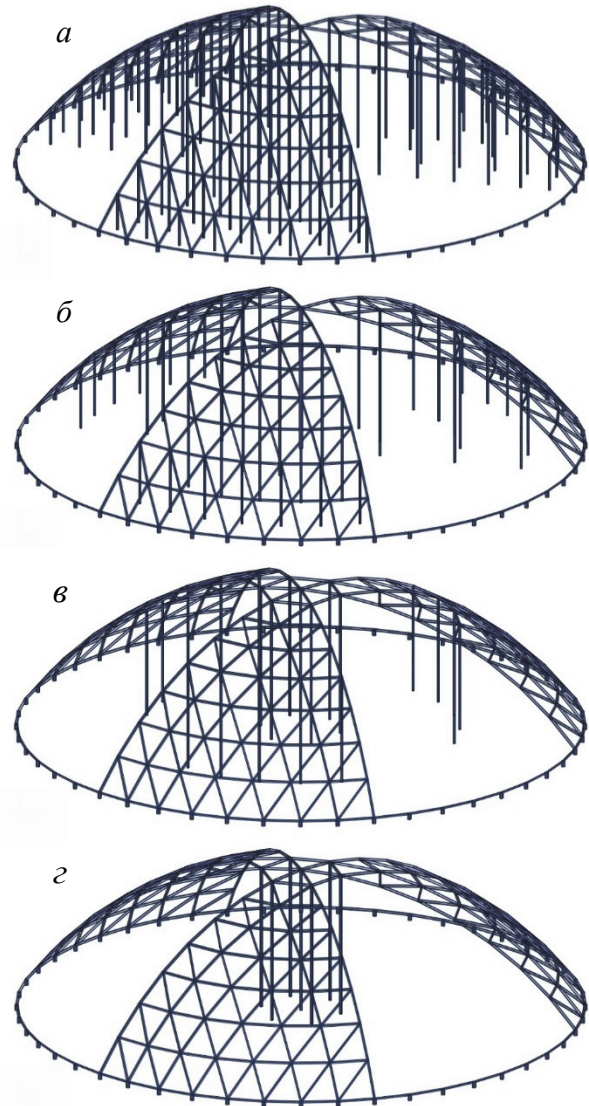


**Рис. 2. Монтажные схемы ребристо-кольцевого купола:**

- a* – с центральной и 3 рядами промежуточных опор;
- б* – с центральной и 1 рядом промежуточных опор;
- в* – с центральной опорой

[Figure 2. Installation schemes of the ribbed-rings dome:

- a* – with a central support and 3 rows of intermediate supports;
- б* – with a central and 1 row of intermediate supports;
- в* – with a central support]



**Рис. 3. Монтажные схемы секториально-сетчатого купола:**

- a* – со сплошными лесами; *б* – с центральной и 3 рядами промежуточных опор; *в* – с центральной и 1 рядом промежуточных опор;

[Figure 3. Installation schemes of the sectorial-lattice dome:

- a* – with continuous scaffolding; *б* – with a central support and 3 rows of intermediate supports; *в* – with a central and 1 row of intermediate supports; *г* – with a central support]

Поскольку наиболее важными в стержневых системах являются сжимающие усилия, то за критерий оценки приняты напряжения со стороны сжатых поясов двутавровых элементов купольных каркасов. Следовательно, полученные данные по элементам купольных каркасов, как правило, характеризуются акцентом на сжимающие напряжения. Исключением из этого правила являются те случаи, когда в элементах возникают только растягивающие напряжения. Так как сжимающие напряжения в проектной и монтажной схемах могут оказаться на противоположных поясах двутавров,

при вычислении отношения  $\sigma_{M,i} / \sigma_{П,i}$  это учитывалось введением знаков «+» и «-». Знак «-» применялся в том случае, когда сжимающие напряжения в элементе монтажной и проектной схем оказывались с разных сторон от нейтральной оси двутавра, а знак «+» – если сжимающие напряжения оказывались по одну сторону.

### Результаты

На рис. 4 и 5 приведены сравнительные данные по напряжениям, возникающим в стержнях каркаса ребристо-кольцевого купола при различных способах его монтажа. Эти данные показывают, что при всех способах монтажа в отдельных группах элементов каркаса ребристо-кольцевого купола возникают напряжения, превышающие напряжения при работе каркаса по проектной схеме. При этом в ребрах по мере приближения к вершине купола напряжения возрастают, а в кольцах снижаются и даже меняют знак. С уменьшением количества временных опор при монтаже напряжение в ребрах нижней части купольного каркаса возрастает. При монтаже с центральной и 3 рядами промежуточных опор напряжения в ребрах достигают 1,2–1,6 проектных значений в верхней части купола. При монтаже с центральной и 1 рядом промежуточных опор напряжения в ребрах достигают 1,7–2,2 проектных значений в верхней части купола. При монтаже только с центральной опорой напряжения в ребрах достигают 1,6–2,2 проектных значений в верхней и 1,4–1,8 в нижней частях купола.

Напряжения в кольцах купольного каркаса достигают максимума в 2,8 проектных значений

только на внешнем контуре, а в других местах не превышают 1,6 проектных значений. Они не проявляют значительной зависимости от способов монтажа, за исключением 1-го ряда временных опор для монтажной схемы *a*, где наблюдается всплеск напряжений до 2,4 проектных значений.

На рис. 6, 7 и 8 приведены сравнительные данные по напряжениям, возникающим в стержнях каркаса секториально-сетчатого купола при различных способах его монтажа. Для удобства описания стержневые элементы на границах секторов названы меридиональными, элементы по кольцевому направлению – кольцевыми, а элементы между кольцевыми стержнями – раскосными.

Полученные данные показывают, что при всех способах монтажа в названных группах элементов секториально-сетчатого купола возникают напряжения, превышающие напряжения при работе каркаса по проектной схеме.

При монтаже со сплошных лесов напряжения в меридиональных элементах не достигают значений проектной схемы каркаса. При монтаже с центральной и 3 рядами промежуточных опор напряжение в меридиональных элементах нижнего яруса купольного каркаса возрастает до 3,0 проектных значений, а в верхнем ярусе – до 1,4. При монтаже с центральной и 1 рядом промежуточных опор напряжение в меридиональных элементах нижнего и верхнего ярусов возрастает до 2,4 и 1,7 проектных значений соответственно. При монтаже с центральной опорой напряжение в меридиональных элементах нижних и верхних ярусов возрастает до 1,6–2,8 и 2,0–2,8 проектных значений соответственно.

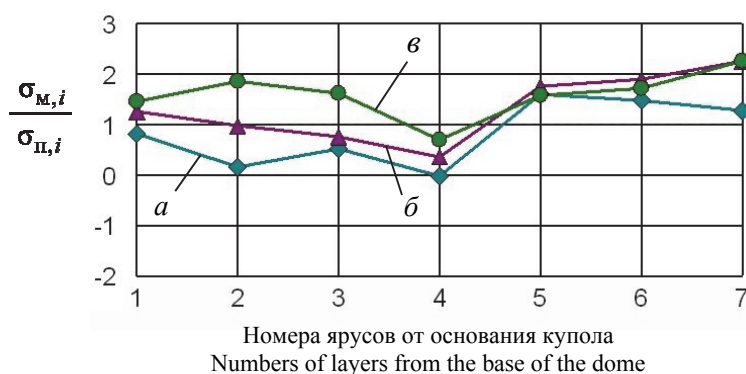
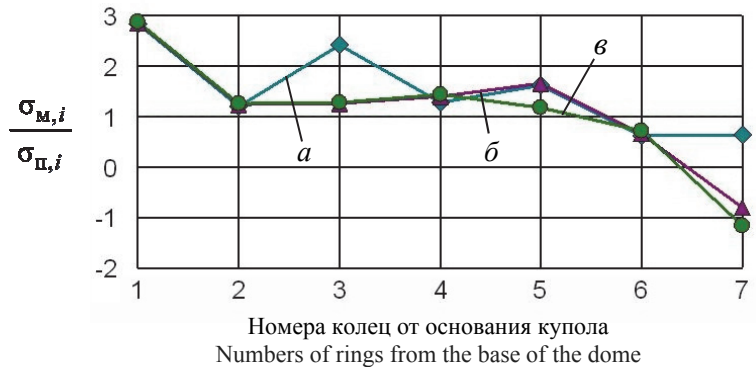


Рис. 4.  $\sigma_{M,i} / \sigma_{П,i}$  в ребрах ребристо-кольцевого купола:

*a* – монтаж с центральной и 3 рядами промежуточных опор;  
*б* – монтаж с центральной и 1 рядом промежуточных опор; *в* – монтаж с центральной опорой

[Figure 4.  $\sigma_{M,i} / \sigma_{П,i}$  in the ribs of the ribbed-rings dome:

*a* – installation with a central support and 3 rows of intermediate supports;  
*б* – installation with a central and the 1 row of intermediate supports; *в* – installation with a central support]

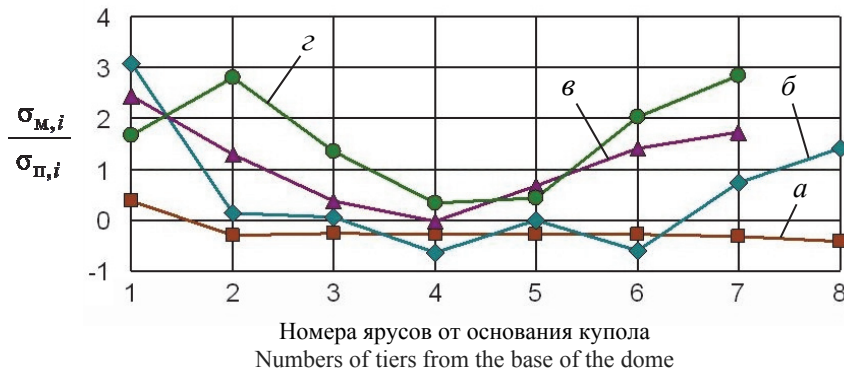


**Рис. 5.  $\sigma_{M,i}/\sigma_{N,i}$  в кольцах ребристо-кольцевого купола:**

*a* – монтаж с центральной и 3 рядами промежуточных опор;  
*б* – монтаж с центральной и 1 рядом промежуточных опор; *в* – монтаж с центральной опорой

**[Figure 5.  $\sigma_{M,i}/\sigma_{N,i}$  in the rings of the ribbed-rings dome:**

*a* – installation with a central and 3 rows of intermediate supports;  
*б* – installation with a central and 1 row of intermediate supports; *в* – installation with a central support]

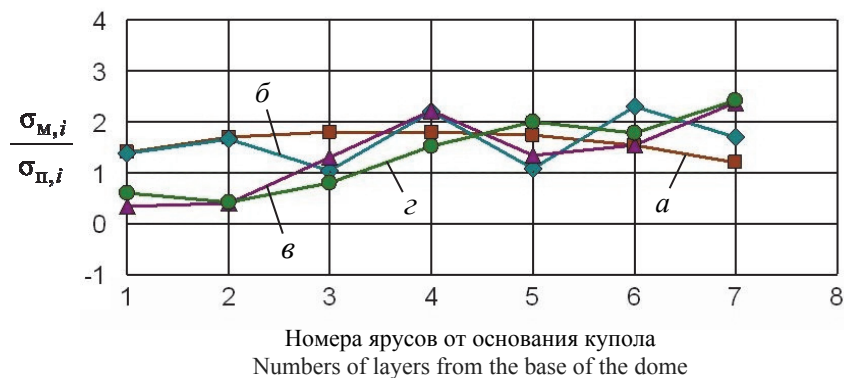


**Рис. 6.  $\sigma_{M,i}/\sigma_{N,i}$  в меридиональных элементах секториально-сетчатого купола:**

*a* – монтаж со сплошных строительных лесов; *б* – монтаж с центральной и 3 рядами промежуточных опор;  
*в* – монтаж с центральной и 1 рядом промежуточных опор; *з* – монтаж с центральной опорой

**[Figure 6.  $\sigma_{M,i}/\sigma_{N,i}$  in the meridional elements of the sectorial-lattice dome:**

*a* – installation from continuous scaffolding; *б* – installation with a central support and 3 rows of intermediate supports;  
*в* – installation with a central and 1 row of intermediate supports; *з* – installation with a central support]



**Рис. 7.  $\sigma_{M,i}/\sigma_{N,i}$  в раскосных элементах секториально-сетчатого купола:**

*a* – монтаж со сплошных строительных лесов; *б* – монтаж с центральной и 3 рядами промежуточных опор;  
*в* – монтаж с центральной и 1 рядом промежуточных опор; *з* – монтаж с центральной опорой

**[Figure 7.  $\sigma_{M,i}/\sigma_{N,i}$  in the diagonal elements of the mesh dome:**

*a* – installation from continuous scaffolding; *б* – installation with a central support and 3 rows of intermediate supports;  
*в* – installation with a central and 1 row of intermediate supports; *з* – installation with a central support]

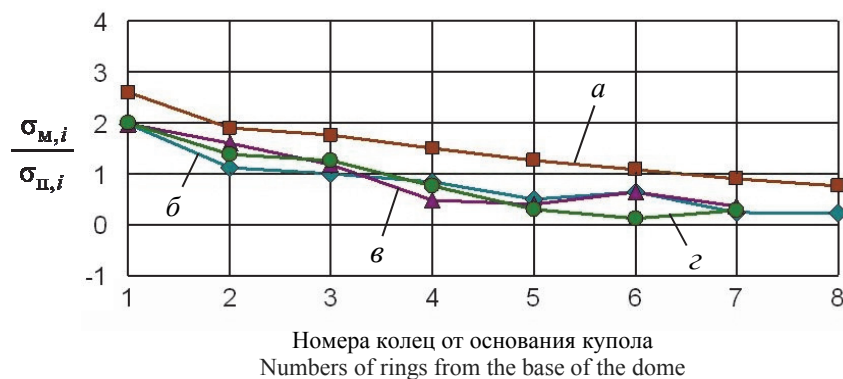


Рис. 8.  $\sigma_{M,i}/\sigma_{\Pi,i}$  в кольцевых элементах секториально-сетчатого купола:

а – монтаж со сплошных строительных лесов; б – монтаж с центральной и 3 рядами промежуточных опор; в – монтаж с центральной и 1 рядом промежуточных опор; г – монтаж с центральной опорой

[Figure 8.  $\sigma_{M,i}/\sigma_{\Pi,i}$  in the ring elements of the sectoral-lattice dome:

a – installation from continuous scaffolding; б – installation with a central and 3 rows of intermediate supports; в – installation with a central and 1 row of intermediate supports; г – installation with a central support]

Напряжение в раскосах секториально-сетчатого купола с уменьшением количества временных опор возрастает в основном несколькими скачками в средней и верхней частях купольного каркаса, за исключением монтажа на лесах. При монтаже на сплошных лесах напряжения в раскосных элементах возрастают плавно до 1,8 проектных значений в средней части каркаса. При монтаже с центральной и 3 рядами промежуточных опор напряжения в раскосных элементах возрастают до 2,2 и 2,3 проектных значений в средней и верхней частях каркаса соответственно. При монтаже с центральной и 1 рядом промежуточных опор напряжения в раскосных элементах возрастают до 2,2 и 2,4 проектных значений в средней и верхней частях каркаса соответственно. При монтаже только с центральной опорой напряжения в раскосных элементах возрастают до 2,0 и 2,4 проектных значений в средней и верхней частях каркаса соответственно.

Самые большие напряжения в кольцевых элементах секториально-сетчатого купольного каркаса возникают при монтаже на сплошных лесах и достигают 2,6 проектных значений над опорным контуром, затем они плавно уменьшаются до 0,8. Такой же характер проявляется у напряжений при других способах монтажа. При монтаже с центральной и 3 рядами промежуточных опор, центральной и 1 рядом промежуточных опор, только с центральной опорой напряжения в раскосных элементах достигают 2,0 проектных значений также над опорным контуром, которые затем уменьшаются до 0,2, 0,3 и 0,2 соответственно.

Следует отметить, что из-за существенного отличия напряжений проектной схемы в разных элементах купольных каркасов по высоте для сравни-

тельного анализа монтажных схем представленных графиков недостаточно. Так, напряжения в разных элементах однотипных конструктивных частей каркасов ребристо-кольцевого купола проектной схемы имеют разброс значений между максимальными и минимальными по абсолютной величине напряжениями до 1,9 в ребрах и до 4,0 в кольцах. А в секториально-сетчатом куполе разброс абсолютных величин между максимальными и минимальными напряжениями достигает 1,8 в меридиональных стержнях, 1,6 в стержнях раскосов и 1,8 в кольцевых стержнях. Кроме того, имеется разброс значений между напряжениями разнотипных стержневых элементов купольных каркасов.

Поэтому для выполнения качественного сравнительного анализа напряженных состояний при различных способах возведения полезно сопоставить наибольшие по абсолютной величине напряжения (с учетом одного и того же знака в элементах конкретных конструктивных групп купольных каркасов) в монтажных схемах с аналогичными напряжениями в проектной схеме.

На рис. 9 приведены сравнительные данные по максимальным напряжениям  $\sigma_{M,max}/\sigma_{\Pi,max}$ , возникающим в стержнях каркаса ребристо-кольцевого купола при различных способах его монтажа. Относительные максимальные сжимающие напряжения в ребрах по мере уменьшения количества временных опор неуклонно и существенно возрастают: при монтаже с центральной и 3 рядами промежуточных опор равны 1,01, центральной и 1 рядом промежуточных опор – 1,25, с центральной опорой – 1,66. Сжимающие напряжения в кольцах с уменьшением количества временных опор возрастают незначительно: при монтаже с центральной и 3 рядами про-

межуточных опор равны 1,12, центральной и 1 рядом промежуточных опор – 1,17, с центральной опорой – 1,20. Растягивающие напряжения в нижних кольцах при монтаже с центральной и 3 рядами промежуточных опор имеют большую величину, равную 1,93, чем при монтаже с центральной и 1 рядом промежуточных опор – 1,25, а также при монтаже с центральной опорой – 1,26.

На рис. 10 приведены сравнительные данные по максимальным напряжениям  $\sigma_{M,max}/\sigma_{II,max}$ , возникающим в стержнях каркаса секториально-сетчатого купола при различных способах его монтажа. Относительные максимальные сжимающие напряжения в меридиональных элементах при монтаже на сплошных лесах незначительны и равны 0,21. Однако, по мере уменьшения количества временных опор относительные максимальные сжимающие напряжения в

целом существенно возрастают: при монтаже с центральной и 3 рядами промежуточных опор равны 1,72, центральной и 1 рядом промежуточных опор – 1,60, с центральной опорой – 2,63. Сжимающие напряжения в раскосных элементах с уменьшением количества временных опор становятся немного больше: при монтаже на сплошных лесах они равны 1,41, с центральной и 3 рядами промежуточных опор – 1,58, центральной и 1 рядом промежуточных опор – 1,61, с центральной опорой – 1,53. Сжимающие напряжения в кольцевых элементах с уменьшением количества временных опор даже немного уменьшаются: при монтаже на сплошных лесах равны 1,55, с центральной и 3 рядами промежуточных опор – 0,91, центральной и 1 рядом промежуточных опор – 1,29, с центральной опорой – 1,12.

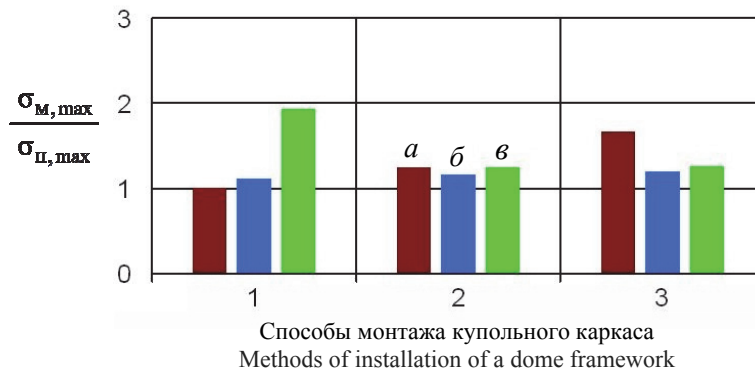


Рис. 9.  $\sigma_{M,max}/\sigma_{II,max}$  в элементах ребристо-кольцевого купола:

1 – монтаж с центральной и 3 рядами промежуточных опор; 2 – монтаж с центральной и 1 рядом промежуточных опор; 3 – монтаж с центральной опорой; а – сжатие в ребрах; б – сжатие в кольцах; в – растяжение в кольцах

[Figure 9.  $\sigma_{M,max}/\sigma_{II,max}$  in the elements of the ribbed-ring dome:

1 – installation with a central and 3 rows of intermediate supports; 2 – installation with a central and 1 row of intermediate supports; 3 – installation with a central support; а – compression in the ribs; б – compression in the rings; в – tension in the rings]

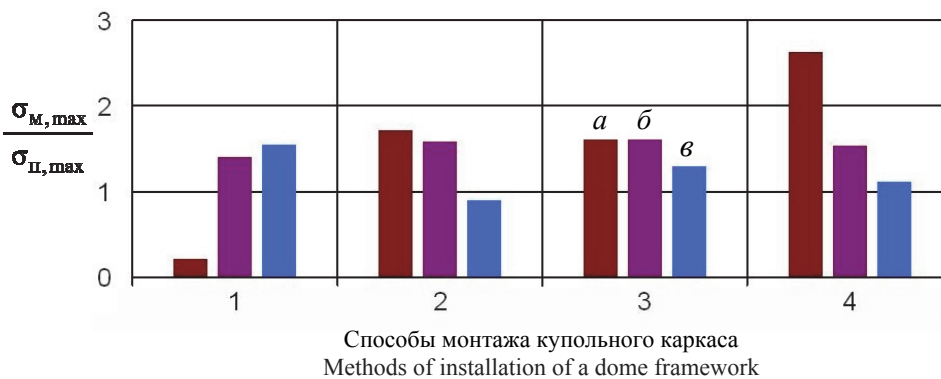


Рис. 10.  $\sigma_{M,max}/\sigma_{II,max}$  в элементах секториально-сетчатого купола:

1 – монтаж со сплошных строительных лесов; 2 – монтаж с центральной и 3 рядами промежуточных опор; 3 – монтаж с центральной и 1 рядом промежуточных опор; 4 – монтаж с центральной опорой; а – сжатие в ребрах; б – сжатие в раскосах; в – сжатие в кольцах

[Figure 10.  $\sigma_{M,max}/\sigma_{II,max}$  in the elements of the sectoral-lattice dome:

1 – installation from a continuous scaffolding; 2 – installation with a central and 3 rows of intermediate supports; 3 – installation with a central and 1 row of intermediate supports; 4 – installation with a central support; а – compression in the ribs; б – compression in the diagonal elements; в – compression in the rings]



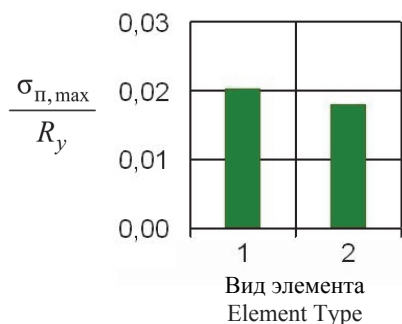


Рис. 11.  $\sigma_{п, max} / R_y$  (сжатие) в ребристо-кольцевом куполе:

1 – в ребрах; 2 – в кольцах

[Figure 18.  $\sigma_{п, max} / R_y$  (compression) in the ribbed-ring dome:

1 – in the ribs; 2 – in the rings]

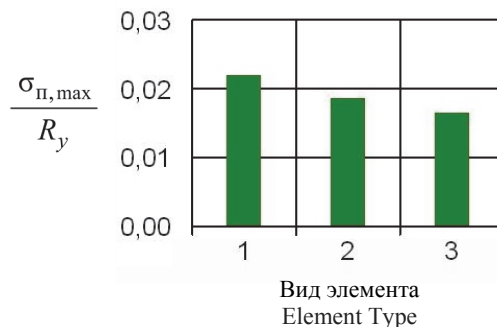


Рис. 12.  $\sigma_{п, max} / R_y$  (сжатие) в секториально-сетчатом куполе:

1 – в ребрах; 2 – в раскосах; 3 – в кольцах

[Figure 19.  $\sigma_{п, max} / R_y$  (compression) in the sectorial-lattice dome:

1 – in the ribs; 2 – in the diagonals; 3 – in the rings]

Для оценки степени влияния напряжений, возникающих в элементах купольных каркасов при монтаже, на их общую несущую способность были построены диаграммы степени использования прочности при работе каркаса на собственный вес в проектной схеме.

На рис. 11 и 12 приведены диаграммы относительных максимальных напряжений в сравнении с расчетным сопротивлением стали С245, т.е.  $\sigma_{п, max} / R_y$  в элементах каркасов ребристо-кольцевого и секториально-сетчатого куполов соответственно.

Сравнивая диаграмму  $\sigma_{м, max} / \sigma_{п, max}$  для ребристо-кольцевого купола (рис. 9) с диаграммой  $\sigma_{п, max} / R_y$  (рис. 11), можно отметить, что от работы каркаса при различных способах монтажа в ребрах возникают относительные сжимающие напряжения 0,021, 0,025 и 0,034, а в кольцах – 0,020, 0,021 и 0,022 согласно последовательности рис. 9.

Сравнивая диаграмму  $\sigma_{м, max} / \sigma_{п, max}$  для секториально-сетчатого купола (рис. 10) с диаграммой  $\sigma_{п, max} / R_y$  (рис. 12), можно отметить, что от работы каркаса при различных способах монтажа в меридиональных элементах возникают относительные напряжения 0,005, 0,038, 0,035 и 0,058, в раскосных элементах возникают относительные сжимающие напряжения 0,026, 0,030, 0,030 и 0,029, а в кольцевых элементах – 0,026, 0,015, 0,021 и 0,019 согласно последовательности рис. 10.

### Выводы

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы:

– в процессе возведения большепролетных металлических куполов в конструктивных элементах каркасов возникают напряжения при любом способе монтажа, что обусловлено отличием монтажных схем их работы от проектных;

– монтажные напряжения зависят от способов монтажа и в разных конструктивных элементах проявляются по-разному. Однако в целом величины напряжения тем больше, чем меньше количество временных опор применяется при монтаже купольных каркасов;

– величины монтажных напряжений сопоставимы с напряжениями от собственного веса купольного каркаса в проектных схемах при максимальном количестве временных опор и существенно превосходят их при минимальном количестве временных опор;

– для обеспечения надежности большепролетных металлических куполов необходимо обязательное выполнение расчетов их каркасов на все виды монтажных состояний, которые появляются в процессе возведения, с учетом их влияния на работу по проектной схеме.

© Лебедь Е.В., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

### Список литературы

1. *Липницкий М.Е.* Купола (расчет и проектирование). Л.: Стройиздат, 1973. 129 с.
2. *Тур В.И.* Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности. М.: Изд-во АСВ, 2004. 96 с.
3. *Гохарь-Хармандарян И.Г.* Большепролетные купольные здания. М.: Стройиздат, 1978. 150 с.

4. *Кривошапко С.Н.* Металлические ребристо-кольцевые и сетчато-стержневые оболочки XIX – первой половины XX веков // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 6. С. 4–15.

5. *Торкатюк В.И.* Монтаж конструкций большепролетных зданий. М.: Стройиздат, 1985. 170 с.

6. Металлические конструкции: справочник проектировщика: в 3 т. / под общ. ред. В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова). Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений. М.: Изд-во АСВ, 1998. 512 с.

7. *Гофштейн Г.Е., Ким В.Г., Ницев В.Н., Соколова А.Д.* Монтаж металлических и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 2004. 528 с.

8. *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.

9. *Mukaiyama Y., Fujino T., Kuroiwa Y., Ueki T.* 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, Universidad Politecnica de Valencia, 28 September – 2 October 2009. Pp. 1951–1962.

10. *Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А.* SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD: М.: Изд-во АСВ, 2004. 592 с.

11. *Городецкий А.С., Евзеров И.Д.* Компьютерные модели конструкций. Киев: Факт, 2005. 344 с.

12. *Chandiwala A.* Analysis and design of steel dome using software // International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET). eSAT Publishing House, Bangalore, India. 2014. Vol. 3. Issue 3. Pp. 35–39.

13. *Jadhav H.S., Patil A.S.* Parametric Study of Double Layer Steel Dome with Reference to Span to Height Ratio // International Journal of Science and Research (IJSR). India Online. 2013. Vol. 2. Issue 8. Pp. 110–118.

14. *Handruleva A., Matuski V., Kazakov K.* Combined Mechanisms of Collapse of Discrete Single-Layer Spheri-

cal Domes // Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA). December 2012. Vol. 1. Issue 1. Pp. 19–27.

15. *Amjatha M., Sumayya A., Muhammed Haslin S.M.* Finite Element Analysis of Diamatic, Schwedler and Diamatic-Schwedler Hybrid Domes // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). Kerala, India. 2016. Vol. 39. No. 1. Pp. 57–62.

16. *Chacko P., Dipu V.S., Manju P.M.* Finite Element Analysis of Ribbed Dome // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). Kerala, India. 2014. Pp. 25–32.

17. *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). Kerala, India. 2015. Vol. 28. No. 7. Pp. 333–338.

18. *Nabeel A.J., Ihab S.S., Saddam Kh.F.* Structural Analysis of Ribbed Domes Using Finite Element Method // International Journal of Civil Engineering Research. Research India Publications. 2017. Vol. 8. No. 2. Pp. 113–130.

#### Об авторе

*Лебедь Евгений Васильевич* – кандидат технических наук, доцент, кафедра металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). *Область научных интересов:* большепролетные металлические купольные покрытия – схемы каркасов, конструкции элементов, способы возведения, точность сборки, компьютерное моделирование монтажа, исследование погрешностей и начальных усилий, оценка напряженно-деформированного состояния. *Контактная информация:* e-mail – evglebed@mail.ru.

#### Для цитирования

*Лебедь Е.В.* Компьютерное исследование работы каркасов большепролетных металлических куполов при различных способах монтажа // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 4. С. 261–272. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-261-272.

SCIENTIFIC ARTICLE

## Computer analysis of the behavior of large-span metal domes with different methods of installation

Evgeny V. Lebed

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)  
26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

(received: June 18, 2018; accepted: August 02, 2018)

**Abstract.** A brief characteristic of the process of forming the frameworks of large-span metal domes during the installation process is given. A general description of the structural solutions of the frameworks of ribbed domes with annular rings and lattice large-span metal domes is presented. Alternative ways of modeling structural connections of the elements

of the frameworks are discussed for domes with different types of structural systems. The load-bearing structural schemes during the assembly of frameworks differ from those, adopted for their analysis and design. Due to this fact, initial internal forces appear in the structural elements of frameworks that are called assembly forces.

For the research purpose, design computer models of ribbed dome with annular rings and of sectorial lattice metal dome were developed with the span of 48 m and the height 12 m. The lattice is made of steel I-bars with rigid connections at the joints. The investigated dome frameworks are supported along the contour by permanent columns through hinge supports. On the basis of de-sign models, additional models were created for incomplete frameworks to study alternative ways of erection, which differed from each other in the number of temporary supports with hinge connection to the framework and hinge connections of the bar elements at the joint above the temporary support. Each of these models interpreted the intermediate state of the erected dome framework with its characteristic structural scheme. Depending on the number of temporary supports, three installation schemes were considered for the ribbed-ring dome, and four schemes – for the sectorial-lattice dome.

Assembly computer models included the following types of temporary supports: central support, central and one row of intermediate supports, central and three rows of intermediate supports, support under each joint of a frame-work. For each assembly model of the dome framework, computer analysis was performed for the action of its self-weight in order to determine their stress-strain state. Stresses in the structural members, obtained as a result of the analysis, were compared with the stresses in the corresponding elements of the design model of the framework under the self-weight. Based on the obtained data, graphs and diagrams were constructed reflecting the level of assembly stresses in the structural elements of the frame in comparison with design values taking into account the type of work (compression or tension). Various groups of elements are considered along the entire height of the dome frames.

The conclusion is made that the stresses in the elements of frameworks of the large-span metal domes are unavoidable when they are erected, and the level of these stresses for specific erection methods is significant. The methods of erection and the types of structural elements that can affect the reliability of dome frames are indicated. The necessity of compulsory analysis of frame-works for erection conditions in the design of large-span metal domes was noted.

**Keywords:** large-span domes, metal frameworks, geometric schemes of domes, structural systems, design solutions, methods of erection, assembly of structures, computer model, element stresses

## References

- Lipnizkiy M.E. (1973). *Kupola (raschet i proektirovaniye) [Domes (Calculation and Design)]*. Leningrad: Stroyizdat Publ., 129. (In Russ.)
- Tur V.I. (2004). *Kupol'nye konstruksii: formoobrazovanie, raschet, konstruirovaniye, povysheniye effektivnosti [Dome Structures: Morphogenesis, Analysis, Design, Increase in Effectiveness]*. Moscow: ASV Publ., 96. (In Russ.)
- Gokhar'-Harmadaryan I.G. (1978). *Bol'sheproletnyye kupol'nye zdaniya [Wide-Span Dome Buildings]*. Moscow: Stroyizdat Publ., 150. (In Russ.)
- Krivoshapko S.N. (2014). 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*, (6), 4–15.
- Torkatyuk V.I. (1985). *Montazh konstruktsiy bol'sheproletnykh zdaniy [Installation of Structures of Large-Span Buildings]*. Moscow: Stroyizdat Publ., 170. (In Russ.)
- Kuznetsov V.V. (1998). *Metallicheskie konstruktsii [Metal Structures]*. Vol. 2. Stal'nye konstruksii zdaniy i sooruzheniy. Spravochnik proektirovshchika [Steel structures of buildings and constructions. Reference book the designer]. Moscow: ASV Publ., 512. (In Russ.)
- Gofshteyn G.E., Kim V.G., Nishchev V.N., Sokolova A.D. (2004). *Montazh metallicheskih i zhelezobetonnykh konstruktsiy [Installation of Metal and Reinforced Concrete Structures]*. Moscow: Stroyizdat Publ., 528. (In Russ.)
- Lebed E.V., Alukaev A.U. (2018). Large-span metal dome roofs and their construction. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(1), 4–16, doi.10.22363/1815-5235-2018-14-1-4-16. (In Russ.)
- Mukaiyama Y., Fujino T., Kuroiwa Y., Ueki T. 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, Universidad Politecnica de Valencia, 28 September – 2 October, 1951–1962*.
- Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A. (2004). *SCAD Office. Vychislitel'nyy kompleks SCAD [SCAD Office. Computer system SCAD]*. Moscow: ASV Publ., 592. (In Russ.)
- Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. (2005). *Komp'yuternyye modeli konstruksiy [Computer models of structures]*. Kiev: Fakt Publ., 344. (In Russ.)
- Chandiwala A. (2014). Analysis and design of steel dome using software. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 3(3), 35–39.
- Jadhav H.S., Patil Ajit S. (2013). Parametric Study of Double Layer Steel Dome with Reference to Span to Height Ratio. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2(8), 110–118.
- Handruleva A., Matuski V., Kazakov K. (2012). Combined Mechanisms of Collapse of Discrete Single-Layer Spherical Domes. *Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA)*, 1(1), 19–27.
- Amjatha M., Sumayya A., Muhammed Haslin S.M. (2016). Finite Element Analysis of Diamatic, Schwedler and Diamatic-Schwedler Hybrid Domes. *International*

*Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 39(1), 57–62.

16. Chacko Peter, Dipu V.S., Manju P.M. (2014). Finite Element Analysis of Ribbed Dome. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 25–32.

17. Merilmol E., Rajesh A.K., Ramadass S. (2015). Finite Element Analysis and Parametric Study of Schwedler Dome Using ABAQUS Software. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 28(7), 333–338.

18. Nabeel A.J., Ihab S.S., Saddam Kh.F. (2017). Structural Analysis of Ribbed Domes Using Finite Element Method. *International Journal of Civil Engineering Research*, 8(2), 113–130.

#### **About the author**

**Evgeny V. Lebed** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Metal and Wooden Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU). *Scientific interests*: large-span metal dome roofs – geometric systems, structural systems, methods of construction, accuracy of assembly, computer simulation of mounting, research of assembly errors and initial internal forces, assessment of the stress-strain state. *Contact*: e-mail – evglebed@mail.ru.

#### **For citation**

Evgeny V. Lebed. (2018). Computer analysis of the behavior of large-span metal domes with different methods of installation. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(4), 261–272. (In Russ.) DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-261-272.