УДК 624.014.074.2

Е.В. Лебедь, А.А. Григорян
ФГБОУ ВПО «МГСУ»

НАЧАЛЬНЫЕ УСИЛИЯ В ДВУХПОЯСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КУПОЛАХ ИЗ-ЗА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МОНТАЖА ИХ КОНСТРУКЦИЙ

На основе анализа процесса возведения каркасов двухпоясных металлических куполов показаны причины появления начальных усилий в стержнях каркаса. Отмечена невозможность возведения таких сооружений с идеальными геометрическими параметрами из-за возникающих по объективным причинам погрешностей. Эти погрешности приводят к затруднению соединения монтажных конструктивных элементов куполов в узлах. Указано на необходимость использования при монтаже подгоночных операций, которые сопровождаются силовыми воздействиями и приводят к появлению начальных усилий из-за погрешностей. Предложена и подтверждена расчетами конкретного купольного каркаса методика компьютерного моделирования силового устранения возможных погрешностей его монтажа.

Ключевые слова: металлические купола, погрешности монтажа, соединения конструкций, подгоночные операции, отклонения узлов, начальные усилия.

Начальные усилия в двухпоясных металлических куполах больших пролетов возникают по различным причинам. Основной причиной их появления служит работа конструкций каркасов куполов при монтажных схемах и нагрузках. Но есть и другая причина — это возникающие при монтаже куполов погрешности в сопряжениях конструкций.

При анализе аварий различных зданий и сооружений многими специалистами часто отмечаются погрешности в качестве дефектов конструкций, способствующих их переходу в аварийное состояние [1, 2]. Если исключить факторы, связанные с прочностью металла, качеством сварных соединений и коррозионными процессами, то наиболее часто применительно к стальным конструкциям отмечают следующие дефекты [3, 4]:

несоответствие размеров конструкции или ее элементов проекту;
искривления отдельных стержневых элементов конструкций;
появление зазоров между соединяемыми элементами в узлах;
смещение осей стержневых элементов от центров их узлов сопряжений;
искажение геометрической формы конструкции в целом.

Однако в публикациях не отмечается тот факт, что причинами таких дефектов возведенных каркасов зданий и сооружений служат погрешности изготовления и монтажа отдельных конструкций.

В купольных покрытиях самыми заметными и, поэтому наиболее обсуждаемыми в публикациях, являются искажения геометрической формы пространственной стержневой системы каркаса купола. Это происходит вследствие значительных смещений узлов купольного каркаса от проектного положения, причем эти отклонения могут достигать нескольких сантиметров. Отмечается, что расчет двухпоясного ребристо-кольцевого купола с учетом искажений гео-

© Лебедь Е.В., Григорян А.А., 2015

метрической формы показал отличие его напряженно-деформированного состояния (НДС) по сравнению с проектной формой [5].

Одной из причин обрушения большепролетного двухпоясного сетчатого металлического купола, строившегося в г. Истра Московской области в 1985 г., являлись погрешности монтажа конструкций [2]. Купол имел эллипсоидную форму с наибольшим диаметром (по экватору) 234 м, расположенного на отметке 23 м, и высотой 112 м [6]. Каркас купола был выполнен двухпоясным с треугольными ячейками поясных сеток из уголков, расположенными на расстоянии 2,5 м друг от друга и соединенными решеткой из труб. Монтаж каркаса выполнялся стержневыми блоками в виде призм с ромбическим основанием (включающим две ячейки поясных сеток). В качестве причин появления погрешностей монтажа как в истринском куполе, так и в других металлических куполах указываются [2, 5]:

отсутствие контроля точности изготовления металлических конструкций;

отсутствие геодезического контроля пространственного положения узлов каркаса в процессе монтажа;

нарушение последовательности сборки и монтажа конструкций каркасов;

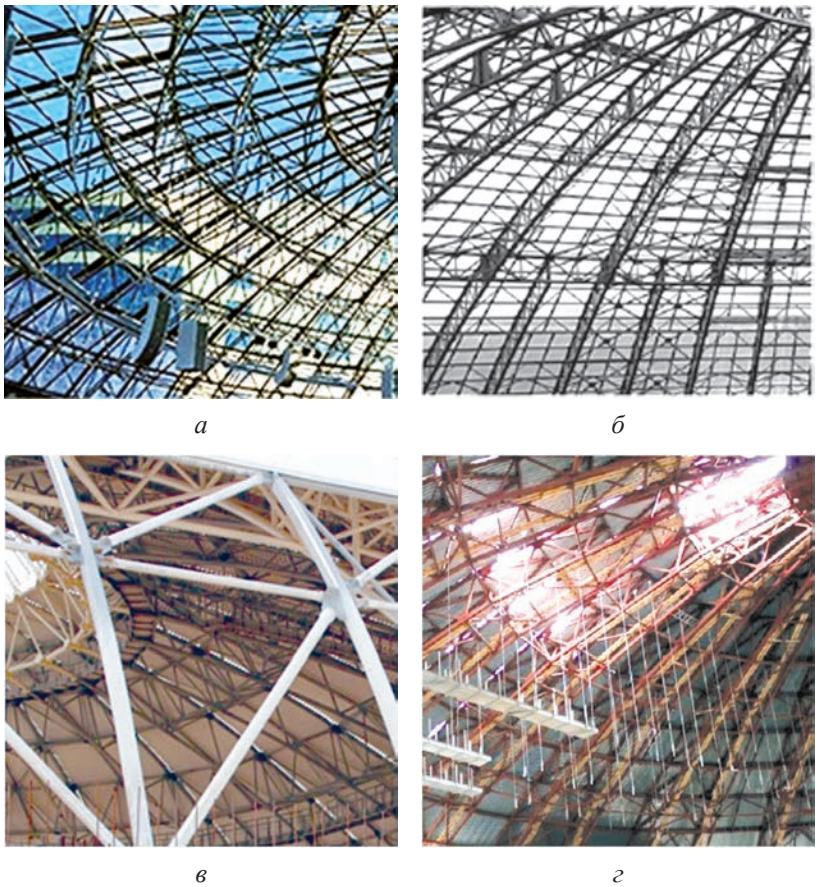
фиксация геометрической формы монтажных блоков до установки их в проектное положение;

изменение конструкции узлов или применение дополнительных деталей.

Однако это не совсем правильное толкование. Главными причинами появления несовершенств геометрической формы купольных каркасов, несоответствия размеров конструкций проекту, искривлений их стержней, появления зазоров в узлах и смещения осей стержней в узлах служат не отсутствие контроля точности, не нарушение последовательности сборки или других негативных действий человека, а, в основном, объективные законы геометрии, теории вероятностей и строительной механики. Невозможно изготовить металлические конструкции, геометрические параметры которых абсолютно точно соответствовали бы проектным значениям. Они всегда будут отличаться от проекта на незначительные случайные величины в пределах допуска. Кроме того, они будут отличаться и друг от друга. Учитывая, что из них собирают купольный каркас, этого достаточно, чтобы его геометрическая форма получила несовершенства из-за погрешностей монтажа, что подтверждается отдельными исследованиями [7].

Каркасы большепролетных металлических куполов представляют собой пространственные многосвязные стержневые системы (рис. 1), характеризующиеся взаимной зависимостью расстояний между узлами в разных направлениях. Они возводятся из большого количества монтажных элементов, и неточности отдельных конструкций в процессе монтажа накапливаются, что оказывает негативное влияние на геометрические параметры пространственных сооружений. Даже незначительные отличия отдельных монтажных конструкций или элементов друг от друга в пределах допускаемых отклонений как плоских, так и объемных отражаются неточностями расстояний между узлами купольных каркасов. Следовательно, монтаж металлических куполов больших пролетов сопровождается неизбежными погрешностями, величины и значимость которых зависят от конструктивных и технологических особенностей их

каркасов. Эти погрешности приводят к неточностям геометрического положения узлов сопряжения конструкций, которые в сложных стержневых системах вызывают проблему собираемости купольных каркасов [12].



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Примеры каркасов металлических двухпоясных большепролетных куполов: *а* — МОК в Минске [8]; *б* — аквапарк в Донецке [9]; *в* — Центр фристайла в Минске [10]; *г* — Арена-Север в Красноярске [11]

Изменение расстояний между узлами по одним направлениям пространственной стержневой системы купола приводит к необходимости изменения расстояний и по другим направлениям, что затрудняет соединение конструкций в узлах. С этим явлением сталкиваются всегда: при поэлементной сборке сооружения из отдельных стержней; при монтаже каркаса из заводских или собранных на земле плоских конструкций; при монтаже купола из предварительно укрупненных на строительной площадке объемных блоков [13]. Причем связанные с неточностью трудности соединения конструкций не уменьшаются, даже если при монтаже купольного каркаса любым из перечисленных методов используются одна или нескольких временных опор, а также при монтаже на сплошных подмостях.

Для реализации проектных соединений конструкций при монтаже металлических куполов приходится прибегать к силовым воздействиям. К таким воздействиям относятся подгоночные операции с использованием, например,

круглых клиньев, забиваемых в болтовые отверстия или в зазоры между вспомогательными деталями конструкций [14]. В процессе такой подгонки, сопровождающейся силовым воздействием на соседние конструкции, добиваются взаимного смещения их в узлах с целью обеспечения возможности соединения друг с другом согласно проектному решению [15].

Подгоночные операции необходимы также и для обеспечения возможности полноценной проектной сборки в единый каркас всех конструктивных элементов большепролетных куполов. Однако использование силовой подгонки при монтаже приводит к неизбежному появлению начальных усилий в конструктивных элементах сложных купольных каркасов. Даже при сборке односетчатых стержневых пространственных покрытий из-за погрешностей возникают трудности сборки при установке замыкающих стержней, что служит причиной появления сборочных (начальных) усилий в стержнях [16].

Для объективного анализа начальных усилий в конструктивных элементах большепролетных металлических куполов, связанных с силовой подгонкой монтажа, необходимо получение достоверной информации о возможных погрешностях возведения их каркасов. Такая информация может быть получена на основе компьютерного статистического моделирования монтажа купола методом Монте-Карло по разработанной Е.В. Лебедем программе MONTAG [17]. Результаты исследований по этой программе позволяют выполнить оценку возможных отклонений узлов купольного каркаса в зависимости от допусков на размеры конструкций и принятой последовательности монтажа конструктивных элементов каркаса.

Используя данные о возможных погрешностях монтажа каркаса большепролетного купола, можно определить величины силовых воздействий для их устранения при подгоночных операциях. На этом основана предлагаемая здесь методика определения начальных усилий в каркасах двухпоясных металлических большепролетных куполов. В ее основе — создание компьютерной расчетной модели реально проектируемого купольного каркаса с последующим исследованием его НДС от подгоночных силовых воздействий при учете фактических узловых сопряжений элементов во время монтажа.

В соответствии с предлагаемой методикой выполнена оценка возможных начальных усилий в стержнях большепролетного металлического ребристо-кольцевого купола диаметром 96 м. Каркас купола сферический двухпоясной с радиусом кривизны 48 м, включает в себя 16 ребер и 9 колец. Расстояние между кольцами 8 м, между поясами — 3 м. Предварительно в программе ЛИРА была создана расчетная модель каркаса купола согласно описанной геометрической схеме и выполнено его проектирование. Стержневые элементы купольного каркаса назначались из парных уголков в соответствии с результатами статического расчета на нагрузку от собственного веса всех ограждающих и несущих конструкций, снеговую нагрузку и ветровое воздействие. В результате расчета была получена конструктивная модель каркаса купола для исследований начальных усилий при силовых способах устранения погрешностей в процессе монтажа (рис. 2).



Рис. 2. Запроектированный каркас исследуемого ребристо-кольцевого купола

Если предположить, что монтаж каркаса купола выполняется меридиональными секторами с временной центральной опорой под верхним кольцом, то центры узлов меридиональных ребер соседних секторов не будут совмещаться друг с другом в одной точке. Погрешности монтажа конструкций приводят к отклонению положения узлов каркаса купола в нормальном n, кольцевом k и меридиональном m направлениях. Следовательно, для совмещения узлов смежных конструкций потребуется прикладывать к ним внешние парные силы $F_{j,n}$, $F_{j,k}$, $F_{j,m}$ по каждому из перечисленных направлений так, чтобы они располагались друг напротив друга (рис. 3). Эти силы приведут к изменению пространственного положения узлов соединяемых конструкций, что служит имитацией смещения реальных конструкций.

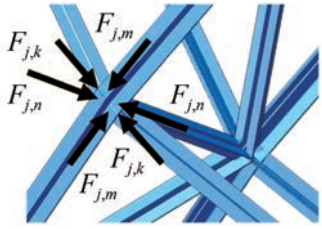


Рис. 3. Схема приложения пар сил для устранения относительных отклонений (погрешностей)

Из-за взаимного ортогонального направления силы $F_{j,i}$ не зависят друг от друга и могут прикладываться раздельно. Это позволяет исследовать влияние силового устранения погрешностей в узлах по нормальному n, кольцевому k и меридиональному m направлениям отдельно. Величины сил $F_{j,n}$, $F_{j,k}$, $F_{j,m}$ назначаются такими, чтобы вызываемые ими деформации конструктивных элементов каркаса купола по каждому конкретному направлению n, k, m соответствовали устраняемым погрешностям смежных конструкций в узле j по направлению i как относительным отклонениям их взаимного положения $f_{j,i} = \delta_{j,i}/2$.

Ранее по программе MONTAG было выполнено исследование возможных погрешностей монтажа представленного на рис. 2 каркаса купола [17], который возводился меридиональными секторами, собранными из объемных монтажных блоков. Исследование показало, что наибольшие предельные отклонения узлов от проектного положения в нормальном и кольцевом направлениях для каркаса купола действительной формы ограничены величинами соответственно 41 и 30 мм и характерны для средней части ребер купола, а в меридиональном направлении величиной 31 мм — у верхнего кольца.

Оценка характера влияния на купольный каркас прикладываемых к узлам пар сил $F_{j,n}$, $F_{j,k}$, $F_{j,m}$ производилась в соответствии с общими принципами исследования НДС стержневых пространственных систем подобного вида на

компьютерных расчетных моделях в зависимости от геометрических особенностей как самих систем, так и характера силовых воздействий на них [18—21]. На начальной или предварительной стадии исследований нас интересовал характер влияния силового устранения погрешностей по каждому направлению n, k, m отдельно, поэтому узловые парные силы $F_{j,i}$ прикладывались к каркасу двухпоясного ребристо-кольцевого купола отдельно для нормальных n, кольцевых k и меридиональных m погрешностей или относительных отклонений.

Для этого были созданы три специальные компьютерные расчетные модели в программе ЛИРА [22]. Эти модели отражали состояние каркаса в процессе монтажа, при котором отсутствуют соединения конструкций соседних секторов в узлах вдоль одного из меридиональных ребер. Кроме того, в таких компьютерных моделях особым образом накладываются или устраняются узловые соединения между стержнями конструктивных частей купольного каркаса. К каждой из этих расчетных моделей в узле посередине меридионального ребра прикладывались внешние пары сил $F_{j,n}$, $F_{j,k}$, $F_{j,m}$, после чего анализировались появляющиеся внутренние усилия в стержнях. Величины внешних пар сил $F_{j,i}$ путем введения коэффициентов назначались так, чтобы суммарные перемещения узла j купольного каркаса по соответствующему направлению i не превышали возможных относительных отклонений (погрешностей) конструкций в данном узле.

Исследования показали, что при силовом устранении погрешностей, полученных статистическим моделированием, в стержнях конструктивных элементов каркаса большепролетного двухпоясного металлического купола возникают начальные усилия. На рис. 4—6 приведены цветовые мозаики начальных усилий в стержнях при силовом устранении погрешностей в середине одного из меридиональных ребер, соответственно, по нормальному n, кольцевому k и меридиональному m направлениям.

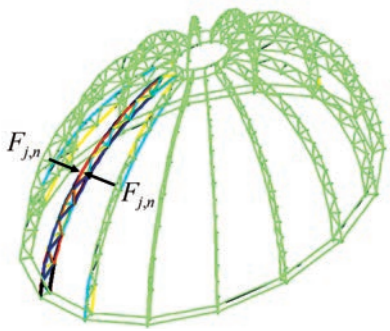


Рис. 4. Схема распределения начальных усилий при устранении нормальных погрешностей

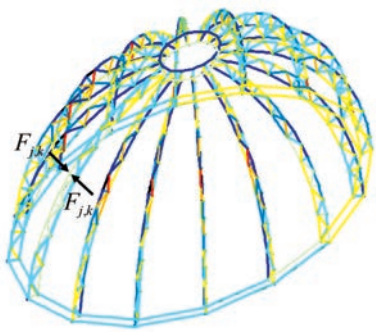


Рис. 5. Схема распределения начальных усилий при устранении кольцевых погрешностей

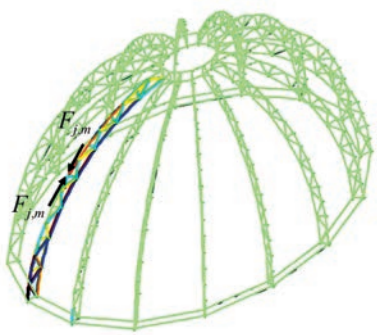


Рис. 6. Схема распределения начальных усилий при устранении меридиональных погрешностей

Силовое воздействие по нормальному и меридиональному направлениям не вызывают существенных усилий в кольцевых элементах, а приложение сил в кольцевом направлении вызывает усилия только в одном кольце, причем сравнительно большие. С целью улучшения цветового отображения мозаики начальных усилий в стержнях каркаса купола промежуточные кольца между опорным и верхним кольцами на рис. 4—6 условно не показаны.

Устранение относительных отклонений смежных узлов, размер которых ограничивался величиной $\delta = 2\sigma$ по результатам статистических исследований. Это потребовало приложения пар сил $F_{j,i}$ величинами 14, 25 и 52 кН для направлений *n*, *k*, *m*, соответственно, которые привели к возникновению усилий в стержнях каркаса купола разной величины. Максимальные значения начальных усилий в отдельных стержнях были равны 67, 16 и 105 кН, соответственно для направлений *n*, *k*, *m*. Из приведенных мозаик видно, что характер распределения начальных усилий по стержням купольного каркаса зависит от местоположения узла приложения пар сил $F_{j,i}$ и от вида устраняемых погрешностей по направлению.

Силовое устранение нормальных *n* погрешностей отражается как на стержнях меридионального ребра, к узлу которого прикладываются силы $F_{j,n}$, так и на стержнях соседних меридиональных ребер. Силовое устранение меридиональных *m* погрешностей отражается только на стержнях того меридионального ребра, к узлу которого прикладываются силы $F_{j,m}$. Устранение же кольцевых погрешностей *k* силами $F_{j,k}$ приводит к возникновению начальных усилий в стержнях многих меридиональных ребер купольного каркаса, а также усилия в данном конкретном кольце (на рис. 5 оно не показано), равного по величине приложенной паре сил.

Следует отметить, что необходимость силового устранения погрешностей может возникнуть в нескольких десятках узлов сопряжения конструктивных элементов купольного каркаса. При этом места расположения таких узлов могут быть случайным образом распределены по всему купольному каркасу, различаться видами погрешностей (отклонений) по направлению *n*, *k*, *m*, величинами и знаками отклонений. В связи с этим будут разными узлы и способ приложения к ним сил $F_{j,i}$, навстречу друг другу или в разные стороны, которые тоже имеют случайный характер.

Не выяснено пока, как на величины начальных усилий в стержнях влияют различные виды монтажной установки меридиональных ребер секторов, приложение в каких узлах одного и того же меридионального ребра сил $F_{j,i}$ и в какой последовательности будет приводить к уменьшению начальных усилий, характер и степень влияния возможных начальных усилий на усилия в стержнях каркаса купола от эксплуатационных нагрузок.

Перечисленные факторы требуют проведения дальнейшего всестороннего исследования зависимости начальных усилий в стержнях купольных каркасов из-за силового устранения погрешностей, в т.ч. и с учетом вероятности их появления в разных конструкциях.

Выводы: предлагаемая методика позволяет оценить начальные усилия в каркасах двухпоясных металлических куполов, вызванные силовым устранением возможных погрешностей их монтажа;

для определения величин начальных усилий в стержнях необходимо использование специальных компьютерных моделей каркасов металлических куполов, отражающих их состояние в процессе монтажа, и особенного силового воздействия на них;

достоверные сведения о возможных погрешностях монтажа или отклонениях узлов могут быть получены на основе компьютерного статистического моделирования монтажа купола методом Монте-Карло;

предлагаемая методика оценки начальных усилий в каркасах металлических куполов дает возможность своевременно изменить технологическое решение по способу их монтажа и технические решения о соединении конструкций в узлах для минимизации подгоночных операций;

учет возможных начальных усилий в каркасах двухпоясных большепролетных металлических куполов при проектировании реальных сооружений повысит их надежность;

необходимо проведение дальнейших исследований в этом направлении с целью выявления зависимостей начальных усилий в купольных каркасах от различных конструктивных и технологических факторов.

Библиографический список

1. *Беляев Б.И., Корниенко В.С.* Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения. М. : Стройиздат, 1968. 207 с.

2. *Добромыслов А.Н.* Ошибки проектирования строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2007. 184 с.

3. *Гроздов В.Т.* Дефекты строительных конструкций и их последствия. 3-е изд., испр. и доп. СПб. : Центр качества строительства, 2005. 136 с.

4. Характерные дефекты при возведении металлических конструкций // Стройконтроль : бюро независимых экспертиз. Режим доступа: http://www.stroycontrol.ru/content/view/14/37. Дата обращения: 20.02.2015.

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

6. Металлические конструкции (справочник проектировщика) / под ред. Н.П. Мельникова. М. : Стройиздат, 1980. 776 с.

7. *Мосягин Д.Л., Голованов В.А., Ильин Е.Г.* Фактические несовершенства формы поверхности купольных покрытий резервуаров объемом 50 000 м^3 // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 6. С. 30—32.

8. Офисно-гостиничный комплекс штаб-квартиры Национального олимпийского комитета в Минске планируется сдать в марте (ФОТО) // Архитектура и строительство : информационно-новостной портал. Режим доступа: http://arcp.by/ru/article/ofisno-gostinichnyy-kompleks-vozle-shtab-kvartiry-nok-v-minske-planiruetsya-sdat-v-marte. Дата обращения: 20.02.2015.

9. Компания Интерстиль приступила к монтажу горок в строящемся аквапарке в Донецке // Интерстиль. Режим доступа: http://interstyle.com.ua/news/kompaniya-interstit-pristupila-k-montazhu-gorok-v-stroyashhemsya-akvaparke-v-donetske. Дата обращения: 20.02.2015.

10. Учебно-тренировочный центр фристайла со спортивно-оздоровительным комплексом по ул. Сурганова // Минскпромстрой. Режим доступа: http://www.minskpromstroy.by/ru/our_facilities/admin_buildings/uchebno-trenirovochnyy-centr-fristayla-so-sportivno-ozdorovitelnym-kompleksom-po-ul-surganova.html. Дата обращения: 07.03.2015.

11. «Арена-Север» // Стальмонтаж. Режим доступа: http://www.stalmon.ru/nashi/57. Дата обращения: 07.03.2015.

12. *Лебедь Е.В*. Точность возведения стержневых пространственных металлических покрытий и ее прогнозирование // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2013. № 4. С. 5—12.

13. *Mukaiyama Youichi, Fujino Terumasa, Kuroiwa Yoshihiko, Ueki Takashi.* Erection Methods for Space Structures // Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures : Proc. of the Int. Ass. for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia, Spain, Universidad Politecnica de Valencia, 28 September — 2 October 2009. Pp. 1951—1962.

14. *Ищенко И.И.* Монтаж стальных и железобетонных конструкций. М. : Высш. шк., 1991. 287 с.

15. *Лебедь Е.В*. Особенности выполнения болтовых соединений конструкций двухпоясных металлических куполов из-за погрешностей их изготовления и монтажа // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2014. № 4. С. 90—97.

16. *Югов А.М., Бондарев А.Б.* Напряженно-деформированное состояние однопоясной стержневой металлической оболочки покрытия цилиндрической формы при наличии погрешностей изготовления и монтажа // Металлические конструкции. 2013. Т. 19. № 1. С. 27—36.

17. *Лебедь Е.В*. Компьютерное моделирование точности возведения двухпоясных металлических куполов // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 12. С. 89—92.

18. *Chandiwala Anuj*. 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. No. 3. Pp. 35—39. Режим доступа: http://www.slideshare.net/ijreteditor/analysis-and-design-of-steel-dome-using-software/.

19. *Jadhav H.S., Ajit S. Patil*. 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. No. 8. Pp. 110—118. Режим доступа: http://www.slideshare.net/ijsrneteditorial/parametric-study-of-double-layer-steel-dome-with-reference-to-span-to-height-ratio/.

20. *Chen W., Fu G., He Y*. Geometrically nonlinear stability performances for partial double layer reticulated steel structures // Proceedings of the Fifth International Conference on Space Structures on 19—21 august 2002. UK, Guildford, University of Surrey. London, 2002. Vol. 2. Pp. 957—966.

21. *Castano F., Hardy D*. World's largest aluminium domes // Proceedings of the Fifth International Conferehce on Space Structures on 19—21 august 2002. UK, Guildford, University of Surrey. London, 2002. Vol. 1. Pp. 227—233.

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

Поступила в редакцию в марте 2015 г.

Об авторах: **Лебедь Евгений Васильевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических конструкций, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (495) 287-49-14 вн. 30-53, evglebed@mail.ru;

Григорян Артем Акопович — аспирант кафедры металлических конструкций, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, tyom1990@inbox.ru.

Для цитирования: *Лебедь Е.В., Григорян А.А.* Начальные усилия в двухпоясных металлических куполах из-за погрешностей изготовления и монтажа их конструкций // Вестник МГСУ. 2015. № 4. С. 69—79.

E.V. Lebed, A.A. Grigoryan

INITIAL STRESSES IN TWO-LAYER METAL DOMES DUE TO IMPERFECTIONS OF THEIR PRODUCTION AND ASSEMBLAGE

The process of construction of two-layer metal domes is analyzed to illustrate the causes of initial stresses in the bars of their frames. It has been noticed that it is impossible to build such structures with ideal geometric parameters because of imperfections caused by objective reasons. These imperfections cause difficulties in the process of connection of the elements in the joints. The paper demonstrates the necessity of fitting operations during assemblage that involve force fitting and yield initial stresses due to imperfections. The authors propose a special method of computer modeling of enforced elimination of possible imperfections caused by assemblage process and further confirm the method by an analysis of a concrete metal dome.

Key words: metal domes, imperfections of assemblage, structural joints, fitting operations, displacements of joints, initial stresses.

References

1. Belyaev B.I., Kornienko V.S. *Prichiny avariy stal'nykh konstruktsiy i sposoby ikh ustraneniya* [Reasons for Accidents of Steel Structures and Methods of Their Elimination]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1968, 207 p. (In Russian)

2. Dobromyslov A.N. *Oshibki proektirovaniya stroitel'nykh konstruktsiy* [Errors of Building Structures Design]. Moscow, ASV Publ., 2007, 184 p. (In Russian)

3. Grozdov V.T. *Defekty stroitel'nykh konstruktsiy i ikh posledstviya* [Defects of Building Structures and Their Consequences]. 3rd edition. Saint Petersburg, Tsentr kachestva stroitel'stva Publ., 2005, 136 p. (In Russian)

4. Kharakternye defekty pri vozvedenii metallicheskikh konstruktsiy [Characteristic Defects at Metal Structures Erection]. *Stroykontrol' : byuro nezavisimykh ekspertiz* [Construction Control. Independent Expertise Bureau]. Available at: http://www.stroycontrol.ru/content/view/14/37. Date of access: 20.02.2015. (In Russian)

5. Tur V.I. *Kupol'nye konstruktsii: formoobrazovanie, raschet, konstruirovanie, povyshenie effektivnosti* [Dome Structures: Morphogenesis, Analysis, Design, Increase in Effectiveness]. Moscow, ASV Publ., 2004, 96 p. (In Russian)

6. Mel'nikov N.P., editor. *Metallicheskie konstruktsii (spravochnik proektirovshchiku)* [Metal Structures (Reference Book of a Designer)]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980, 776 p. (In Russian)

7. Mosyagin D.L., Golovanov V.A., Il'in E.G. Fakticheskie nesovershenstva formy poverkhnosti kupol'nykh pokrytiy rezervuarov ob''emom 50 000 m^3 [Actual Irregularities of Surface Shape of Domed Roofs for Tanks with a Capacity of 50 000 m^3]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2011, no. 6, pp. 30—32. (In Russian)

8. Ofisno-gostinichnyy kompleks shtab-kvartiry Natsional'nogo olimpiyskogo komiteta v Minske planiruetsya sdat' v marte (FOTO) [Hotel and Office Complex of National Olympic Committee Headquaters in Minsk is Planned to be Finished in March (FOTO)]. *Arkhitektura i stroitel'stvo : informatsionno-novostnoy portal* [Architecture and Construction : Information and News Portal]. Available at: http://arcp.by/ru/article/ofisno-gostinichnyy-kompleks-vozle-shtab-kvartiry-nok-v-minske-planiruetsya-sdat-v-marte. Date of access: 20.02.2015. (In Russian)

9. Kompaniya Interstil' pristupila k montazhu gorok v stroyashchemsya akvaparke v Donetske [Interstyle Company Began Building Water Slides in the Aqua park Beinf Built in Donetsk]. *Interstil'* [Interstyle]. Available at: http://interstyle.com.ua/news/kompaniya-interstit-pristupila-k-montazhu-gorok-v-stroyashhemsya-akvaparke-v-donetske. Date of access: 20.02.2015. (In Russian)

10. Uchebno-trenirovochnyy tsentr fristayla so sportivno-ozdorovitel'nym kompleksom po ul. Surganova [Freestyle Training Center with a Fitness Complex on Surganova Street]. *Minskpromstroy* [Minsk Industrial Construction]. Available at: http://www.minskpromstroy.by/ru/our_facilities/admin_buildings/uchebno-trenirovochnyy-centr-fristayla-so-sportivno-ozdorovitelnym-kompleksom-po-ul-surganova.html. Date of access: 07.03.2015. (In Russian)

11. *«Arena-Sever»* [Arena-North]. *Stal'montazh* [Steel Installing]. Available at: http://www.stalmon.ru/nashi/57. Date of access: 07.03.2015. (In Russian)

12. Lebed E.V. Tochnost' vozvedeniya sterzhnevykh prostranstvennykh metallicheskikh pokrytiy i ee prognozirovanie [Accuracy in Construction of Metal Space Framed Roofs and Its Predicting]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* [Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Investigations]. 2013, no. 4, pp. 5—12. (In Russian)

13. Mukaiyama Youichi, Fujino Terumasa, Kuroiwa Yoshihiko, Ueki Takashi. Erection Methods for Space Structures. Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. Proc. of the Int. Ass. for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia, Spain, Universidad Politecnica de Valencia, 28 September — 2 October 2009. Pp. 1951—1962.

14. Ishchenko I.I. *Montazh stal'nykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Installation of Steel and Reinforced Concrete Structures]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991, 287 p. (In Russian)

15. Lebed E.V. Osobennosti vypolneniya boltovykh soedineniy konstruktsiy dvukhpoyasnykh metallicheskikh kupolov iz-za pogreshnostey ikh izgotovleniya i montazha [Design Features of Bolted Connections of Structural Elements of Two-Layer Metal Domes Resulting from Errors of Their Fabrication and Assembly]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* [Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Investigations]. 2014, no. 4, pp. 90—97. (In Russian)

16. Yugov A.M., Bondarev A.B. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie odnopoyasnoy sterzhnevoy metallicheskoy obolochki pokrytiya tsilindricheskoy formy pri nalichii pogreshnostey izgotovleniya i montazha [Stress-Strain State Of A Single-Layer Lattice Metal Shell Of A Cylindrical Roof In The Presence Of Errors Of Fabrication And Assembly]. *Metallicheskie konstruktsii* [Metal Structures]. 2013, vol. 19, no. 1, pp. 27—36. (In Russian)

17. Lebed E.V. Komp'yuternoe modelirovanie tochnosti vozvedeniya dvukhpoyasnykh metallicheskikh kupolov [Computer Modeling of the Accuracy of Erection of Two-Layer Metal Domes]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2013, no. 12, pp. 89—92. (In Russian)

18. Chandiwala Anuj. 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, no. 3, pp. 35——39. Available at: http://www.slideshare.net/ijreteditor/analysis-and-design-of-steel-dome-using-software/.

19. Jadhav H.S., Ajit S. Patil. 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, no. 8, pp. 110—118. Available at: http://www.slideshare.net/ijsreteditorial/parametric-study-of-double-layer-steel-dome-with-reference-to-span-to-height-ratio/.

20. Chen W., Fu G., He Y. Geometrically Nonlinear Stability Performances for Partial Double Layer Reticulated Steel Structures. Proceedings of the Fifth International Conference on Space Structures on 19—21 august 2002. UK, Guildford, University of Surrey. London, 2002, vol. 2, pp. 957—966.

21. Castano F., Hardy D. World's Largest Aluminium Domes. Proceedings of the Fifth International Conferehce on Space Structures on 19—21 august 2002. UK, Guildford, University of Surrey. London, 2002, vol. 1, pp. 227——233.

22. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. *Komp'yuternye modeli konstruktsiy* [Computer Models of Structures]. Kiev, Fakt Publ., 2005, 344 p. (In Russian)

About the authors: **Lebed Evgeniy Vasil'evich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Metal Structures, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; +7 (495) 287-49-14 (ext. 30-53); evglebed@mail.ru;

Grigoryan Artem Akopovich — postgraduate student, Department of Metal Structures, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; tyom1990@inbox.ru.

For citation: Lebed E.V., Grigoryan A.A. Nachal'nye usiliya v dvukhpoyasnykh metallicheskikh kupolakh iz-za pogreshnostey izgotovleniya i montazha ikh konstruktsiy [Initial Stresses in Two-Layer Metal Domes Due to Imperfections of Their Production and Assemblage]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 4, pp. 69—79. (In Russian)