

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-2\(25\)-12-25](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-2(25)-12-25)  
УДК 624.074

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ: ИЗГОТОВЛЕНИЕ И МОНТАЖ

## MODERN SPATIAL METAL STRUCTURES: FABRICATION AND ERECTION

П. Г. ЕРЕМЕЕВ, д-р техн. наук, проф.

*Возрастающая потребность в сооружениях с большим внутренним пространством, свободным от промежуточных опор, для проведения массовых собраний, спортивных и культурных мероприятий, выставок и т.п. стала важным фактором развития пространственных конструкций. При определении целесообразности применения пространственных металлических конструкций по сравнению с другими системами и при выборе схемы покрытия существенным фактором является возможность их простого, быстрого и нетрудоемкого изготовления и монтажа. Представлены способы и особенности изготовления и монтажа современных стержневых пространственных систем (оболочек и куполов), вантовых, мембранных и комбинированных систем. Приведен анализ различных методов изготовления и монтажа пространственных металлических конструкций. Даны обоснование необходимости проведения научно-технического сопровождения (НТС) при изготовлении и монтаже конструкций, перечень основных задач НТС и методы их решения. Приведены основные результаты научного сопровождения изготовления и монтажа конструкций. Даны описание конструкций, оптимальные решения*

*The growing need for buildings with a large interior space free of intermediate supports for holding mass meetings, sports and cultural events, exhibitions, etc. became an important factor in the development of spatial structures. In determining the appropriateness of using spatial metal structures in comparison with other systems and when choosing a coating scheme, an essential factor is the possibility of simple, fast and labour-intensive manufacturing and installation. Ways and features of the manufacture and installation of modern rod spatial systems (shells and domes), cable-stayed, membrane and combined systems are presented. The analysis of various methods of manufacturing and installation of spatial metal structures are shown. Justification of the need for the scientific and technical support (STS) in the manufacture and installation of structures, a list of the main tasks of the STS and methods for solving them are given. The main results of scientific support for the manufacture and installation of structures are presented. A description of the structures, optimal solutions for their manufacture and installation, examples of constructed structures are given.*

по их изготовлению и монтажу, примеры построенных сооружений.

### Ключевые слова:

Изготовление пространственных металлических конструкций, монтаж пространственных металлических конструкций, пространственные металлические конструкции, научно-техническое сопровождение

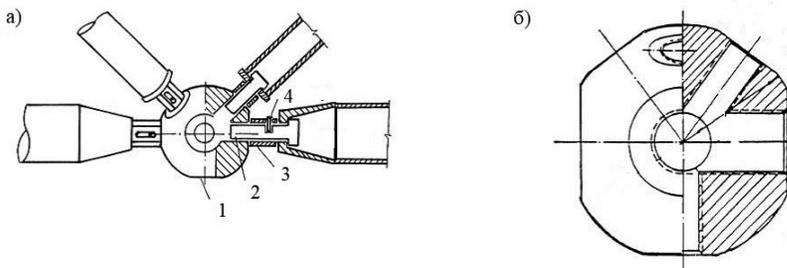
### Key words:

Installation of spatial metal structures, manufacturing of spatial metal structures, scientific and technical support, spatial metal structures

Возрастающая потребность в сооружениях с большим внутренним пространством, свободным от промежуточных опор, для проведения массовых собраний, спортивных и культурных мероприятий, выставок и т.п. стало важным фактором развития пространственных конструкций. При определении целесообразности применения пространственных конструкций по сравнению с другими системами и при выборе схемы покрытия существенным фактором является возможность их простого, быстрого и нетрудоёмкого изготовления и монтажа.

Способы изготовления и монтажа решаются на стадии разработки проекта на основании технико-экономического анализа вариантов в зависимости от типа конструкции, пролёта, очертания в плане, формы поверхности и т.д.

*Стержневые пространственные системы* в зависимости от метода монтажа изготавливают отдельными стержневыми и узловыми элементами, длинномерными стержнями или укрупненными элементами в виде пирамид, плоских или пространственных ферм, пространственных блоков [6, 12].



**Рис. 1.** Система «Меро». Конструктивная схема узла:

а – вертикальный разрез; б – горизонтальный разрез; 1 – узловый элемент; 2 – болт; 3 – втулка; 4 – штифт

Изготовление конструкций из короткомерных элементов определяется профилем стержней и конструкцией узловых элементов. Изготовление элементов стержневых систем из круглых труб типа «MERO» (рис. 1) включает непосредственно трубчатый элемент, к которому приваривается усеченный конус с болтом и ключевой муфтой. Узлами таких систем являются поковки в виде шаровидных элементов с резьбовыми отверстиями под соединительные болты. Допуск по длине стержневого элемента должен быть не более

0,3...0,9 мм в зависимости от типа узлового соединения. Отклонение от прямолинейности оси стержня не должно превышать 1,5 мм на 1 м длины или 1% от длины стержня. Стержневые конструкции, поставляемые укрупненными блоками, имеют менее жесткие требования к точности изготовления, чем системы из отдельных элементов, но при этом их сборку и сварку следует осуществлять в специальном кондукторе.

Монтаж структурных стержневых покрытий [6, 8] осуществляют навесной сборкой; сборкой на проектной отметке на подмостях; полностью собранными на земле плитами покрытия или укрупненными блоками с последующим подъемом на проектную отметку.

Выбор метода монтажа стержневых оболочек обусловлен размерами их в плане, с учетом радиуса действия монтажных кранов. Возможные методы монтажа [8, 12]:

- сборка оболочки из отдельных стержней на проектной отметке на подмостях;
- монтаж стержневой оболочки методом надвижки;
- монтаж укрупненными блоками, собранными на уровне земли, с использованием временных монтажных опор. Этот метод применим для двухслойных стержневых оболочек, так как несущая способность и жесткость блока сохраняется после разрезки оболочки на отдельные фрагменты. Размер блоков зависит от пролета оболочки и от грузоподъемности кранов;
- монтаж стержневой оболочки на уровне земли в кондукторе (стенде) с последующим подъемом, применяя спаренную работу монтажных кранов или гидравлические подъемники.

В первых двух вариантах предусматривается раскручивание путем опускания винтовых или гидравлических домкратов, включенных в стойки подмостей или опоры кондуктора. Примеры монтажа пространственных стержневых оболочек приведены на рис. 2.

а)



б)

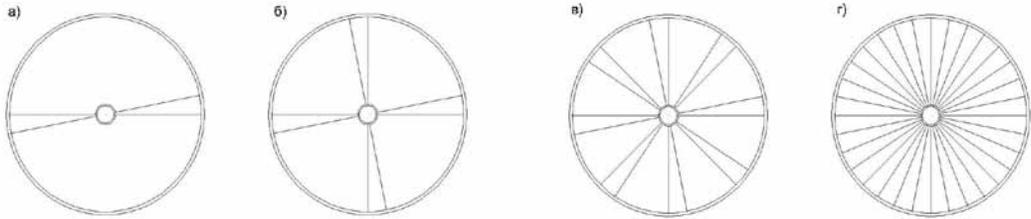


**Рис.2.** Примеры монтажа пространственных стержневых оболочек:

а — с использованием гидравлических подъемников; б — с использованием монтажных кранов

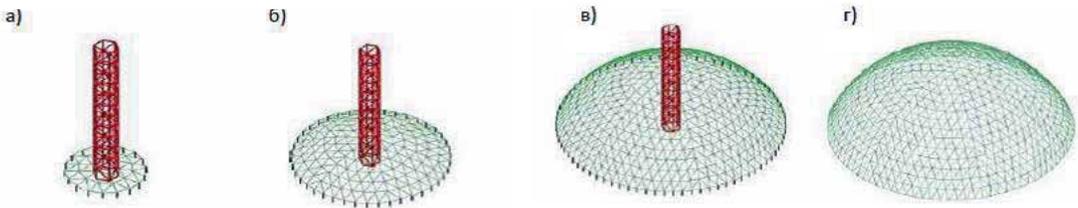
*Купольные системы.* При радиальной разрезке купола монтаж ведут с применением центральной временной опоры, на которой размещают верхнее опорное кольцо. Укрупненные полуарки (при необходимости — спаренные) устанавливают попарно симметрично, опирая на верхнее кольцо и наружный опорный контур, равномерно образуя всю поверхность купола. Если в большепролетных куполах по условиям грузоподъемности монтажных кранов целиком ребро поднять невозможно, используют временные промежуточные

опоры. Ребра монтируют в определенной последовательности для исключения односторонней нагрузки на центральную временную опору: устанавливают одну полуарку против другой, затем две другие по диаметру в перпендикулярном направлении. Далее в каждом из четырех секторов последовательно монтируют по одной полуарке, равномерно заполняя всю площадь купола (рис. 3). После монтажа всех конструктивных элементов купола выполняют его раскручивание равномерным опусканием с помощью домкратов или песочниц, установленных на центральной монтажной опоре.



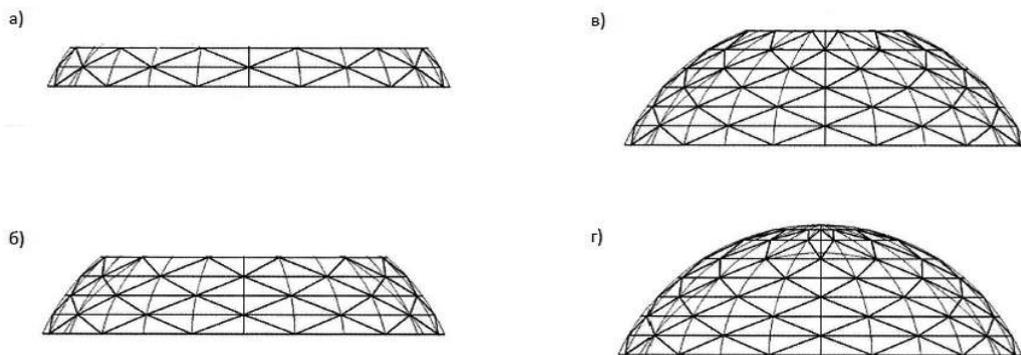
**Рис.3.** Схема монтажа ребристого купола. а, б, в, г – этапы монтажа

Сетчатые купола монтируют на подмостях поэлементно или укрупненными блоками, с использованием временных монтажных опор. Монтаж сетчатых куполов возможен методом подращивания [4, 7] (рис. 4). Преимущество этого метода — сохранение устойчивости купола на всех этапах монтажа; недостаток — необходимость применения кранов большой грузоподъемности для подъема целиком укрупненных кольцевых блоков купола.



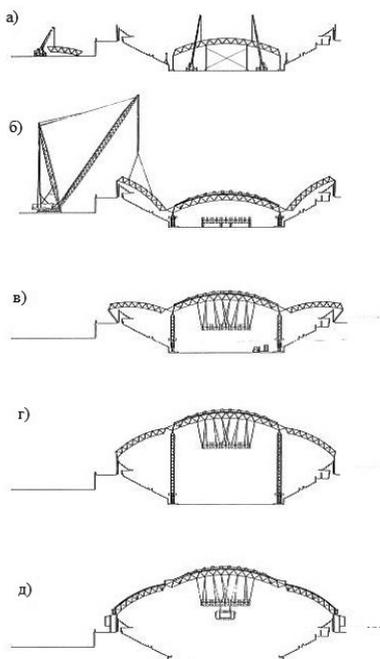
**Рис.4.** Схема монтажа сетчатого купола методом подращивания: а, б, в, г – этапы монтажа

Для пролетов свыше 150 м рационален навесной монтаж без промежуточных опор [7], от периметра к центру, с последовательной установкой крупных блоков одного яруса, который является основой сборки следующего яруса (рис. 5). Преимущества этого метода — отсутствие необходимости применения кранов большой грузоподъемности; недостатки — необходимость обеспечения устойчивости смонтированной части купола из-за отсутствия срединной его части. Поэтому в процессе монтажа необходимо строго следить за геометрией и напряженным состоянием всех основных несущих конструктивных элементов купола. Это можно осуществить только с помощью современных компьютерных средств с соответствующим программным обеспечением. При выявлении натурными геодезическими замерами отклонений, превышающих допустимые величины, необходимо выполнять корректировку геометрии следующего яруса монтируемой части купола.

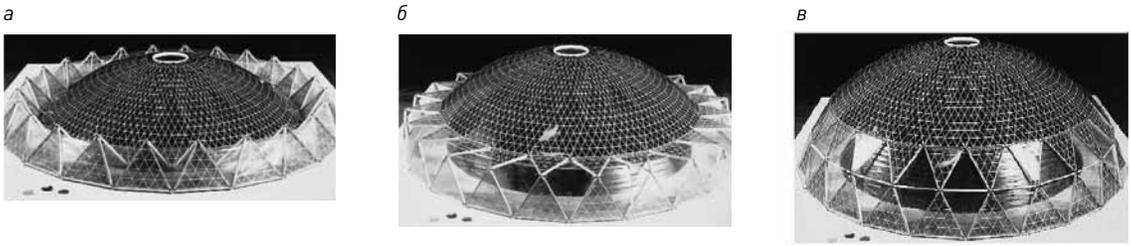


**Рис.5.** Схема монтажа сетчатого купола навесным методом: а, б, в, г – этапы монтажа

Оригинальный способ монтажа купольных стержневых оболочек методом наращивания и подъема (Pantadome System) предложен и реализован на ряде объектов в Японии и других странах [11]. Последовательность возведения показана на рис. 6. Вначале монтируется центральная часть покрытия на временных опорах (рис. 6, а). По периметру смонтированной части покрытия на временных колоннах, оборудованных домкратами, собирают стержневые блоки, которые шарнирно соединяют с центральной частью конструкции (рис. 6, б). Затем центральная часть покрытия перемещается с помощью домкратов в проектное положение (рис. 6 в, г, д). На последнем этапе монтажа в зазорах по периметру блоков монтируют недостающие стержни, блокирующие шарниры и завершающие пространственную конструкцию купола. На рис. 7 представлена 3D-модель этого процесса монтажа [8].



**Рис.6.** Схема монтажа стержневой оболочки методом наращивания и подъема (Pantadome System): а, б, в, г, д – этапы монтажа

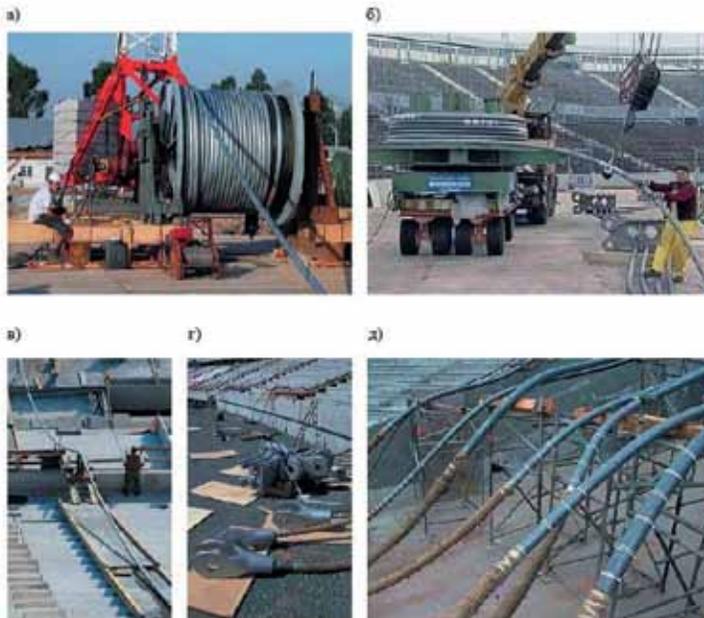


**Рис.7.** 3D-модель процесса монтажа методом Pantadome System. а, б, в – этапы монтажа

*Вантовые (висячие) системы.* Элементы вантовых систем изготавливают, как правило, на заводе и поставляют на монтажную площадку в бухтах или на барабанах диаметром в 50 - 100 раз больше диаметра каната, чтобы их не повредить. Монтаж начинают с контурных конструкций (при их наличии) укрупненными элементами последовательно по периметру сооружения. Вытягивание каната с барабана выполняют гидравлическим устройством или лебедкой. При этом тросы не должны скручиваться (для контроля на поверхность троса наносится продольная линия), а радиус изгиба троса должен быть  $R > 15d$ , где  $d$  — диаметр троса. Этапы разворачивания каната троса с катушки и варианты подъема троса в проектное положение [13] показаны на рис. 8 и 9.

Монтаж элементов вантовых покрытий производят кранами с применением специальных временных опор и других приспособлений. После монтажа вант производят их предварительное напряжение с последующим геодезическим контролем формы покрытия.

Последовательность монтажа однослойных вантовых покрытий: раскладка канатов на земле и затяжка их в анкерные отверстия гидравлическими домкратами или электрическими лебедками.



**Рис.8.** Этапы разворачивания каната с катушки на стройплощадке. а - д – этапы монтажа



Рис.9. Этапы подъема троса в проектное положение

Последовательность монтажа двухъярусного вантового покрытия на круглом плане (рис. 10):

- монтаж центрального барабана на временной опоре;
- изготовление, подъем и установка вантовых полуферм;
- натяжение вантовой системы. Одновременное предварительное натяжение всех вант можно выполнить раздвижкой колец центрального барабана;
- раскружаливание и демонтаж временной опоры.

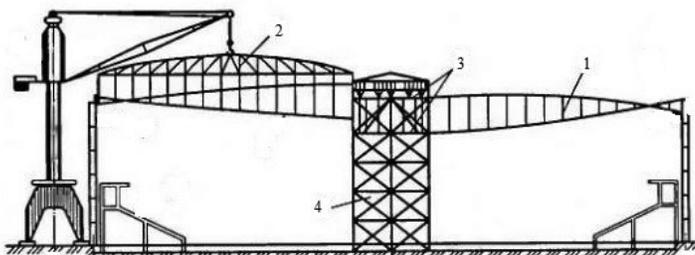


Рис.10. Схема монтажа двухслойных вантовых покрытий: 1 - вантовая ферма; 2 — траверса; 3 — центральный барабан; 4 монтажная опора

Последовательность монтажа вантовых сетей:

- трос поднимают в проектное положение с помощью лебедки или траверсы, затягивают в анкерное устройство и закрепляют в опорном элементе;
- после установки всех несущих тросов одного направления производят геодезическую проверку положения точек вантовой сети. Положение тросов корректируют подтяжкой их натяжными ключами или домкратами;
- устанавливают ортогонально расположенные стабилизирующие тросы, временно закрепляют места их пересечения;
- выполняют поэтапное предварительное натяжение тросовой сетки. Окончательное закрепление выполняют после монтажа и предварительного напряжения всей системы.

Последовательность монтажа [11, 13] вантового покрытия типа «велосипедное колесо» (рис. 11):

- монтаж наружного контура на проектной отметке;
- сборка на уровне земли на временных опорах внутреннего кольца;
- раскладка на направляющих мостках элементов радиальных вант. Установка сжимов по заводской маркировке на верхних и нижних радиальных тросах;
- соединение радиальных вант с внутренним кольцом и наружным контуром;
- компоновка и сборка остальных элементов вантовой конструкции (второй пояс, подвески, распорки или раскосы);
- подъем одновременно всех радиальных вантовых ферм и центрального растянутого кольца (рис. 12);
- синхронное предварительное натяжение системы гидравлическими домкратами, установленными на наружном контуре, начиная с несущих радиальных тросов;
- монтаж ограждающих конструкций кровли.



**Рис.11.** Схема монтажа вантового покрытия типа «велосипедное колесо»: *а-в* — этапы монтажа; 1 – наружный опорный контур; 2 – внутреннее растянутое кольцо; 3 – элементы радиальных вант

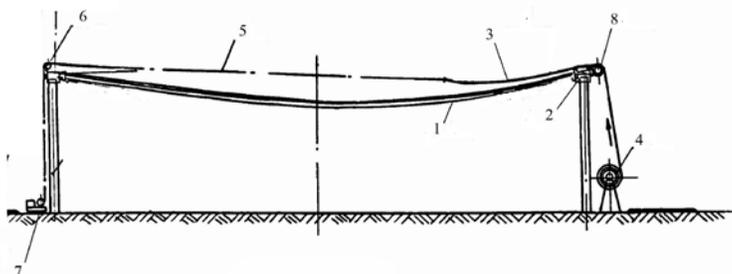


**Рис.12.** Подъем вантового покрытия типа «велосипедное колесо»

*Тонколистовые пространственные системы.* Для пролетной конструкции висячих мембранных покрытий используют тонколистовые полотнища заводского изготовления, сворачиваемые в рулоны. Рулонные полотнища толщиной от 4 мм и более изготавливают из отдельных листов (1,50 × 6,0 м), свариваемых встык на специальных установках, на заводах, изготавливающих резервуарные конструкции (рис. 13). Стыковые сварные швы должны обладать той же прочностью, что и основной металл. Монтаж висячих мембранных покрытий можно выполнять как на проектной отметке, так и на земле с последующим подъемом. Для монтажа круглых (овальных) в плане оболочек устанавливают центральную опору. Монтаж пролетной конструкции с заданной стрелой провиса осуществляют на проектной отметке, в основном — навесным способом, раскаткой (укладкой) полотнищ мембраны по системе монтажных элементов («постель»). Раскатку свернутых в рулон на барабан полотнищ мембраны по монтажной «постели» (рис. 14) проводят лебедками [6]. Барабан устанавливают на контуре или на земле за пределами сооружения. В последнем случае на контур устанавливают катушку для плавного перегиба полотнища при его вытягивании на покрытие. При монтаже покрытия следует учитывать, что в контуре, еще не связанном сплошной мембраной, могут возникать значительные изгибающие моменты, превышающие соответствующие величины от эксплуатационных нагрузок. Для предотвращения этого следует правильно выбирать порядок монтажа и количество одновременно устанавливаемых элементов пролетной конструкции.



**Рис.13.** Установка для изготовления рулонных полотнищ

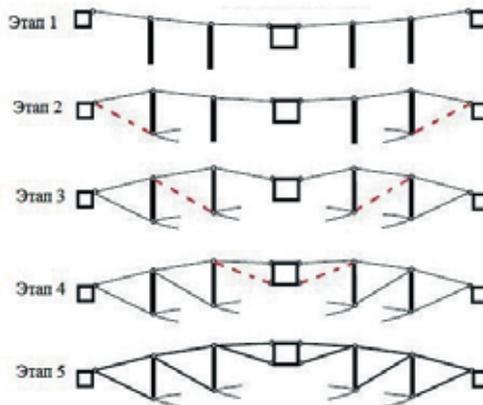


**Рис.14.** Схема навесного способа монтажа мембранного покрытия: 1 — направляющие элементы «постели»; 2 — опорный контур; 3 — разворачиваемое полотнище мембраны; 4 — барабан с рулоном; 5 — канат; 6 — отводной блок; 7 — лебедка; 8 — катушка

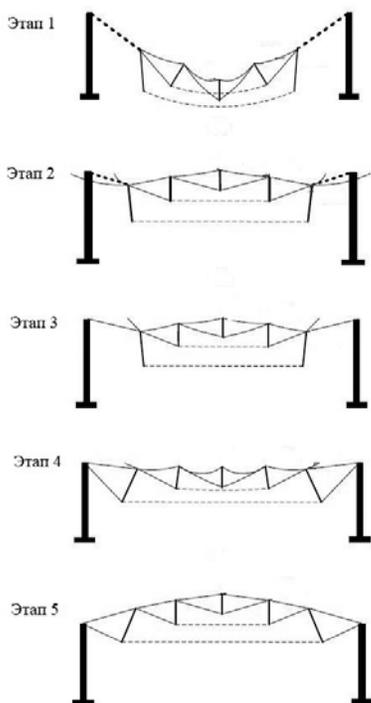
Первоначально плоские мембранные покрытия собирают на спланированной площадке на уровне земли или на проектной отметке на подмостях. После закрепления мембраны к контуру производят подъем покрытия с помощью домкратов, подъемников, монтажных мачт и т.п., или раскружаливание подмостей.

*Комбинированные системы.* Монтаж куполов системы «Tensegrity» в значительной степени зависит от точности размеров изготовленных элементов и величины их предварительного напряжения, а также от правильной последовательности сборки конструкции. Монтаж таких конструкций составляет приблизительно 40% общей стоимости проекта [9, 14]. Разработано несколько вариантов монтажа. В первом варианте (рис. 15) сначала поднимают верхние радиальные элементы, к которым подвешивают ряды вертикальных стоек (этап 1). Затем подвешивают и натягивают диагональные элементы, прикрепленные к наружному контуру и к основанию распорок внешнего ряда, подтягивая первое нижнее растянутое вантовое кольцо в проектное положение (этап 2). Далее процесс повторяется последовательно по кольцам от периметра к центру добавлением колец и диагоналей с последующим их предварительным напряжением до полной сборки конструкции (этапы 3, 4, 5). Во втором варианте все элементы системы собирают полностью на уровне земли. Затем вантовую сеть поднимают до проектного положения, несколькими этапами притягивая ее к наружному контуру. Последовательность монтажа по третьему варианту от центра к наружному контуру показана на рис. 16. После монтажа систему дополнительно преднапрягают для проектного восприятия внешних нагрузок.

Большое число разнообразных, отличающихся друг от друга типов комбинированных систем не позволяет обобщить требования к их изготовлению и монтажу. Подробное описание конструкций и примеры их изготовления и монтажа приведены в [1]. К ним относятся изготовление и монтаж конструкций покрытия «Старого Гостиного двора» [2], московского стадиона «Локомотив» [3], конструкций ККЦ в Крылатском [5], стадиона в Краснодаре [11], футбольно-легкоатлетического манежа в г. Казани, футбольных стадионов, построенных к ЧМ 2018 в Самаре, Саранске, Нижнем Новгороде, Волгограде, Ростове-на-Дону, Калининграде и др.



**Рис.15.** Этапы первого варианта монтажа Tensegrity-систем.  
Пунктиром показаны предварительно напрягаемые диагональные элементы



**Рис.16.** Этапы третьего варианта монтажа Tensegrity-систем

В соответствии с требованием п. 3.3 СП 53-101-98 «Изготовление и контроль качества стальных строительных конструкций» и п. 9.5 ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету», для уникальных объектов с повышенным уровнем ответственности необходимо научно-техническое сопровождение, задачами которого являются:

- разработка «Технических условий на изготовление, монтаж и приёмку металлоконструкций», содержащих требования, не входящие в действующие нормативно-технические документы, или регламентирующих более высокие требования (основные положения показателей качества конструкций и применяемых материалов, а также методы их контроля и приемки);
- консультативное участие в разработке проекта производства работ (ППР), с учетом исследований вопросов точности изготовления и сборки металлических элементов и влиянием этих параметров на работу конструкций;
- разработка рекомендаций и предложений по совершенствованию и корректировке технологии изготовления и монтажа несущих конструкций, требований к сварным и болтовым соединениям;
- участие в выборе заводов-изготовителей и организаций по монтажу и возведению конструкций;
- рассмотрение и согласование проекта производства сварочных работ (ППСР), рекомендаций по выполнению болтовых и других видов соединений;

- разработка рекомендаций по выборочному контролю качества материалов, соединений, крепежных элементов;
- участие в проведении технического контроля, выполнение анализа и подготовка заключения о качестве проката и применяемых материалов;
- разработка дополнительных требований по приемке смонтированных конструкций при отсутствии соответствующих требований в нормах на монтаж и изготовление конструкций;
- участие в техническом контроле качества и приёмки металлоконструкций при их изготовлении и укрупнительной сборке на заводе-изготовителе;
- участие в выборочном входном контроле качества материалов и конструкций на строительной площадке, в выполнении контрольных испытаний материалов, соединений, крепежных элементов;
- участие в проведении контроля и в приемке металлоконструкций при их монтаже, в оценке соответствия выполняемых монтажных работ проектным решениям, нормативным требованиям и ППР;
- испытание и сертификация изделий зарубежной поставки (при необходимости);
- научно-техническая помощь в разработке мероприятий по устранению дефектов изготовления и монтажа несущих конструкций;
- оценка пригодности конструкций, обоснованной соответствующими расчетами и дополнениями к проектной документации (совместно с проектной организацией) при выявлении отклонений от проектных решений и/или от норм на изготовление и монтаж конструкций, составление рекомендаций для выполнения таких расчетов);
- обеспечение безопасности сооружений путем проведения натуральных наблюдений, анализа и обобщения данных мониторинга при монтаже металлоконструкций и последующей его эксплуатации;
- анализ результатов научно-технического контроля изготовления, монтажа и приёмки конструкций, с выводами о соответствии нормам, проекту и «Техническим условиям»; анализ и оценка геометрии пространственной системы смонтированных металлоконструкций относительно заданных проектом предельных допусков, на основании исполнительных геодезических схем.

## **Выводы**

1. Представлены способы и особенности изготовления и монтажа современных стержневых пространственных систем (оболочек и куполов), вантовых, мембранных и комбинированных систем.

2. При определении целесообразности применения пространственных металлических конструкций по сравнению с другими системами и при выборе схемы покрытия необходим анализ вариантов изготовления и монтажа системы с технико-экономическим обоснованием возможности простого, быстрого и нетрудоемкого изготовления и монтажа.

3. Для уникальных объектов с повышенным уровнем ответственности при изготовлении и монтаже пространственных металлических конструкций покрытий необходимо научно-техническое сопровождение в соответствии с нормативными требованиями.

4. Научно-техническое сопровождение строительства включает комплекс работ науч-

но-методического, экспертно-контрольного, информационно-аналитического и организационного характера для обеспечения надежности (безопасности, функциональной пригодности и долговечности) сооружений.

## Библиографический список

1. *Еремеев П.Г.* Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений. М.: Изд-во АСВ, 2009. -336 с.
2. *Еремеев П.Г., Канчели Н.В.* Большепролетное светопрозрачное покрытие Гостиного двора в Москве. // Монтажные и специальные работы в строительстве. 1998. № 7-8. - С. 42-46.
3. *Еремеев П.Г., Киселев Д.Б., Савельев В.А.* Стальные несущие конструкции покрытия над трибунами стадиона "Локомотив". // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2002. № 8. (специальный выпуск). – С. 7-13.
4. *Лебедь Е.В., Алукаев А.Ю.* Большепролетные металлические купольные покрытия и их возведение. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений». 2018. Т. 14. No 1. С. 4-16.
5. Монтажные и специальные работы в строительстве. 2005. № 3. (специальный выпуск).
6. *Трофимов В.И., Каминский А.М.* Лёгкие металлические конструкции зданий и сооружений. М.: Изд-во АСВ, 2002. – 573 с.
7. *Осипова А. В.* Работа сетчатого купола при монтаже навесным способом. // Молодой ученый. 2018. № 20. С. 162-164.
8. *Chilton J.* Space Grid Structures. Design and construction Architectural Press. London. 2000. -180 p.
9. *Deifeld T.E.C., Pauletti R.M.O.* Numerical Simulation of the Assembling of Tensegrity Domes. Proceedings of the XXVI Iberian Latin-American Congress. Brazil. CILAMCE. - 2005.
10. *Lázaro C., Domingo A.* Detailing and Construction of the Pantadome Roof Structure for a Bullring in Xàtiva (Spain). International Journal of Space Structures 25(4), December 2010. — Pp. 229-241.
11. *Lombardina D., Geyera S.* Cable Erection of Krasnodar Stadium Suspended Roof. // Procedia Engineering. December 2016. -pp 407-415.
12. *Mukaiyama Y., Fujino T., Kuroiwa Y., Ueki T.* Erection Methods for Space Structures. // Proceedings of the IASS Symposium, Valencia, 2009. Pp 1951-1962.
13. *Seidel M.* Tensile surface structures: a practical guide to cable and membrane construction. Berlin: Ernst & Sohn. 2009. 199 p.
14. *Zhang A., Sun C., Iang Z.* Experimental study on the construction shape-forming process and static behaviour of a double strut cable dome. // Journal of Zhejiang University-SCIENCE. 2018. № 19(3). Pp. 225-239.

## Автор

Павел Георгиевич ЕРЕМЕЕВ, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник лаборатории металлических конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Pavel YEREMEYEV, D. Sci. (Engineering), Full Professor, Chief Researcher of Steel structures laboratory, TSNIISK named after V.A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: [eremeevpg@rambler.ru](mailto:eremeevpg@rambler.ru)

тел.: +7 (499) 174-73-25