

ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ДВУХПОЯСНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КУПОЛОВ ИЗ-ЗА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МОНТАЖА

Е.В. Лебедь

Кафедра металлических конструкций
Московский государственный строительный университет
Ярославское шоссе, 26, Москва, Россия, 129337

Описана зависимость возникающих в конструкциях каркасов двухпоясных металлических куполов погрешностей от неточностей действительных геометрических размеров монтажных элементов. Показано, как погрешности отражаются на болтовых соединениях отдельных конструктивных элементов в узлах каркаса. Дана оценка влияния погрешностей на собираемость каркасов и связаных с нею подгоночных операций. Отмечены особенности различных способов монтажа каркасов металлических куполов. Приведены результаты статистических исследований возможных зазоров в узлах.

Ключевые слова: металлический купол, погрешность возведения, соединения конструкций, подгоночные операции, зазоры в узлах.

Двухпоясные металлические купола характеризуются большими пролетами и множеством конструктивных элементов. Их каркасы представляют собой пространственные многократно статически неопределимые стержневые системы. Возводятся они из большого количества монтажных элементов разных форм и размеров, которые представляют собой плоские или объемные стержневые конструкции.

При строительстве большепролетных двухпоясных металлических куполов применяются различные способы монтажа, которые зависят как от геометрической схемы каркасов, так и от их конструктивного решения. Например, для ребристого кольцевого купола, изображенного на рис. 1, наиболее распространены следующие виды монтажа [1; 2]:

— плоскими меридиональными ребрами в виде решетчатых полуарок полигонального очертания, предварительно собранных на земле из отдельных плоских стержневых конструкций (рис. 1, *а*);

— объемными монтажными блоками размерами в границах ячеек поясных сеток, которые также собирают на строительной площадке из отдельных стержневых конструкций (рис. 1, *б*);

— секториальными объемными частями, образованными соединением друг с другом соседних плоских меридиональных ребер кольцевыми элементами купола или предварительно собранными из объемных монтажных блоков по меридиональному направлению (рис. 1, *в*).

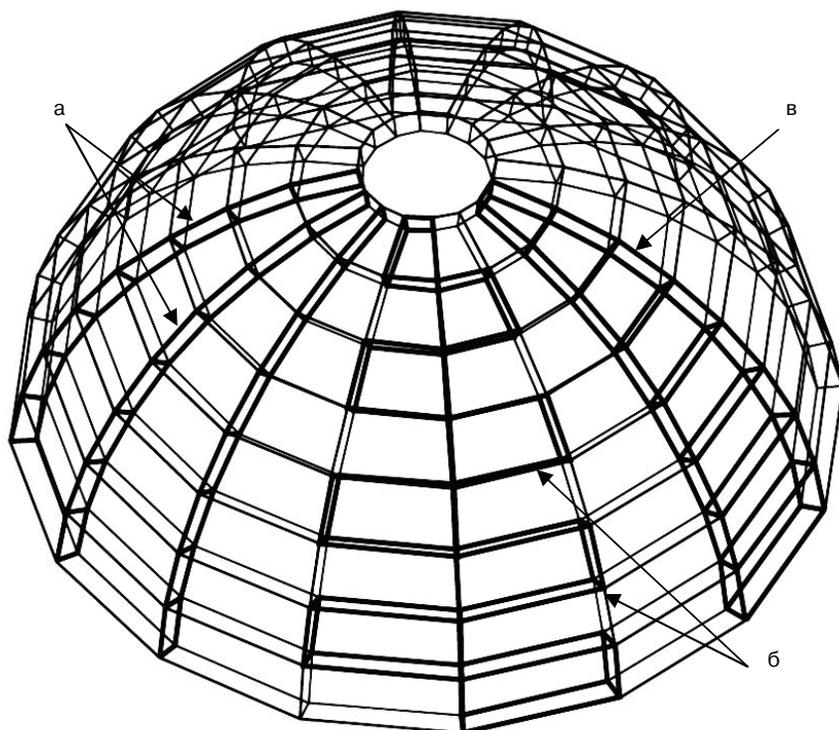


Рис. 1. Каркасы стержневых пространственных металлических покрытий:
а — плоские ребра; б — монтажные блоки; в — объемный сектор

При всех способах монтажа крупные каркасные элементы куполов собираются из отдельных плоских стержневых конструкций. Фактические или действительные размеры отдельных конструкций всегда будут отличаться от проектных значений на величины погрешностей, ограниченные соответствующими допусками. Из-за случайного характера действительного размера каждой конструкции вследствие накопления погрешностей всех составляющих элементов фактические размеры и геометрическая форма монтажных элементов, блоков и частей каркаса купола будут разными. Это отражается на их собираемости в единый конструктивный каркас купола.

Погрешности в размерах и геометрической форме монтируемых конструкций накладывают на их сопряжения определенные особенности, связанные с конструктивными трудностями выполнения болтовых соединений. Это объясняется тем, что некоторые группы отверстий в соединяемых элементах смещаются относительно друг друга и установка болтов в отверстия между соединяемыми элементами становится проблематичной.

Если каркас собирается из отдельных стержней в виде парных уголков с предварительным укрупнением в плоские или объемные элементы, то для их соединения применяются перекрестные фасонки. Положение отверстий в уголках по некоторым направлениям стержней каркаса не будут совпадать с положением отверстий в фасонках (рис. 2). Это объясняется тем, что пространственное положение каждой перекрестной фасонки фиксируется тремя стержнями, не расположенными

в одной плоскости. Максимальное же число стержней, соединяемых одним узлом, равно девяти, минимальное — пяти. Если предположить, что после фиксации более сложного узла верхнего пояса с него начинается установка других стержней, то как минимум три стержня из девяти будут устанавливаться со смещенными относительно фасонки отверстиями. А в противоположном узле нижнего пояса купольного каркаса два стержня будут устанавливаться со смещенными отверстиями. И наоборот — если узлы нижнего пояса будут сложнее узлов верхнего.

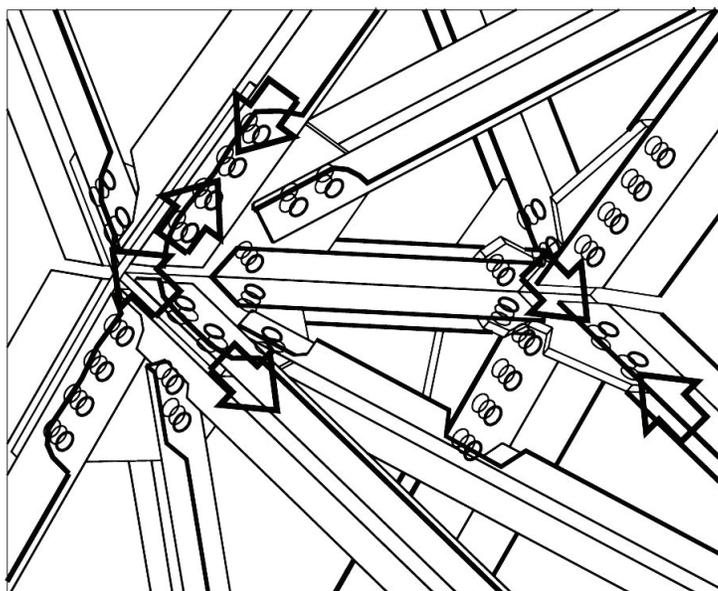


Рис. 2. Соединение стержней из парных уголков к перекрестным фасонкам (стрелками показаны необходимые смещения для постановки болтов)

Если каркас купола возводится из объемных монтажных блоков, изготовленных из уголков с применением сварки, то группы отверстий в уголках некоторых узлов соседних блоков по своему положению также не будут совпадать друг с другом (рис. 3), причем отверстия будут смещаться не только по направлениям стержней, но и в поперечных направлениях, увеличивающих зазоры между соединяемыми блоками. Это связано с тем, что длины уголков разных блоков не будут одинаковыми, а действительная форма каждого монтажного блока как пространственного многогранника будет отличаться от проектной различным образом.

Смещенные отверстия в соединяемых элементах разных конструкций не позволяют свободно установить болты, что затрудняет собираемость каркаса. Для решения этой задачи приходится прибегать к взаимному противоположенному смещению соединяемых элементов так, чтобы отверстия разных конструкций совпали друг с другом. На рис. 2, 3 стрелками показаны требуемые направления смещений для конкретных примеров. Выполнение таких операций при соединении конструкций называется подгонкой.

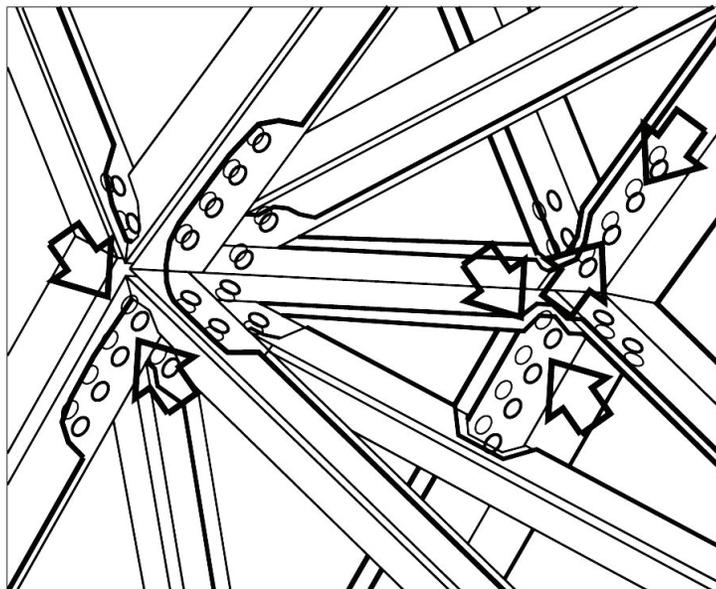


Рис. 3. Соединение сварных монтажных блоков из уголков друг с другом (стрелками показаны необходимые смещения для постановки болтов)

Для совмещения отверстий в соединениях по направлениям стержней используют специальные проходные оправки [3], которые представляют собой круглые стержни с конической поверхностью по большей части длины. Забивая оправку в одно из отверстий, путем сдвига соединяемых элементов добиваются совмещения остальных отверстий. После установки болтов в свободные отверстия и закручивания гаек оправку выбивают и устанавливают недостающий болт. Для сближения соединяемых элементов, между которыми образовались зазоры, их стягивают установленными в отверстия болтами. Для раздвижки соединяемых элементов, например, чтобы установить прокладки, в зазоры забивают плоские клинья. Такие приемы насильственного совмещения соединяемых элементов удлиняют одни стержни и укорачивают другие, что вызывает появление в них соответственно растягивающих и сжимающих усилий, которые называют начальными.

Для оценки возможных погрешностей в соединениях по авторской компьютерной программе MONTAG [4] были вычислены вероятные смещения в узлах ребристо-кольцевого купола, показанного на рис. 1. Каркас купола сферический с радиусом кривизны 48 м, диаметр опорного кольца 96 м, расстояние между кольцами по меридиану 8 м, расстояние между поясами 3 м. Размеры ячеек в кольцевом направлении переменны — 19,3, 18,8, 17,8, 16,3, 14,3, 12,0, 9,3, 6,3 и 3,2 м.

Рассматривался монтаж купола с временной центральной опорой под верхним кольцом. Предполагалось, что монтаж каркаса купола осуществляется секториальными объемными частями, которые устанавливаются внизу на опорное (нижнее) кольцо и вверху на центральную опору. Сектора собирались из стержневых объемных блоков в границах ячеек сеток, образованными верхними и нижними поясами ребер и колец [5]. Точность размеров монтажных блоков принималась в соответствии с 1-м классом точности по ГОСТ 23118-2012 «Конструкции сталь-

ные строительные. Общие технические условия». Действительные размеры блоков ограничивались допускаемыми отклонениями от ± 4 мм у нижнего кольца до ± 2 мм — у верхнего, которые соответствовали случайным величинам с нормальным законом распределения, не превышающим $\pm 3\sigma(\Delta L_i)$.

Исследовались разности отклонений одних и тех же узлов каркаса купола в нормальном, кольцевом и меридиональном направлениях от нижнего кольца 1 до верхнего 9 (рис. 4). Эти разности эквивалентны возможным зазорам в узлах δ_j , за исключением того, что в отличие от реальных зазоров они могли быть как положительными, так и отрицательными.

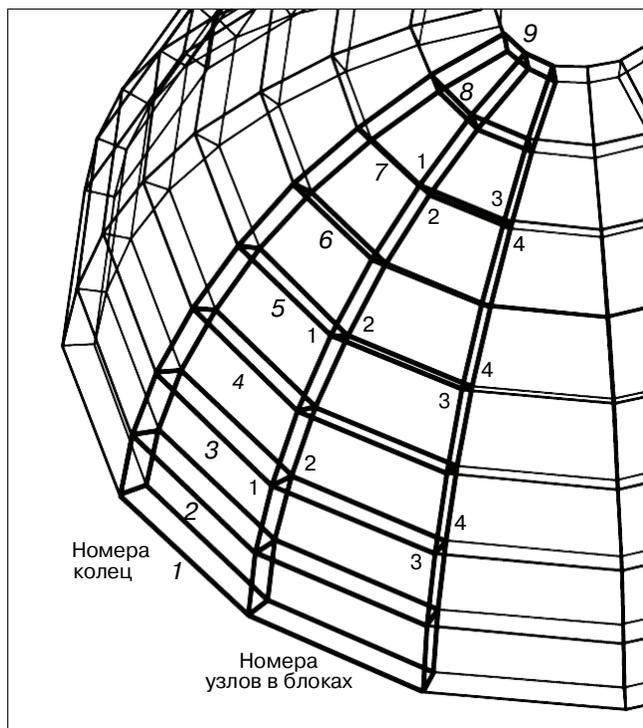


Рис. 4. Схема расположения исследуемых узлов каркаса купола

Предметом исследования служили два вида зазоров:

- 1) зазоры между соединяемыми друг с другом монтажными блоками;
- 2) зазоры между соседними секториальными объемными частями.

Была выполнена статистическая оценка зазоров по математическим ожиданиям $m(\delta_j)$ и среднеквадратическим отклонениям $\sigma(\delta_j)$ на основе 2000 компьютерных построений. Поскольку отклонения характеризуются нормальным законом распределения, то и распределение зазоров тоже будет нормальным. Математические ожидания исследуемых зазоров близки к нулю. Максимальные зазоры с уровнем надежности 0,9973 не будут превышать предельной величины $[\delta_j] = 3\sigma(\delta_j)$.

Графики предельных величин зазоров первого вида в узлах каркаса купола (от 1-го до 9-го кольца) представлены на рис. 5—7. Они показывают, что даже при соединении блоков друг с другом могут возникнуть затруднения, которые

приведут к необходимости силовой подгонки. Отсутствие зазоров в узлах блоков с номером 1 связано с тем, что эти узлы совмещаются друг с другом точно. Относительно небольшие зазоры в узлах 2 и 3 связаны с тем, что они совмещаются с ребром 1, 3 и гранью узлов 1, 3, 2 смежного блока [5]. Большие меридиональные зазоры в узлах с номером 4 объясняются тем, что только три узла из четырех могут быть совмещены с плоскостью (гранью блока), а четвертый узел всегда будет отклоняться от нее.

Графики предельных величин зазоров второго вида в узлах верхнего и нижнего поясов какого-либо меридионального ребра между соседними секторами каркаса представлены на рис. 8. Они свидетельствуют о том, что при монтаже купола секториальными объемными частями между узлами смежных меридиональных ребер появятся существенные зазоры. При этом разделение графиков кольцевых зазоров показывает нарушение вертикальности ребра. Соединение узлов смежных секторов будет связано с обязательным применением силовых способов подгонки, причем подгонка будет осложнена необходимостью смещения узлов в нормальном, кольцевом и меридиональном направлениях.



Рис. 5. Графики предельных нормальных зазоров в соединяемых узлах блоков



Рис. 6. Графики предельных кольцевых зазоров в соединяемых узлах блоков



Рис. 7. Графики предельных меридиональных зазоров в соединяемых узлах блоков

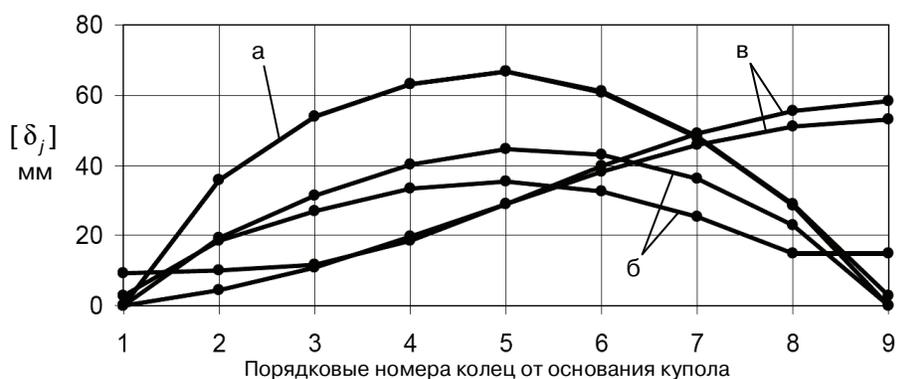


Рис. 8. Графики предельных зазоров в узлах 1 и 2 блоков в смежных секториальных частях купола
 а — нормальные, б — кольцевые,
 в — меридиональные

Полученные данные подтверждают неизбежность взаимных смещений узловых сопряжений конструкций при возведении большепролетных двухъярусных металлических куполов. В болтовых соединениях монтажных элементов устранение этих смещений возможно только при помощи силовой подгонки. Это приведет к возникновению начальных усилий в конструктивных элементах купольного каркаса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Торкатюк В.И. Монтаж конструкций большепролетных зданий. — М.: Стройиздат, 1985. — 170 с. [Torkatyuk V.I. Montazh konstrukziy bol'sheproletnyh zdaniy. — М.: Stroyizdat, 1985. — 170 s.]
- [2] Гофштейн Г.Е., Ким В.Г., Ницев В.Н., Соколова А.Д. Монтаж металлических и железобетонных конструкций. — М.: Стройиздат, 2004. — 528 с. [Gofshhteyn G.E., Kim V.G., Nishchev V.N., Sokolova A.D. Montazh metallicheskih i zhelezobetonnykh konstrukziy. — М.: Stroyizdat, 2004. — 528 s.]
- [3] Ищенко И.И. Монтаж стальных и железобетонных конструкций. — М.: Высшая школа, 1991. — 287 с. [Ishchenko I.I. Montazh stal'nyh i zhelezobetonnykh konstrukziy. — М.: Vysshaya shkola, 1991. — 287 s.]
- [4] Лебедь Е.В. Точность возведения стержневых пространственных металлических покрытий и ее прогнозирование // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2013. — № 4. — С. 5—12. [Lebed E.V. Tochnost' vozvedeniya stержnevyyh prostranstvennyh metallicheskih pokrytiy i ee prognozirovanie // Vestnik RUDN. Seriya «Inzhenernye issledovaniya». — 2013. — № 4. — S. 5—12.]
- [5] Лебедь Е.В. Компьютерное моделирование точности возведения двухъярусных металлических куполов // Промышленное и гражданское строительство. — 2013. — № 12. — С. 89—92. [Lebed E.V. Komp'yuternoe modelirovanie tochnosti vozvedeniya dvuhpyasnyh metallicheskih kupolov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. — 2013. — № 12. — S. 89—92.]

**DESIGN FEATURES
OF BOLTED CONNECTIONS OF STRUCTURAL ELEMENTS
OF TWO-LAYER METAL DOME RESULTING FROM ERRORS
OF THEIR FABRICATION AND ASSEMBLY**

E.V. Lebed

Department of Metal Structures
Moscow State University of Civil Engineering
Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, Russia, 129337

The paper describes the dependence of errors occurring in the frames of two-layer metal domes as a result of inaccuracy of actual geometric dimensions of assembly elements. The effect of errors on bolted connections of the individual members in the joints of the frame is demonstrated. The evaluation of the influence of errors on assemblage process and associated adjustment operations is given. Sequence of operations for different methods of assembly of the frameworks of metal domes are described. The results of statistical investigations of the probable clearances in the joints are presented.

Key words: metal dome, assembly errors, connections of structural elements, adjustment operations, clearances in the joints.