

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОГРАММЫ ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 624.074.5:681.3.06

ТОЧНОСТЬ ВОЗВЕДЕНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ И ЕЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Е.В. Лебедь

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

Дана общая характеристика точности возведения стержневых пространственных металлических покрытий. Отмечены причины возникновения погрешностей и их влияние на собираемость данных сооружений. Предложено определять погрешности пространственных каркасов на основе численной имитации на компьютере процесса их возведения по авторским программам, в алгоритме которых заложен метод Монте-Карло. Приведено описание алгоритмов программ.

Ключевые слова: точность возведения, действительные размеры, погрешности каркасов, металлические покрытия, компьютерные программы, блок-схемы.

Стержневые пространственные металлические покрытия характеризуются большими пролетами и множеством конструктивных элементов. Под точностью возведения таких покрытий понимается степень соответствия их действительных геометрических параметров проектным значениям. К таким параметрам обычно относят расстояния между опорными узлами, поярусную высоту в разных местах, расстояния между соседними узлами по сетчатой поверхности. Отличия действительных параметров от проектных свидетельствуют о погрешностях возведения каркасов таких покрытий.

Погрешности стержневых пространственных металлических покрытий связывают с неточностями изготовления и монтажа отдельных конструктивных элементов, которые являются следствием отклонений их действительных размеров от проектных или номинальных значений. Образование таких отклонений неизбежно, поскольку невозможно изготовить не только конструкцию, но и составляющие ее элементы, размеры которых абсолютно точно соответствовали бы заданным в проекте значениям.

Точность i -го стержневого элемента характеризуется разностью между действительным L_i^* и номинальным L_i размерами [1], т.е. отклонением

$$\delta L_i = L_i^* - L_i. \quad (1)$$

Эти отклонения в разных элементах имеют различные значения, в том числе и по знаку. Происхождение их связано с погрешностями технологических операций при изготовлении элемента, которые зависят от совокупности следующих факторов: механических свойств металла, точности оборудования, точности измерения, режима работы, квалификации рабочего, температуры воздуха и др. Следует отметить, что каждое отклонение включает в себя систематическую и случайную составляющие

$$\delta L_i = \delta L(m_i) + \delta L(\sigma)_i. \quad (2)$$

Систематические отклонения связаны с постоянными ошибками изготовления. Они отразятся на действительных размерах всех однотипных элементах одинаковым образом, т.е. будут больше или меньше номинальных размеров на постоянные величины. Их значения могут быть определены до сборки конструкций или их монтажа в каркас покрытия. Случайные же отклонения приводят к тому, что действительные размеры всех элементов будут отличаться от номинальных как в большую, так и в меньшую сторону непредсказуемым образом. Эти отклонения зависят от многих случайных ошибок изготовления и сборки элементов, поэтому распределение их приближается к нормальному закону.

Отклонения размеров конструкций от номинальных значений регламентируются технологическими допусками, которые назначают из условия рационального процесса монтажа и технической достижимости точности с учетом применяемого оборудования для подготовки, обработки и сборки их элементов. За допуск принимается диапазон отклонений размера как в меньшую, так и в большую сторону. При отсутствии систематической составляющей отклонения можно записать

$$|\delta L(\sigma)_i| \leq \Delta L_i / 2, \quad (3)$$

где ΔL_i — допуск размера L_i .

Между точностью изготовления отдельных конструктивных элементов и процессом возведения из них пространственных металлических покрытий есть очевидная зависимость: чем точнее выполнены конструктивные элементы, тем легче выполнять монтаж. Однако следует иметь в виду, что стремление к более высокой точности элементов ограничивается техническими возможностями оборудования и сопряжено с резким увеличением стоимости конструкций и, как следствие, стоимости всего сооружения.

Стержневые пространственные металлические большепролетные покрытия представляют собой сложные каркасы, элементы которых образуют многосвязные односетчатые или двухсетчатые системы (рис. 1).

Возводятся пространственные металлические большепролетные покрытия путем последовательного соединения друг с другом в узлах большого количества отдельных конструктивных элементов. При этом могут использоваться следующие виды монтажа: поэлементная сборка, монтаж с предварительным укруп-

нением в стержневые блоки, монтаж в проектном положении, монтаж на земле с последующим подъемом каркаса или его частей.

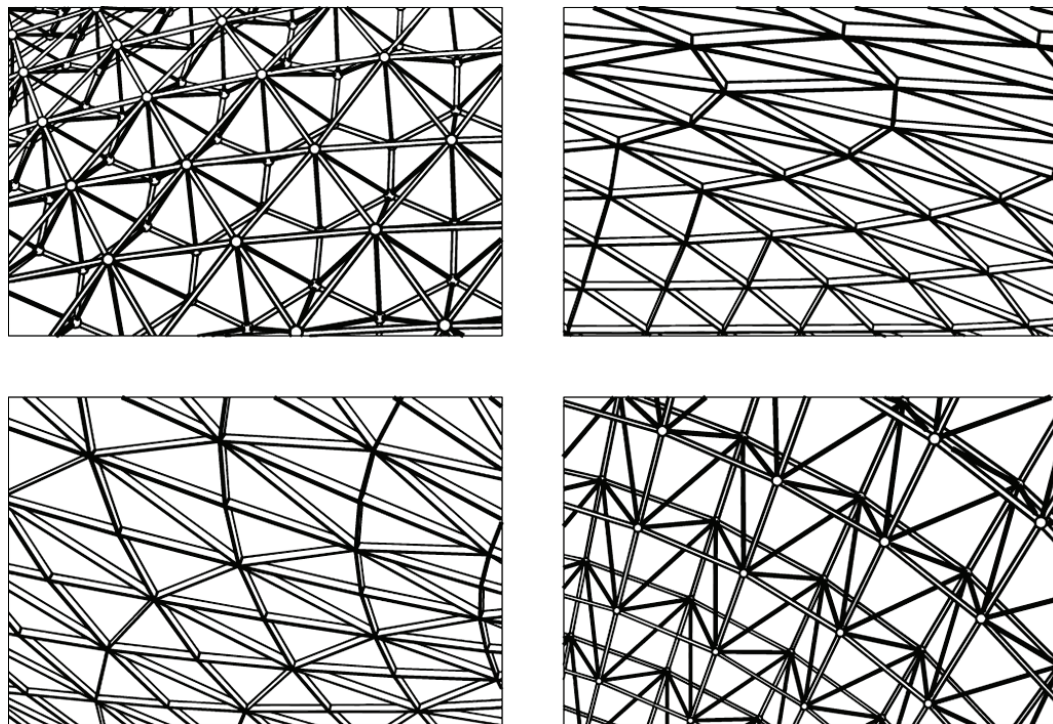


Рис. 1. Каркасы стержневых пространственных металлических покрытий

При сборке и монтаже стержневых пространственных покрытий из отдельных конструктивных элементов их погрешности начинают накапливаться и в совокупности приводят к погрешностям каркасов данных сооружений. Поскольку погрешности каркасов пространственных покрытий зависят от многочисленных случайных погрешностей отдельных монтажных элементов, распределение их также приближается к нормальному закону.

Каркас любого стержневого пространственного металлического покрытия имеет те или иные погрешности возведения. Если они не связаны с безопасностью сооружения, т.е. существенно не ухудшают его несущую способность, то можно выделить три разные точки зрения по отношению к погрешностям таких покрытий как сложных конструктивных систем.

Для людей, не вовлеченных в процесс проектирования и возведения, наличие погрешностей каркаса пространственного металлического покрытия не представляет интереса, если они по сравнению с размерами сооружения малы и практически не заметны. Иначе говоря, если форма покрытия, его симметрия, одинаковость повторяющихся элементов, плавность линий очертания, плоскостность граней и другие геометрические характеристики не претерпевают существенных изменений, то погрешности не ухудшают психологической комфортности людей, связанных с его эксплуатацией.

Для проектировщиков возможные погрешности каркаса пространственного металлического покрытия и, как следствие, изменения его конструктивной формы должны служить поводом для дополнительной проверки устойчивости стержневой системы и прочности его узловых соединений. Кроме того, проектировщики могут изменить конструктивное решение или способ возведения пространственного покрытия с целью уменьшения возможных погрешностей.

Для монтажников возникающие в процессе возведения погрешности каркаса пространственного покрытия увеличивают трудоемкость работ при соединении конструкций друг с другом, поскольку вызывают необходимость применения подгоночных операций. По этому критерию оценивается собираемость стержневых пространственных металлических покрытий — возможность выполнить их полный монтаж без специальных способов подгонки, сопряженных с силовыми воздействиями на соединяемые элементы, что может снизить надежность пространственных покрытий.

Обычно считается, что соблюдение допусков, установленных стандартом для конструктивных элементов [2], не должно приводить к погрешностям, нарушающим собираемость конструктивных систем. Однако из-за большого количества монтажных элементов и сложной схемой их соединения друг с другом в стержневых пространственных металлических покрытиях даже при соблюдении всех допусков обеспечить собираемость конструкций без подгонки практически невозможно.

В разных конструктивных системах стержневых пространственных металлических покрытий используются различные способы подгонки.

В двухсетчатых стержневых покрытиях обычно применяется силовая подгонка при монтаже конструктивных элементов. Она предполагает использование круглых клиньев — оправок (стержней в виде усеченного конуса) в болтовых соединениях либо клиньев прямоугольного сечения с такими же упорами в сварных (стыковых) соединениях. Такие способы насильственного смещения соединяемых элементов в сложных многосвязных конструктивных системах повышают трудоемкость монтажа, усложняют его процесс и вызывают появление начальных усилий в стержнях каркасов.

В односетчатых стержневых покрытиях возможна подгонка путем корректировки пространственного положения узлов, сопряженная с незначительными смещениями концов стержневых элементов каркасов в пределах люфтов ослабленных болтовых соединений в других узлах. Такая собираемость приводит к искажению геометрической формы металлических покрытий, ухудшая их устойчивость как пространственных стержневых систем.

В любом случае информация о возможных погрешностях возведения стержневых пространственных металлических покрытий, полученная до начала монтажа, может и должна способствовать решению связанных с ними проблем. Такую информацию можно получить на основе численной имитации на компьютере процесса возведения каркаса пространственного металлического покрытия с использованием метода Монте-Карло (метода статистического компьютерного моделирования) [3].

Автором разработаны компьютерные программы, которые реализуют такую имитацию. Одна из них, называемая SBORKA, предназначена для численного мо-

делирования сборки односетчатых пространственных каркасов из отдельных стержней. Другая программа, называемая MONTAG, предназначена для численного моделирования монтажа двухсетчатых (двухпоясных) пространственных каркасов из объемных стержневых блоков. На рис. 2 и 3 представлены укрупненные блок-схемы этих программ, показывающие последовательность решения основных задач при компьютерном моделировании процесса возведения каркасов.

Обе программы предназначены для численного построения действительной геометрической формы каркасов пространственных металлических покрытий как стержневых систем с моделированием случайных отклонений длин стержней от номинальных значений. По завершении численного построения каркаса сооружения действительной формы определяются как отклонения расстояний между узлами сооружения от проектных значений, так и отклонения пространственного положения узлов от проектного положения, которые условно обозначим параметром δ_j . Эти отклонения характеризуют точность возведения сооружения, и их можно назвать погрешностями действительной геометрической формы его каркаса. В основе алгоритмов программ лежит задача вычисления координат искомого узла каркаса с действительными расстояниями L_i^* до узлов с уже известными координатами, что сводится к решению в основном задачи пересечения трех сфер с радиусами, равными этим расстояниям.

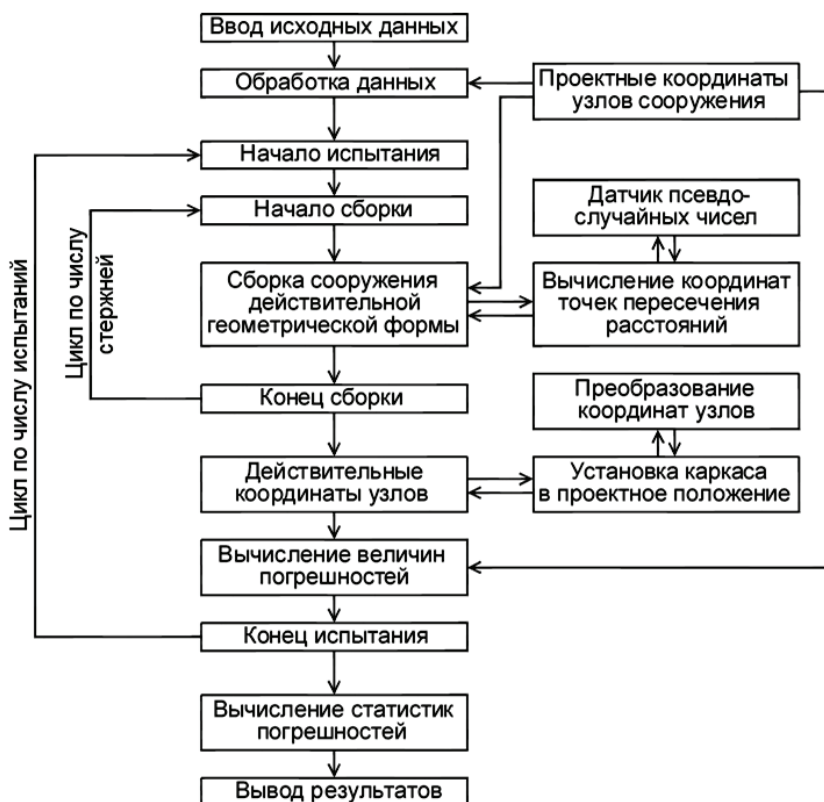


Рис. 2. Укрупненная блок-схема программы SBORKA

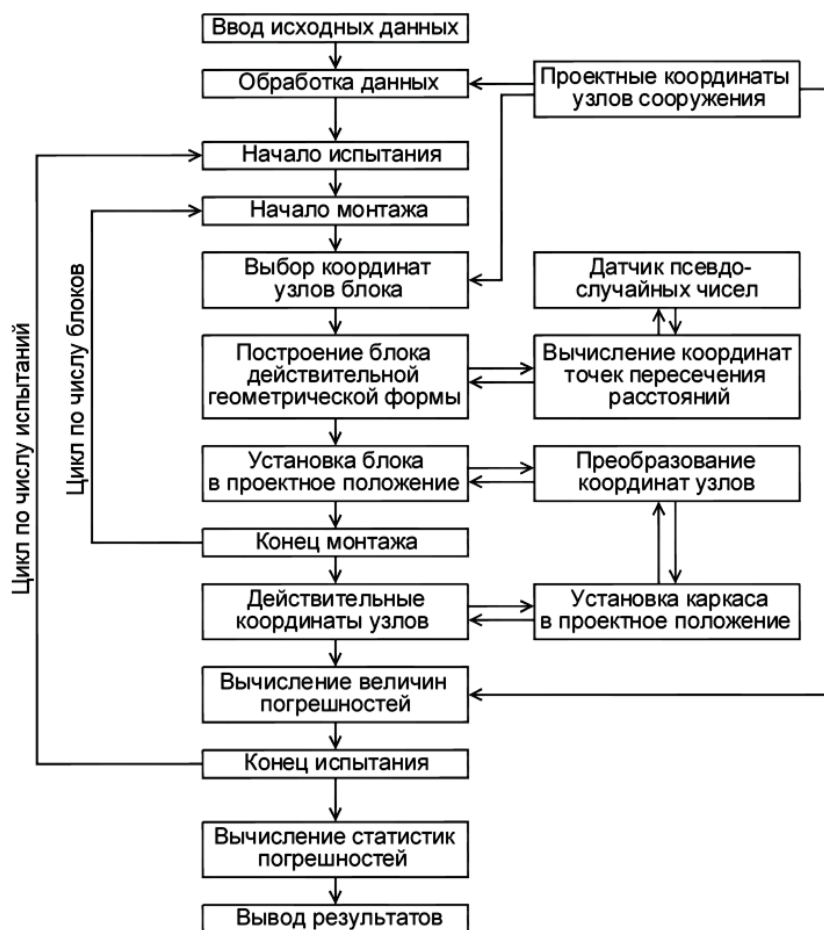


Рис. 3. Урупненная блок-схема программы MONTAG

Случайное отклонение $\delta L(\sigma)_i$ каждого действительного расстояния L_i^* вычисляется в программах как нормально распределенное число, значение которого никогда не выходит за пределы интервала от $-3\sigma = -\Delta L_i/2$ до $+3\sigma = \Delta L_i/2$. Для этого по специальному алгоритму, называемому датчиком псевдослучайных чисел, вычисляется нормально распределенное число ζ с параметрами $m = 0, \sigma = 1$.

С целью получения возможности статистического анализа возможных погрешностей численные построения каркасов выполняются многократно. С вероятностной точки зрения каждая полученная действительная форма пространственного покрытия при компьютерном построении является случайным событием, поэтому однократное построение каркаса называется испытанием. Следовательно, число испытаний n соответствует объему выборки при статистическом анализе погрешностей δ_j и чем оно больше, тем ближе выборочные оценки (статистики) к достоверным значениям.

В результате работы программ вычисляются следующие статистики:

$$m(\delta_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \delta_{jk}, \quad \sigma(\delta_j) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n [\delta_{jk} - m(\delta_j)]^2}. \quad (4)$$

В программе SBORKA действительные координаты всех узлов определяются, как и в реальном односетчатом каркасе, последовательным соединением стержней в узлах. Порядок сборки каркаса задается в исходных данных. В программе MONTAG определение действительных координат узлов связано с предварительной численной сборкой объемных монтажных блоков, что также соответствует характеру возведения реального двухсетчатого каркаса. После сборки блоков моделируется их установка в проектное положение с привязкой к ранее полученным координатам узлов каркаса. Вид и размеры монтажных блоков, порядок их сборки и способ установки в проектное место каркаса задаются в исходных данных.

В программах можно задавать разные допуски (например, в зависимости от длины) стержневым элементам или размерам объемных монтажных блоков. Предусмотрена также имитация установки в проектное положение всего каркаса или его части после сборки или монтажа. Поэтому при необходимости в исходных данных указывается перемещаемая часть каркаса и способ ее установки в проектное положение. Изменение положения монтажных блоков, частей или всего каркаса реализуется специальным преобразованием полученных при сборке или монтаже действительных координат указанной группы узлов.

Проектные координаты узлов каркаса стержневого пространственного металлического покрытия вычисляются заранее по авторской программе геометрического расчета GERA [8].

Программы SBORKA и MONTAG характеризуются многофункциональным характером исследований и предназначены для специализированного применения подготовленным пользователем. Они снабжены инструкциями, однако не имеют Windows-ориентированных интерфейсов. Подготовка данных, запуск программы на счет и обработка результатов производятся стандартными приемами операционной системы компьютера. При этом возможно использование встроенных программ Windows для непосредственной подготовки и редактирования данных в файлах формата txt.

Представленные программы уже неоднократно успешно использовались для проведения исследований возможных погрешностей возведения металлических большепролетных односетчатых куполов [4; 7] и двухпоясных ребристо-кольцевых куполов [5; 6]. Проведенные исследования показали, что программы SBORKA и MONTAG позволяют получить информацию о возможных погрешностях стержневых пространственных металлических покрытий при разных видах сборки или монтажа. Это дает возможность выбрать менее трудоемкий способ монтажа пространственных покрытий, принять необходимые меры по обеспечению их собираемости, а также выполнить дополнительную проверку устойчивости каркасов с учетом несовершенств их геометрической формы и начальных усилий в стержнях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ 21778-81 Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Основные положения. — М.: Издательство стандартов, 1981. [GOST 21778-81 Sistema obespecheniya tochnosti geometricheskikh parametrov v stroitelstve. Osnovnyye polozheniya. — М.: Izdatelstvo standartov, 1981.]

- [2] ГОСТ 21779-82 Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски. — М.: Издательство стандартов, 1983. [GOST 21779-82 Sistema obespecheniya tochnosti geometricheskikh parametrov v stroitelstve. Tekhnologicheskie dopuski. — М.: Izdatelstvo standartov, 1983.]
- [3] Савельев В.А., Лебедь Е.В., Шебалина О.В. Математическое моделирование монтажа пространственных конструкций // *Промышленное строительство*. — 1991. — № 1. — С. 18—20. [Savelyev V.A., Lebed E.V., Shebalina O.V. Matematicheskoe modelirovanie montazha prostranstvennykh konstruksy // *Promyshlennoe stroitelstvo*. — 1991. — № 1. — S. 18—20.]
- [4] Лебедь Е.В. Численное исследование на ЭВМ погрешностей сборки сетчатого купола // Совершенствование строительных конструкций, архитектурных решений, технологий и организации строительства: Материалы науч.-техн. конф. Ч. 1. — Саратов: СГТУ, 1996. — С. 109—114. [Lebed E.V. Chislennoe issledovanie na EVM pogreshnostey sborki setchatogo kupola // *Sovershenstvovanie stroitelnykh konstruksy, arhitekturnykh resheny, tehnologiy i organizatsii stroitelstva: Materialy nauch.-tehn. konf. Ch. 1.* — Saratov: SGTU, 1996. — S. 109—114.]
- [5] Лебедь Е.В. Численное исследование погрешностей возведения большепролетных металлических куполов на ЭВМ // Совершенствование конструктивных решений и методов расчета строительных конструкций: Межвуз. науч. сб. — Саратов: СГТУ, 1999. — С. 45—52. [Lebed E.V. Chislennoe issledovanie pogreshnostey vozvedeniya bolsheproletnykh metallicheskikh kupolov na EVM // *Sovershenstvovanie konstruktivnykh resheny i metodov rascheta stroitelnykh konstruksy: Mezhvuz. nauch. sb.* — Saratov: SGTU, 1999. — S. 45—52.]
- [6] Лебедь Е.В. Прогнозирование погрешностей возведения каркаса большепролетного 8-ярусного ребристого купола // *Вестник ВолгГАСА. Серия «Технические науки»*. — 2003. — Вып. 2—3(8). — С. 11—17. [Lebed E.V. Prognozirovanie pogreshnostey vozvedeniya karkasa bolsheproletnogo 8-yarusnogo rebristogo kupola // *Vestnik VolgGASA. Seriya «Tehnicheskie nauki»*. — 2003. — Вып. 2—3(8). — S. 11—17.]
- [7] Лебедь Е.В. Особенности численного моделирования монтажа каркаса односетчатого купола // *Вестник ВолгГАСА. Серия «Строительство и архитектура»*. — 2003. — Вып. 3(9). — С. 81—86. [Lebed E.V. Osobennosti chislennogo modelirovaniya montazha karkasa odnosetchatogo kupola // *Vestnik VolgGASA. Seriya «Stroitelstvo i arhitektura»*. — 2003. — Вып. 3(9). — S. 81—86.]
- [8] Лебедь Е.В. Геометрический расчет каркасов пространственных сооружений: Учеб. пособие. — Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2001. [Lebed E.V. Geometrichesky raschet karkasov prostranstvennykh sooruzheny: Ucheb. posobie. — Saratov: Sarat. gos. tehn. un-t. 2001.]

ACCURACY IN CONSTRUCTION OF METAL SPACE FRAMED ROOFS AND ITS PREDICTING

E.V. Lebed

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

The paper gives general characteristics of accuracy in constructing metal space frames. It analyzes the main causes of errors and their effect on the accuracy of assembly of the structures. The author suggests to determine errors in space frames by using a numerical computer simulation of their construction. The program, created by the author of the paper, is based on Monte-Carlo method. The description of the program algorithms is given in the paper.

Key words: accuracy of construction, actual dimensions, errors of frames, metal roofs, computer software, flow diagrams.