

doi: 10.5862/MCE.61.6

## Методика расчета точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий

### The method of calculating the accuracy of large-span metal rod systems

**Аспирант А.Б. Бондарев,**  
**д-р техн. наук, заведующий кафедрой**  
**А.М. Югов,**  
Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры, Макеевка,  
Украина

**A.B. Bondarev,**  
**A. Yugov,**  
Donbas National Academy of Civil Engineering and  
Architecture, Makiyivka, Ukraine

**Ключевые слова:** большепролетные металлические пространственные покрытия; расчет точности; сборочные отклонения; геометрическое моделирование; теория размерных цепей; теория управления; монтажные нагрузки

**Key words:** large-span metal shells, calculation of accuracy, deflection assembly, geometric modeling, theory of dimensional chains, control theory, mounting loads

**Аннотация.** В статье представлена методика расчета точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий и ее математическая модель. Методика позволяет учесть связность шарнирно-стержневых металлических покрытий, технологию их возведения и зазоры в болтовых соединениях. Такие зазоры могут быть вызваны как отклонением центра отверстия от проектного положения, так и отклонением действительной формы отверстий под болты от номинальной формы. В статье приведен пример расчета шарнирно-стержневой оболочки с многоболтовыми стыками на накладках. Также показано, как использовать предложенную методику в сочетании с разработанным ранее методом генерации шарнирно-стержневых систем. Таким образом, данная методика расчета точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий может использоваться при определении отклонений как отдельных элементов шарнирно-стержневой системы, так и всей системы в целом. Представленную в статье методику можно использовать при расчете точности разнообразных шарнирно-стержневых многоэлементных систем, выполненных из металлоконструкций: поддерживающих башен дымовых труб, радиотелескопов, градирен, антенн и аналогичных им.

**Abstract.** The article presents a method for calculating the accuracy of large-span metal rod systems and its mathematical model. The method takes into account the connectivity of hinged-rod metal shells, the technology of their construction and the gaps in the bolted joints. The latter are caused by the center of the hole deviating from its designed position and by the actual shape of the holes for the bolts designing from the nominal form. An example of calculating the hinged-rod shell with polybolted seams on the lining is described in the article. It is also shown how to use the proposed methodology for calculating the accuracy of hinged-rod metal shells in general combined with the previously proposed method for generating hinged-rod systems. Consequently, the proposed method for calculating the accuracy of large-span metal rod systems can be used for determining the deviations of both the whole hinge-rod system and its individual elements. in the method presented in this paper can be used when calculating the accuracy of a variety of joint-core multiple systems, made from metal, e.g., support tower chimneys, radio telescopes, cooling towers, antennas and similar structures.

### Введение

При возведении современных спортивных и зрелищных объектов – футбольных стадионов, плавательных бассейнов, кинотеатров, оздоровительных центров и многих других – применяются большепролетные шарнирно-стержневые покрытия [1]. Современный этап развития строительства требует проектирования систем с учетом конструктивных и технологических

особенностей. Неучет сборочных отклонений при проектировании большепролетных покрытий может привести к аварийному состоянию [2, 3].

При наличии отклонений действительная форма и положение узлов статически неопределимой шарнирно-стержневой системы и реальное напряженно-деформированное состояние (НДС) отличаются от проектных. При проектировании большепролетных покрытий необходим учет отклонений возведения, а также борьба с ними при необходимости. Этот учет, как правило, выполняется методом статистических испытаний, который не учитывает конструктивных и технологических особенностей большепролетных покрытий и не позволяет адекватно спрогнозировать как величины отклонений, так и НДС.

Следовательно, для определения и учета отклонений на этапе проектирования необходима разработка методики расчета точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий. Кроме того, для борьбы с отклонениями необходима разработка новых конструктивных решений оболочек и управление отклонениями. Такой комплексный подход к проектированию покрытий позволит повысить их несущую способность.

В данной работе представлена методика расчета точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий, которая позволяет учесть их связность, технологию возведения и зазоры в болтовых соединениях. Последние вызваны как отклонением центра отверстия от проектного положения, так и отклонением действительной формы отверстий под болты от номинальной формы. Приведенный пример расчета шарнирно-стержневой оболочки с многоболтовыми стыками на накладках позволяет продемонстрировать разработанную в статье методику.

## 1. Краткий обзор ранее выполненных исследований

А.С. Гвамичава [4], А. Абусамра Авад Юсиф [5], М.В. Моисеев [6] и многие другие ученые в своих работах для оценки влияния отклонений на НДС большепролетных покрытий использовали метод статистических испытаний, который широко известен, но не учитывает особенностей конструктивного и технологического характера. М.Н. Кирсанов [7] приводит в своей работе индуктивный метод определения погрешностей, схожий с методом Мора. М. Sonmez [8], Н.С. Kim и А.К. Shin [9] предлагают алгоритм оптимизации ферменных конструкций с учетом отклонений геометрии. Для борьбы с отклонениями и деформациями в мостовых конструкциях А. Preumont [10] предлагает использовать систему управления. Аналогичные мероприятия для борьбы с отклонениями и деформациями отражательной поверхности радиотелескопов предлагают использовать J.E. Pearson и S. Hansen [11]. Исследованием отклонений в многоэтажных зданиях занимались Н.И. Ватин [12], В.Е. Сно [13] и многие другие. А.М. Белостоцкий, А.С. Павлов [14] в качестве сейсмоизоляции сетчатой оболочки покрытия большепролетного сооружения рекомендуют использовать эластомерные опоры, которые также могут являться компенсаторами отклонений. А.В. Перельмутер и О.В. Кабанцев [15, 16] занимаются моделированием поведения конструкций многоэтажных зданий с учетом последовательности их возведения. Аналогичные работы выполняла и М.С. Барабаш [17]. В целом, работы А.В. Перельмутера, О.В. Кабанцева и М.С. Барабаш являются современными, но не учитывают величин возможных отклонений при монтаже. Авторы данной статьи занимаются исследованием НДС конструкций большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий с учетом накопления отклонений геометрии [18–21]. Е.В. Лебедь и А.А. Григорян [22, 23] занимаются также исследованием начальных усилий в двухъярусных металлических куполах из-за погрешностей изготовления и монтажа их конструкций и силовым устранением погрешностей. Как показывает опыт строительства, наличие и накопление отклонений может привести к аварии покрытия, как это было с купольным покрытием сооружения ВНИЦ ВЭИ им. В.И. Ленина в г. Истра Московской области Российской Федерации [24]. С 70–х годов XX века на кафедре технологии ракетно-космического машиностроения в МГТУ им. Н.Э. Баумана Л.А. Кашуба, В.А. Тарасов, С.В. Исаев занимаются вопросами отклонений формы радиотелескопов, оболочек ракет [25], но их разработки нельзя применить для строительных металлоконструкций.

## 2. Выделение не разрешенных ранее частей общей проблемы и анализ современных исследований

Краткий обзор ранее выполненных исследований свидетельствует о том, что в настоящее время появилось множество работ по оценке НДС металлоконструкций с учетом монтажа. Учет отклонений в настоящее время выполняется методом статистических испытаний или методом Мора. При расчете точности простых систем можно использовать методы теории размерных цепей, но для сложных статически неопределимых многоэлементных и многосвязных систем его применение невозможно.

Использование метода статистических испытаний для определения отклонений и усилий в многоэлементных шарнирно-стержневых статически неопределимых системах не отражает процесса накопления отклонений при сборке и связности шарнирно-стержневой системы. Для учета процесса накопления отклонений и связности многоэлементной шарнирно-стержневой системы предлагается использовать такие геометрические процедуры как пересечение окружностей (метод круговых засечек), пересечение сфер, прямой и плоскости и другие процедуры, которые применяются в геодезии при расчете теодолитных ходов, сетей триангуляции. Все они в настоящее время реализованы в таких современных программных комплексах как AutoCAD Civil 3D, Micro Survey, Вычислительном Комплексе «Размерный Анализ Стержневых Конструкций» (ВК РАСК) и других [26]. Известные компьютерные программы и методики, изложенные, к примеру, в работах [27, 28], не учитывают ни связности шарнирно-стержневых систем, ни технологии возведения большепролетных покрытий, а главное – зазоров в болтовых соединениях.

Появившиеся в последнее время современные исследования рекомендуют для контроля поведения зданий и сооружений при эксплуатации применять системы мониторинга. В работах C.R. Farrar [29], C.J. Gantes [30], L. Gaul [31], R. Hasan [32], M.E. Kartal [33], A. Kaveh [34], K. Matsumoto [35], Ö. Keleşoğlu [36] предлагается создавать конструкции типа semi-active – конструкции с «полуактивным управлением», в том числе, для борьбы с несовершенствами формы. Управление поведением конструкций применяется для повышения их виброустойчивости и точности передачи возмущающих факторов, к примеру, радиоволн радиотелескопами.

Создание методики, которая позволит выполнить расчет точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий как пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями с учетом формы и отклонения центров отверстий под болты с осеболтовыми и многоболтовыми соединениями, является актуальной задачей.

## 3. Объект, цель и методика исследований

Объект исследования – шарнирно-стержневые большепролетные металлические пространственные покрытия и их узловое соединения. В качестве примера объекта исследования принята однопоясная шарнирно-стержневая большепролетная металлическая пространственная оболочка покрытия (рис. 1).

Цель работы – разработать методику расчета точности шарнирно-стержневых большепролетных пространственных металлических покрытий в вероятностной постановке, которая позволяет учесть отклонения длин стержней, форму и отклонение положения центров отверстий под болты с осеболтовыми и многоболтовыми соединениями.

На рисунке 2 представлена схема однопоясной шарнирно-стержневой оболочки, собираемой в продольном направлении, как пространственная размерная цепь с несколькими замыкающими звеньями. В качестве конструктивного решения узлов шарнирно-стержневой оболочки покрытия приняты осеболтовые и многоболтовые стыки (рис. 3). Расчет точности конструкций выполняется для оценки показателей точности изготовления и монтажа. Результаты расчета точности – сборочные отклонения, как правило, являются монтажным нагружением.

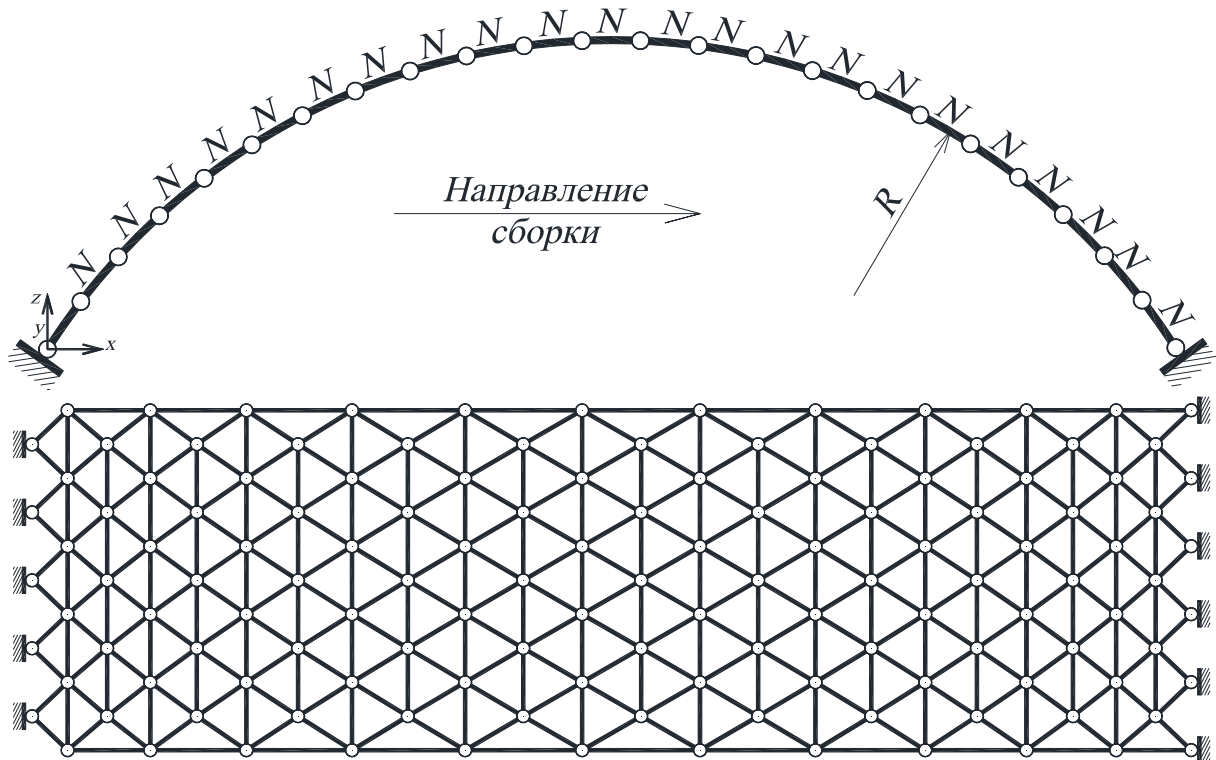


Рисунок 1. Схема однопоясной шарнирно-стержневой металлической оболочки при статическом расчете

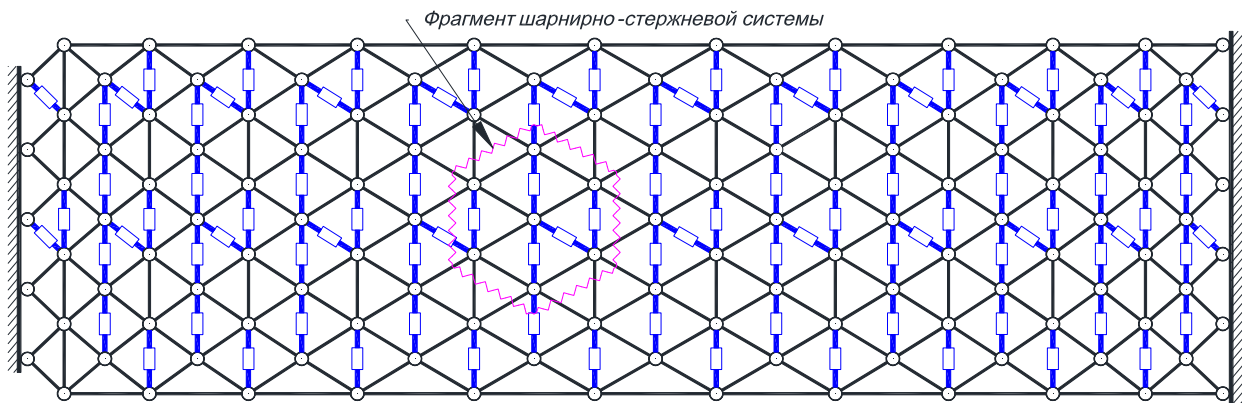


Рисунок 2. Схема однопоясной шарнирно-стержневой металлической оболочки при расчете точности (закрывающие звенья – стержни синего цвета)

Известно, что отправочные элементы шарнирно-стержневых систем в расчетных схемах при расчете точности имеют вид прямолинейного отрезка. Следовательно, форма марки определяется положением вершин прямолинейных отрезков, которые, как правило, в металлических конструкциях являются еще и узлами сопряжения шарнирно-стержневых элементов. Учитывая сказанное выше, предлагаем отклонения в стержнях с осеболтовыми узлами – MERO, MArXI – определять по формуле:

$$l_{i1}^* = l_{ic} + 0,5\omega_1\Delta l_i, \quad (1)$$

где  $l_{i1}^*$  – действительное значение длины стержня с осеболтовым стыком;

$l_{ic}$  – номинальное значение длины стержня с осеболтовым стыком;

$0,5\Delta l_i$  – допускаемое линейное отклонение стержня;

$\omega_1$  – число, получаемое при помощи датчика случайных чисел (ДСЧ) в зависимости от закона распределения отклонений. Схема стержня с осеболтовым стыком при расчете точности приведена на рисунке 4.

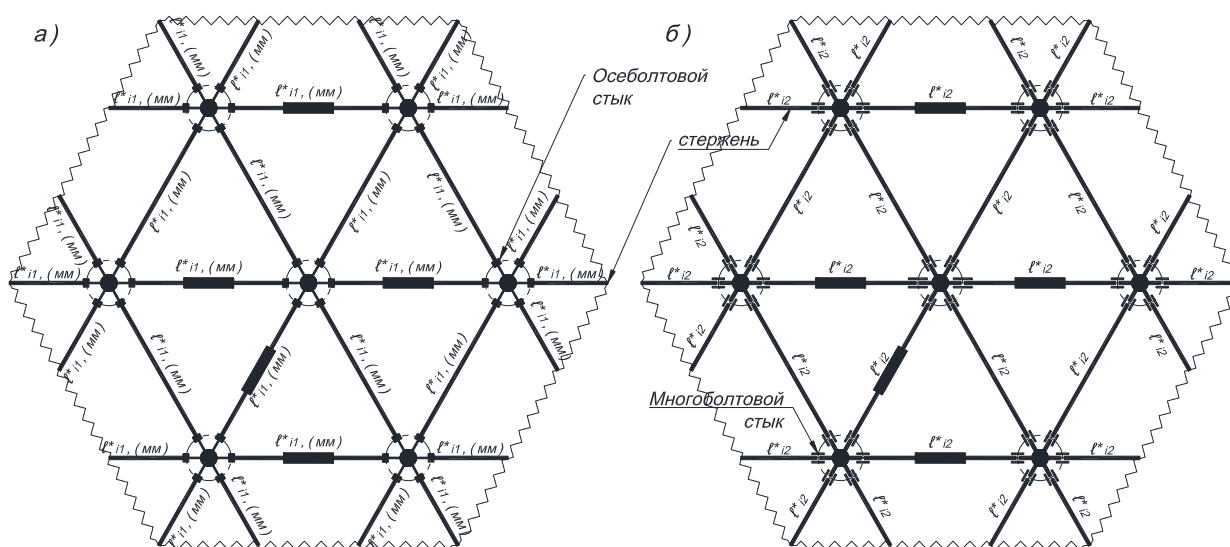


Рисунок 3. Фрагмент шарнирно-стержневой системы (повернуто на 90°):  
а) с осеболтовыми; б) с многоболтовыми стыками

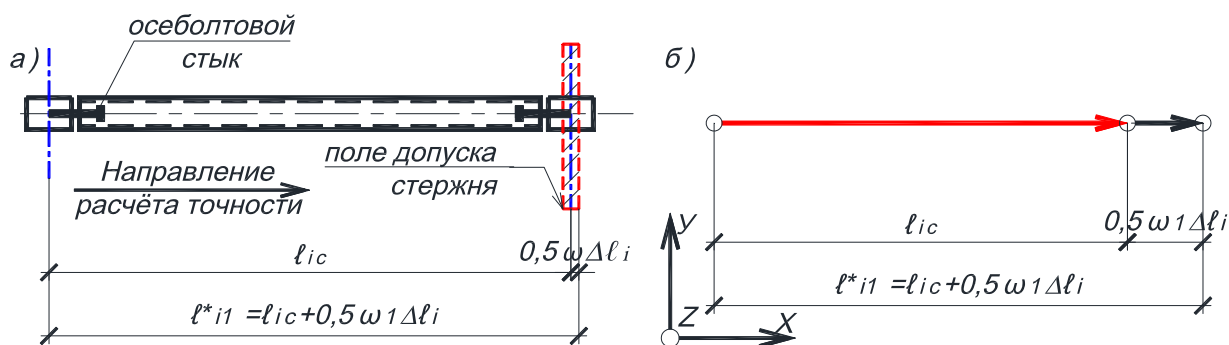


Рисунок 4. Схема стержня с осеболтовым стыком при расчете точности:  
а) конструктивная; б) расчетная

Формула 1 применима при определении отклонений в отправочных элементах с осеболтовыми стыками, которые представляют собой готовое прямолинейное изделие. Анализ многоболтового соединения стержней шарнирно-стержневой оболочки показал, что расчет точности стержня по формуле 1 будет неверным. На положение стержней с многоболтовыми соединениями (рис. 5) оказывает влияние положение центров отверстий, форма самих отверстий под болты.

Для расчета точности стержней с многоболтовыми соединениями принимаются отклонения по двум отверстиям в одном звене (отправочной марке), так как положение прямолинейного отрезка можно описать двумя точками, как на плоскости, так и в пространстве. Следовательно, точность соединения элементов и геометрия оболочки с многоболтовыми стыками зависят только от точности любых двух отверстий в каждом элементе, составляющем стержень – отправочной марки в направлении сборки. Отправочные марки стержня обозначены как 1...4 (рис. 5). Отклонение отверстия –  $\Delta l_3$  (рис. 6) – величина допускаемого отклонения для соответствующего класса точности болта относительно осей  $x$  и  $y$ . Чтобы учесть совместность накопления отклонения, вызванного неточным положением отверстия относительно осей  $x$ ,  $y$  и формой самого отверстия, представим модель размерной цепи, учитывающую совместность отклонения зазора по осям  $x$  и  $y$  и длину стержня  $\Delta l_i$  (рис. 6).

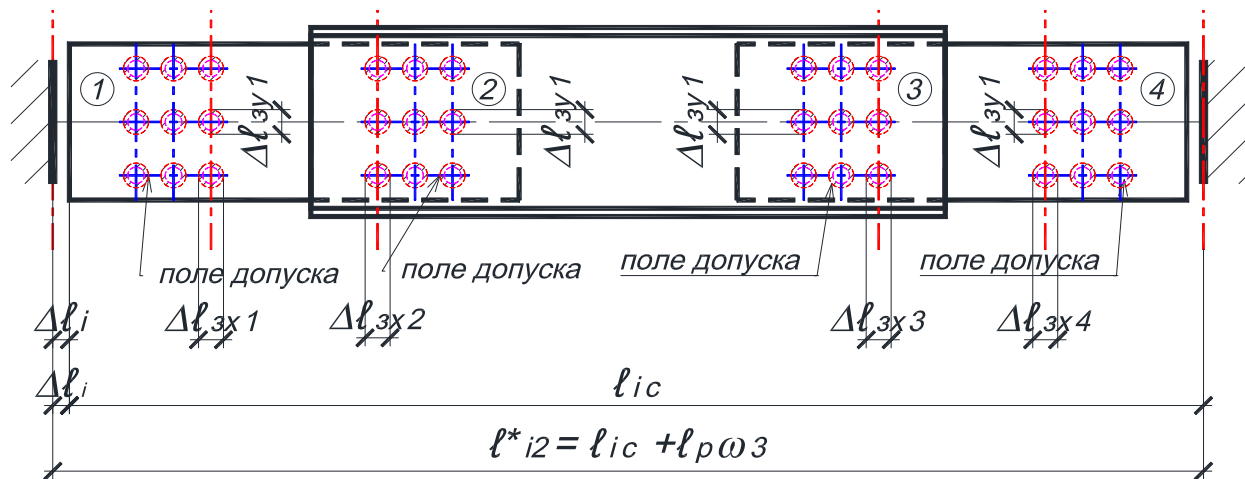


Рисунок 5. Конструктивная схема стержня с многоболтовым соединением

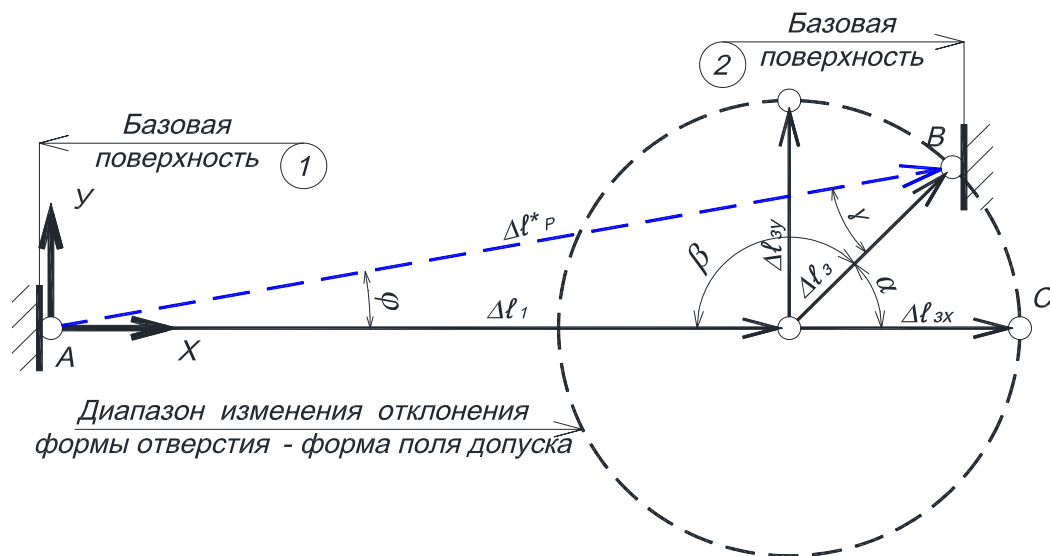


Рисунок 6. Модель размерной цепи, учитывающая положение и форму отверстий

Исходя из модели размерной цепи, учитывающей совместное влияние отклонения длины стержня (линейное отклонение) и зазора (угловое отклонение), можно получить результирующее отклонение в отправочной марке  $\Delta l_p^*$ :

$$\Delta l_p^* = (\Delta l_i^2 + \Delta l_3^2 - 2\Delta l_i \Delta l_3 [\omega_2 \cos \beta])^{0,5}, \quad (2)$$

где  $\Delta l_p^*$  – результирующее отклонение в отправочной марке;  
 $\Delta l_i$  – линейное отклонение в стержне;  
 $\Delta l_3$  – максимальный размер зазора;  
 $\omega_2$  – случайная составляющая угла наклона отклонения  $l_p$ , генерируемая ДСЧ;  
 $\beta$  – угол, учитывающий влияние предельного отклонения формы отверстия на величину результирующее отклонение (рис. 6),  $\beta = 90^\circ$ .

В формуле 2 приняты предельные величины отклонений. Для перехода к вероятностному методу расчета точности с учетом возможных отклонений формы отверстия нужно сгенерировать случайное значение  $\Delta l_p$  при помощи ДСЧ. Следовательно, величину результирующего отклонения  $\Delta l_p$  совместно с номинальной длиной стержня и формой отверстия в вероятностной постановке можно представить:

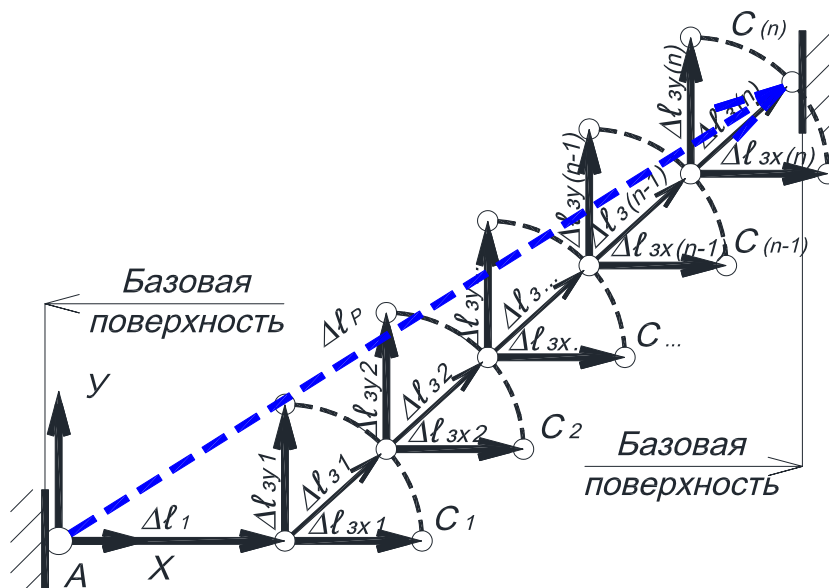
$$l_{i2}^* = l_{ic} + l_p \omega_3, \quad (3)$$

где  $l_{i2}^*$  – действительный геометрический размер при учете формы отверстия;

Bondarev A.B., Yugov A. Metodika rascheta tochnosti bolsheproletnykh sharnirno-sterzhnevnykh metallicheskih pokrytiy [The method of calculating the accuracy of large-span metal rod systems]. Magazine of Civil Engineering. 2016. No. 1. Pp. 60–73. doi: 10.5862/MCE.61.6

$l_{ic}$  – номинальная длина стержня в осях по проекту;  
 $l_p^*$  – результирующее отклонение в отправочной марке – по формуле 2;  
 $\omega_3$  – случайная составляющая результирующего отклонения.

Учитывая, что отправочных марок, составляющих цепь – от первой до второй базовой поверхности или от узла до узла расчетной схемы (рис. 6) – может быть  $n$ -е количество, то размерную цепь можно представить как косоугольный треугольник (рис. 7). Расчет точности шарнирно-стержневой системы подразумевает последовательное вычисление координат узлов ее расчетной схемы, которая состоит из отрезков прямых  $l_{i1}^*$  или  $l_{i2}^*$ , по формуле 1 или 3 соответственно.



**Рисунок 7. Модель размерной цепи, учитывающая  $n$ -е количество отклонений формы и положения отверстия в стержне**

Для учета процесса накопления отклонений и связности многоэлементной шарнирно-стержневой системы предлагается использовать такие геометрические процедуры как пересечение окружностей (метод круговых засечек), пересечение сфер, прямой и плоскости и другие, применяемые в геодезии при расчете теодолитных ходов и сетей триангуляции.

Рассмотрим стадии построения стержневой системы действительной формы. В качестве примера возьмем ячейку плоской шарнирно-стержневой системы, изображенную на рисунке 8. Сборка ячейки плоской шарнирно-стержневой системы состоит из четырех отдельных стадий, то есть представляет собой последовательность геометрических преобразований номинальных и фактических координат ее элементов. Предварительно определим исходную пространственную базу для построения. Для этого условимся, что действительные узлы  $A^*$  и  $D^*$  совмещены с проектными  $A$  и  $D$ , а действительное ребро  $A^*D^*$  совмещено по направлению с проектным –  $AD$ , а действительные узлы  $B^*$ ,  $C^*$ ,  $E^*$  находятся в той же плоскости, что и проектные узлы  $A$  и  $D$ .

Действительный узел  $E$  находится на пересечении двух окружностей с радиусом  $R_1$  и  $R_2$ .  $R_1 = A^*E^* = AE + \Delta l$  и радиусом  $R_2 = D^*E^* = DE + \Delta l$  – первая стадия сборки. Вторая стадия сборки – поиск действительного положения координат действительного узла  $B^*$ . Действительное положение узла находится на пересечении  $R_3 = A^*B^* = AB + \Delta l$  и  $R_4 = E^*B^* = EB + \Delta l$ . Аналогично определяется положение узла  $C^*$ . Узел  $C^*$  находится на пересечении двух окружностей с радиусом  $R_5 = D^*C^* = DC + \Delta l$  и  $R_6 = E^*C^* = EC + \Delta l$ . Возможная действительная длина стержня  $BC - B^*C^*$  находится как разность действительных координат точек  $C^*$  и  $B^*$  – последняя, четвертая стадия построения действительной геометрической формы ячейки плоской шарнирно-стержневой системы. Величина суммарного зазора ( $\Sigma \Delta x$ ) в замыкающем стержне определяется как разница номинальной длины стержня  $BC$  и возможной действительной  $B^*C^*$ . То есть  $\Sigma \Delta x = BC - B^*C^*$ .

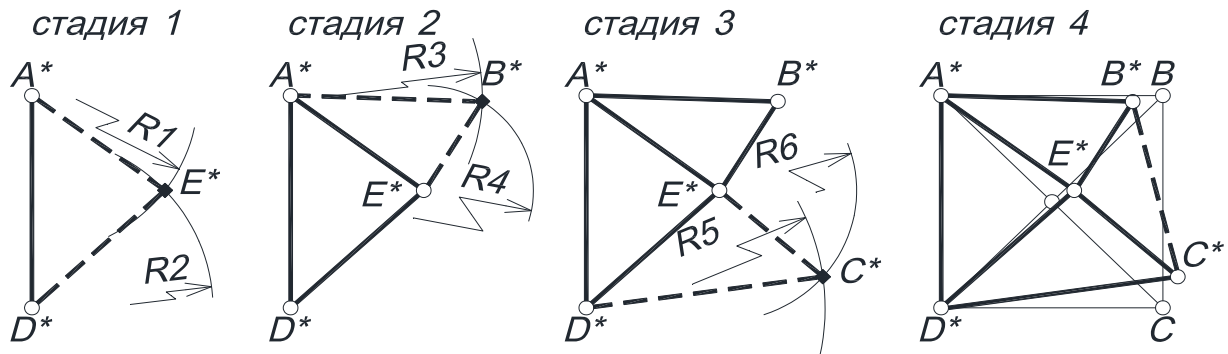


Рисунок 8. Сборка стержневой системы действительной формы

Следовательно, величина результирующего параметра с учетом связности шарнирно-стержневой системы на этапе  $n - l_{ip}^n \omega_n$  в замыкающем стержне определяется как разница длины стержня  $BC_{ij}$ , определенной по формуле 1 или 3 методики, и длины  $B^*C^*$ , накопленной на предыдущих этапах сборки, то есть  $l_{ip}^n \omega_n = BC_{ij} - B^*C^*$ . Значение  $\Delta l$  в выражениях для  $R_1 \dots R_4 - l_{i1}^*$  или  $l_{i2}^*$  в зависимости от конструктивного решения оболочки.

Вычисление координат точек пересечения основано на решении систем уравнений, описывающих рассматриваемые в конкретной задаче геометрические объекты в пространстве или, как в нашем случае, на плоскости. При этом используются 5 типов уравнений, представленных ниже.

Уравнение сферы радиусом  $R_1$  с центром в точке  $M_1(x_1, y_1, z_1)$ :

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = R_1^2. \quad (4)$$

Уравнение прямой, проходящей через точки  $M_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $M_2(x_2, y_2, z_2)$ :

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} = t. \quad (5)$$

Уравнение плоскости, проходящей через точки  $M_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $M_2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $M_3(x_3, y_3, z_3)$ :

$$\begin{vmatrix} x & y & z \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

При определении координат искомой точки путем преобразования координат известной точки используются следующие выражения:

- при переносе точки  $M_1(x_1, y_1, z_1)$ , то есть изменении ее координат на величины  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , координаты точки  $M_2(x_2, y_2, z_2)$  вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} x_1 + \Delta x &= x_2; \\ y_1 + \Delta y &= y_2; \\ z_1 + \Delta z &= z_2. \end{aligned} \quad (7)$$

- при повороте точки  $M_1(x_1, y_1, z_1)$  вокруг оси  $Z$  на угол  $\varphi$  координаты точки  $M_2(x_2, y_2, z_2)$  вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} x_1 \times \cos \varphi - y_1 \times \sin \varphi &= x_2; \\ x_1 \times \sin \varphi + y_1 \times \cos \varphi &= y_2; \\ z_1 &= z_2. \end{aligned} \quad (8)$$



Предлагаемая методика расчета максимально приближена к процессу реального накопления погрешностей при возведении сооружений и потому имеет преимущества по сравнению с другими способами определения отклонений. Кроме того, как сказано выше, данная методика реализована в ВК PASC (рис. 9).

Номер	X	Y	Z
1	0	-963,855	0
2	502,349	-481,927	666,639
3	502,349	-1445,782	666,639
4	1060,887	-963,855	1286,959
5	2329,135	-963,855	2370,145
6	1671,365	-481,927	1856,238
7	1671,365	-1445,782	1856,238
8	5311,06	-963,855	3840,721
9	4521,814	-481,927	3568,961
10	4521,814	-1445,782	3568,961
11	3759,257	-963,855	3229,449
12	3029,192	-481,927	2824,768
13	3029,192	-1445,782	2824,768

Номер	узел	узел	усил.	закон	парам. 1	парам. 2	брак	закон з.
0	109	3		0	0	0	1	0
0	1	3		0	0	0	1	0
0	109	110		0	0	0	1	0
0	3	110		0	0	0	1	0
0	1	2		0	0	0	1	0
0	3	2		0	0	0	1	0
0	110	111		0	0	0	1	0
0	3	111		0	0	0	1	0
0	2	4		0	0	0	1	0
0	3	4		0	0	0	1	0

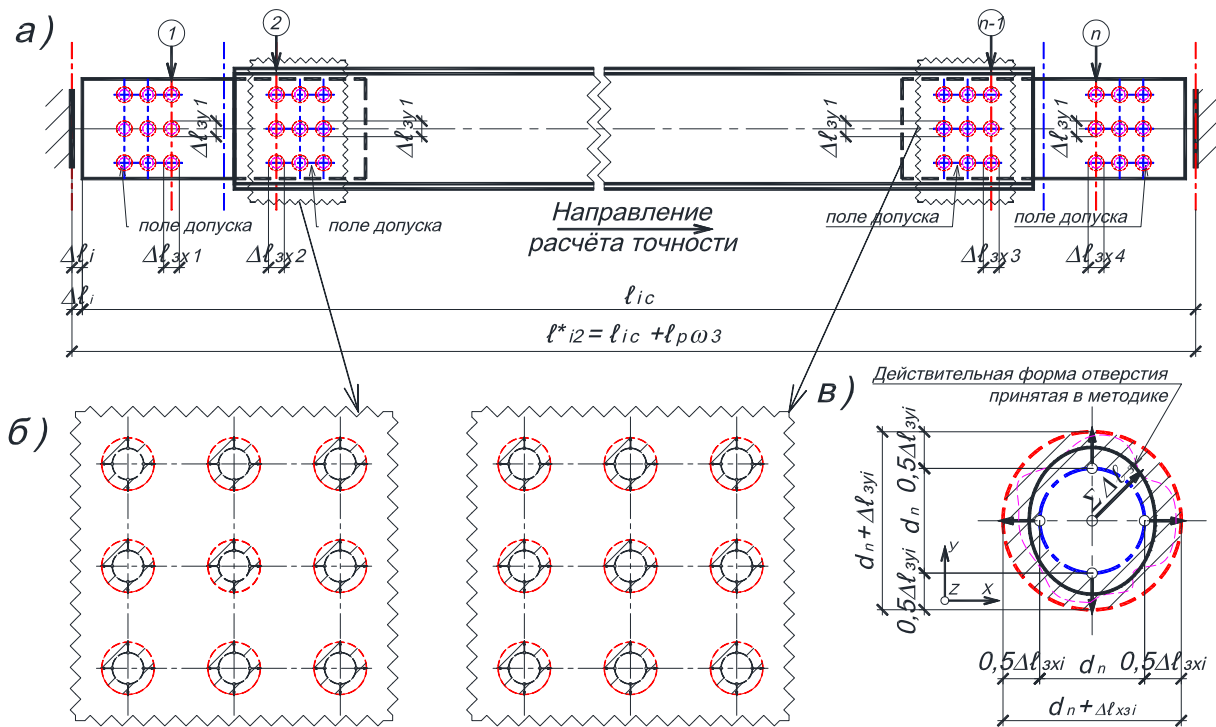
Рисунок 9. Диалоговое окно задания исходных данных в ВК PASC

#### 4. Пример расчета точности однопоясной оболочки с многоболтовыми стыками

Рассмотрим предлагаемую методику на примере определения погрешностей изготовления и монтажа металлической однопоясной оболочки покрытия цилиндрической формы. Сборка однослойной стержневой цилиндрической оболочки выполняется, как правило, поэлементно на подмостях в продольном или поперечном направлении. Рассмотрим продольную и поперечную последовательности поэлементной сборки оболочки. Расчет точности выполняется в следующем порядке:

- определение геометрических размеров объекта;
- определение координат номинальной геометрии системы;
- определение линейных размеров элементов системы;
- ввод координат узлов номинальной расчетной схемы;
- назначение допусков в соответствии с выбранным классом;
- собственно расчет точности.

Схема стержня однопоясной оболочки с многоболтовым соединением на накладках приведена на рисунке 10. Будем считать, что отклонение отверстия  $\Delta l_3 = 2$  мм. Для первого класса точности изготовления конструкции  $\Delta l_1 = 5$  мм. Зазоры в остальных отверстиях по направлению сборки (соединения стыков) можно определить по аналогии с формулой 3. В нашем примере (рис. 11) будет 4 таких расчетных отклонения, величина суммарного отклонения  $\Sigma \Delta l_3 = 4 \times 2 = 8$  мм.



**Рисунок 10. Схема стержня с многоболтовым соединением (n отправочных марок):**  
**а) конструктивное решение стержня; б) схема расположения отверстий;**  
**в) возможные формы отверстий**

Чтобы учесть совместность накопления отклонений, которые вызваны отклонением формы отверстия относительно оси  $x$ ,  $y$  по представленной модели размерной цепи (рис. 8б), нужно воспользоваться формулой 2 методики и получить  $\Delta l_p = 6.4$  мм. Пример: величина  $\omega_2 = 0.6$  – из формулы 2. Следовательно,  $\Delta l_p$  – предельная величина отклонения, как для метода минимум–максимум, учитывающая только случайный характер угловой составляющей отклонения. Для перехода к вероятностному методу нужно генерировать случайное значение и  $\Delta l_p$ , так как  $\Delta l_i$  – тоже случайная величина. Поэтому величину результирующего отклонения  $\Delta l_p$  совместно с номинальной длиной стержня можно представить как в формуле 3.

В качестве примера примем  $\omega_3 = -0.7$  – из формулы 3. Номинальную длину стержня  $l_{ic}$  примем  $0.935$  м =  $935$  мм – как для оболочки на рисунке 2. Значит, возможный размер отдельного стержня однопопоясной оболочки с учетом результирующего отклонения  $l^*_{i2} = 930.52$  мм. Рассмотрим однопопоясную металлическую оболочку цилиндрической формы радиусом  $R = 10$  м, которая образована из последовательно соединенных в поперечном направлении  $N = 11$  монтажных элементов, угол раскрытия образующей  $\varphi = 110^\circ$ . Длина отдельного стержня оболочки составляет  $935$  мм. Сеть оболочки в плане образована равносторонними треугольниками. Схема в плане рассматриваемой оболочки с указанием замыкающих стержней при продольной сборке представлена на рисунке 11.

В таблице 1 даны среднеквадратические отклонения некоторых узлов вдоль оси  $x$  ( $dX$ ),  $y$  ( $dY$ ),  $z$  ( $dZ$ ) для продольной схемы сборки, а для поперечной схемы сборки – в таблице 2. При сборке оболочки образуется по 80 замыкающих стержней. В таблицах даны замыкающие стержни, в которых линейные погрешности максимальны. Предельные линейные отклонения замыкающих стержней при продольной сборке составляют  $88...91$  мм (монтаж) и  $16...17$  мм (изготовление). Предельные значения возможных отклонений действительных размеров замыкающих стержней от номинала при продольной сборке находятся в интервале  $5...30$  мм – 15 шт.,  $30...60$  – 26 шт.,  $60...114$  – 39 шт. (монтаж),  $1...10$  мм – 39 шт.,  $10...17$  мм – 41 шт. (изготовление). При поперечной сборке расположение замыкающих стержней в оболочке иное (рис. 12). Предельные линейные отклонения замыкающих стержней при поперечной сборке составляют  $52...55$  мм (монтаж) и  $8...9$  мм (изготовление). Предельные значения возможных отклонений действительных размеров замыкающих стержней от номинала при поперечной сборке:  $3...30$  мм – 29 шт.,  $31...55$  мм – 51 шт. (монтаж),  $1...5$  мм – 38 шт.,  $6...9$  мм – 42 шт.

Таблица 1. – Предельные отклонения при продольной сборке, мм

Узел	dX	dY	dZ	Стержень	$\Delta x_{\max}$	Узел	dX	dY	dZ	Стержень	$\Delta x_{\max}$
Монтаж						Изготовление					
1	9.8	70.3	4.3	1	88.3	1	1.5	11.2	0.6	1	16.7
2	6.9	111.1	9.2	2	90.8	2	1.1	17.5	1.5	2	16.9
3	7.4	111.0	9.8	3	90.5	3	1.1	17.5	1.5	3	17.3

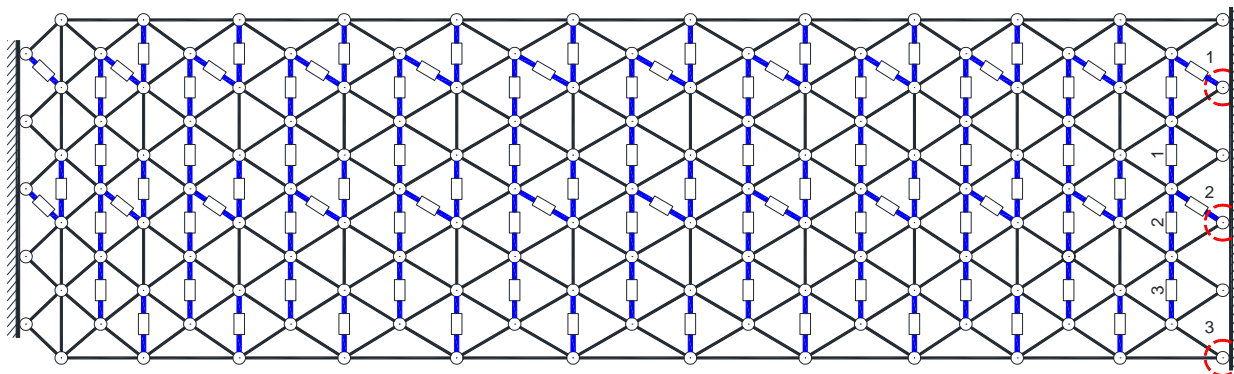


Рисунок 11. Схема оболочки при продольной сборке

Таблица 2. Предельные отклонения при поперечной сборке, мм

Узел	dX	dY	dZ	Стержень	$\Delta x_{\max}$	Узел	dX	dY	dZ	Стержень	$\Delta x_{\max}$
Монтаж						Изготовление					
1	8.3	20.9	3.7	1	52.3	1	1.3	3.8	0.8	1	8.1
2	4.4	32.0	4.9	2	52.9	2	0.7	5.0	0.8	2	8.4
3	6.1	31.5	8.1	3	54.7	3	0.9	4.9	1.3	3	8.7

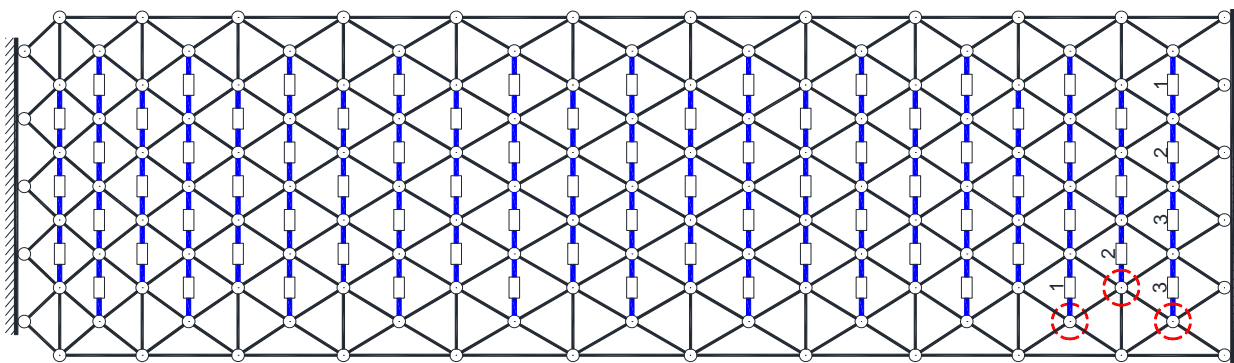


Рисунок 12. Схема оболочки при поперечной сборке

### Выводы

1. Разработана новая методика расчета точности шарнирно-стержневых большепролетных пространственных металлических покрытий в вероятностной постановке, которая позволяет учесть отклонения длин стержней, положение центров отверстий, форму отверстий и последовательность сборки.

2. Разработаны и реализованы алгоритм и программа Вычислительный Комплекс «Размерный Анализ Стержневых Конструкций» (ВК РАСК) для расчета точности шарнирно-стержневых большепролетных пространственных металлических покрытий в вероятностной постановке (авторское свидетельство №47952).

3. Последовательность сборки однопоясной цилиндрической стержневой оболочки в конструктивную форму оказывает существенное влияние на схему расположения замыкающих

стержней и величины отклонений узлов и стержней. Сборочные отклонения, полученные из расчета точности цилиндрической оболочки в МК ПАСК, могут быть использованы при оценке НДС оболочки и служить основой для разработки конструктивных и других мероприятий, повышающих несущую способность оболочки.

## Литература

1. Гарифуллин М.Р., Семенов С.А., Беляева С.В., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н., Семенов А.А. Поиск рациональной геометрической схемы пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооружения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. Т. 2. №17. С. 107–124.
2. Колесников Г.Н. Статический расчет и формообразование несущих каркасов сетчатых оболочек: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону: РГСУ, 1982. 21 с.
3. Савельев В.А. Теоретические основы проектирования металлических куполов: автореферат дисс. ... докт. техн. наук. М.: ЦНИИСК им. Мельникова, 1995. 40 с.
4. Гвамичава А.С. Разработка и внедрение конструктивных форм и методов расчета крупногабаритных космических антенных сооружений: автореферат дисс. ... д-ра техн. наук. М.: ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, 1984. 57 с.
5. Абусамра Авад Юсиф А. Влияние начальных несовершенств конструкций двухъярусных сетчатых куполов на их несущую способность: дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2006. 148 с.
6. Моисеев М.В. Начальные усилия и собираемость стальных структурных конструкций при случайных отклонениях длин стержней: дисс. ... канд. техн. наук / Казань: КГАСА, 2004. 164 с.
7. Кирсанов М.Н. Индуктивный анализ влияния погрешностей монтажа на жесткость и прочность плоской фермы // Инженерно-строительный журнал. 2012. №5. С. 38–42.
8. Sonmez M. Artificial bee colony algorithm for optimization of truss structures // Applied Soft Computing. 2011. Vol. 11. Pp. 2406–2418.
9. Kim H.S., Shin A.K. Column shortening analysis with lumped construction sequence // Procedia Engineering. 2011. Vol. 14. Pp. 1791–1798.
10. Preumont A. *Vibration control of active structures: an introduction*. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers. 2002. 385 p.
11. Pearson J.E., Hansen S. Experimental Studies of a Deformable-Mirror Adaptive Optical System // Journal of Optical Society America. 1977. №67. Pp. 360–369.
12. Ватин Н.И., Кузнецов В.Д., Недвига Е.С. Учет погрешностей монтажа при расчете крупнопанельных зданий // Инженерно-строительный журнал. 2011. №6. С. 35–40.
13. Сно В.Е. Влияние геометрических погрешностей сборных каркасов на работу конструкций многоэтажных зданий: диссертация на соискание ученой степени кандидат технических наук / ЦНИИЭП ТБЗиТК. М., 1981. 164 с.
14. Белостоцкий А.М., Павлов А.С. Комплексное конечноэлементное моделирование НДС и устойчивости сетчатой оболочки покрытия большепролетного сооружения с эластомерными опорами // International journal for computational civil and structural engineering. 2014. Vol. 10(3). С. 64–70.
15. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В. Учет изменения жесткостей элементов в процессе монтажа и эксплуатации // Инженерно-строительный журнал. 2015.

## References

1. Garifullin M.R., Semenov S.A., Belyaev S.V., Poryvaev I.A., Safiullin M.N., Semenov A.A. Poisk ratsionalnoy geometricheskoy skhemy prostranstvennoy metallicheskoj konstruksii pokrytiya bolsheproletnogo sportivnogo sooruzheniya [The search of rational shape of spatial metal roof of longspan sport arena]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. Vol. 2. Pp. 107–124. (rus)
2. Kolesnikov G.N. *Staticheskiy raschet i formoobrazovaniye nesushchikh karkasov setchatykh obolochek* [Static calculations and formation of base plates lattice shells]: Ph.D. thesis in Engineering Science. Rostov-on-Don. 1982. 21 p. (rus)
3. Savelev V.A. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya metallicheskih kupolov*. [Theoretical bases of designing of metal domes]: Doctoral Dissertation abstract. Moscow. 1995. 40 p. (rus)
4. Gvamichava A.S. *Razrabotka i vnedrenie konstruktivnykh form i metodov rascheta krupnogabaritnykh kosmicheskikh antenykh sooruzhenij*. [Development and intercalation of design shapes and method of analysis of large-sized space antenna constructions]: Doctoral Dissertation abstract. Moscow. 1984. 57 p. (rus)
5. Abusamra Attalman A. *Vlijanie nachal'nykh nesovershenstv konstrukcij dvuhjarysnykh setchatykh kupolov na ih nesushhuju sposobnost'*: dissertacija kandidata tehniceskikh nauk [Influence of initial imperfections designs of two-mesh domes on their load-carrying capacity]: Ph.D. Dissertation. Rostov-on-Don. 2006. 148 p. (rus)
6. Moiseev M.V. *Nachal'nye usiliya i sobiraemost' stal'nykh strukturnykh konstruksij pri sluchajnykh otkloneniyakh dlin stержней* [Initial efforts and collection of steel structural designs at random deviations of the lengths of rods] Ph.D. Dissertation. Kazan. 2004. 164 p. (rus)
7. Kirsanov M.N. Induktivnyj analiz vliyaniya pogreshnosti montazha na zhestkost' i prochnost' ploskoj fermy [Inductive analysis of the effect of error mounting on the stiffness and strength of a plane truss]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 5. Pp. 38–42. (rus)
8. Sonmez M. Artificial bee colony algorithm for optimization of truss structures. *Applied Soft Computing*. 2011. Vol. 11. Pp. 2406–2418.
9. Kim H.S., Shin A.K. Column shortening analysis with lumped construction sequence. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 14. Pp. 1791–1798.
10. Preumont A. *Vibration control of active structures: an introduction*. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow. Kluwer Academic Publishers. 2002. 385 p.
11. Pearson J.E., Hansen S. Experimental Studies of a Deformable-Mirror Adaptive Optical System. *Journal of Optical Society America*. 1977. No. 67. Pp. 360–369.
12. Vatin N.I., Kuznetsov V.D., Nedviga E.S. Uchet pogreshnostej montazha pri raschete krupnopanельnykh zdaniy [Accounting installation errors in the calculation of large-panel buildings]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 6. Pp. 35–40. (rus)
13. Sno V.E. *Vlijanie geometricheskikh pogreshnostej sbornykh karkasov na rabotu kon-struksij mnogoetazhnykh zdaniy* [The influence of geometrical errors of prefabricated scaffolds for construction of multi-storey buildings work]: Ph.D. Dissertation. Moscow. 1981. 164 p. (rus)
14. Belostockij A.M., Pavlov A.S. Kompleksnoe

Bondarev A.V., Yugov A. Metodika rascheta tochnosti bolsheproletnykh sharnirno-sterzhnevnykh metallicheskih pokrytij [The method of calculating the accuracy of large-span metal rod systems]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 1. Pp. 60–73. doi: 10.5862/MCE.61.6

- №1. С. 6–14.
16. Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Modeling Transition in Design Model when Analyzing Specific Behaviors of Structures. // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57. Pp. 479–488.
  17. Барабаш М.С. Методы компьютерного моделирования процессов возведения высотных зданий // *International journal for computational civil and structural engineering*. 2012. Vol. 8. No. 3. Pp. 58–67.
  18. Бондарев А.Б. Сборочные отклонения в шарнирно-стержневом металлическом покрытии // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. Т. 30. №3. С. 98–110.
  19. Бондарев А.Б. Оценка монтажных воздействий в однополосной стержневой металлической оболочке покрытия цилиндрической формы // *Вестник ДонНАСА*. 2013. Т. 104. №6. С. 54–59.
  20. Бондарев А.Б., Югов А.М. Оценка монтажных усилий в металлическом покрытии с учетом сборки // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. №4. С. 28–37.
  21. Бондарев А. Б., Югов А.М. Определение и анализ сборочных отклонений в металлическом каркасе большепролетного сооружения с купольным покрытием // *International journal for computational civil and structural engineering*. 2015. Vol. 11. No. 1. Pp. 90–96.
  22. Лебедь Е.В. Прогнозирование погрешностей возведения большепролетных металлических куполов на основе геометрического моделирования их монтажа: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 1988. 15 с.
  23. Лебедь Е.В., Григорян А.А. Влияние монтажных расчетных схем ребер двухполосного металлического купола на начальные усилия при устранении погрешностей // *Вестник МГСУ*. 2015. №8. С. 66–79.
  24. Лебедь Е.В., Григорян А.А. Начальные усилия в двухполосных металлических куполах из-за погрешностей изготовления и монтажа их конструкций // *Вестник МГСУ*. 2015. №4. С. 69–79.
  25. Кашуба Л.А. Геометрия сборки недеформируемых деталей // *Системный анализ в науке и образовании: электронный научный журнал*. 2011. №4. С. 1–8.
  26. Бондарев А.Б., Югов А.М. А.с. 47952 Украина. Компьютерная программа «Вычислительный комплекс «Размерный анализ стержневых конструкций» («ВК РАСК»). № 48382; заявлено 20.12.2012; опубликовано 20.02.2013, Бюллетень №1. 2 с.
  27. Исаев С.В. Методика оценки линейной модели пространственной размерной цепи для обеспечения взаимозаменяемости объектов производства при сборке: дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 204 с.
  28. Шаломеенко М.А. Размерный анализ в Solid Works. // САПР и графика. Инструменты АРМ. 2010. №10. С. 40–42.
  29. Farrar C.R., Worden K., Todd M.D., Park G., Nichols J., Adams D.E., Bement M.T., Farinholt K. Impacts of artificial intelligence and optimization on design, construction and maintenance. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2007. 143 p.
  30. Gantes C.J., Connor J.J., Lwxher R.D., Rosenfeld Y. Structural analysis and design of deployable structures // *Computers and Structures*. 1989. Vol. 32(3-4) Pp. 661–669.
  31. Gaul L., Albrecht H., Wirtitzer J. Semi-active friction damping of large space truss structures // *Shock and Vibration*. 2004. Vol. 11. Pp. 173–186.
  32. Hasan R., Xu L., Grierson D.E. Push-over analysis for performance-based seismic design // *Computers and Structures*. 2002. №80. Pp. 2483–2493.
  33. Kartal M.E., Basaga H.B., Bayraktar A., Muvafik M. Effects of semi-rigid connection on structural responses // *International journal for computational civil and structural engineering*. 2012. Vol. 8. No. 3. Pp. 58–67.
  34. Bondarev A.B., Yegov A.M. Metodika rascheta tochnosti bol'sheproletnykh sharniirno-sterzhnevyykh metallicheskiykh pokrytiy // *Инженерно-строительный журнал*. 2016. №1(61). С. 60–73.
  35. konechnojelementnoe modelirovanie NDS i ustojchivosti setchatoy obolochki pokrytija bol'sheproletnogo sooruzhenija s jelastomernymi oporami [Complex finite element simulation of stress-strain state and stability of braced shell with elastomeric bearings] // *International journal for computational civil and structural engineering*. 2014. Vol. 10. Pp. 64–70. (rus)
  36. Perelmuter A.V., Kabancev O.V. Uchjot izmenenija zhestkostej jelementov v processe montazha i jekspluatacii [Accounting for the elements stiffness change in the course of erection and operation]. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. No. 1. Pp. 6–14. (rus)
  37. Kabantsev O., Perelmuter A. Modeling Transition in Design Model when Analyzing Specific Behaviors of Structures. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57. Pp. 479–488.
  38. Barabash M.S. Metody komp'juternogo modelirovanija processov vozvedenija vysotnyh zdaniy [The methods of computer simulation erection process of high-rise buildings]. *International journal for computational civil and structural engineering*. 2012. Vol. 8. No. 3. Pp. 58–67. (rus)
  39. Bondarev A.B. Sborochnye otkloneniya v sharnirosterzhnevom metallicheskom pokrytii [The deviations in assembly hinged-rod metal coating]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015. Vol. 30. No. 3. Pp. 98–110. (rus)
  40. Bondarev A. B. Ocenka montazhnyh vozdeystvij v odnopojasnoj sterzhnevoj metallicheskoj obolochki pokrytija cilindricheskoj formy [Mechanical impact assessment in odnopoyasnoy rod metal shell cover cylindrical shape] // *Proceeding of the DonNACEA*. 2013. Vol. 104. No. 6. Pp. 54–59. (rus)
  41. Bondarev A.B., Yegov A.M. Ocenka montazhnyh usilij v metallicheskom pokrytii s uchjotom sborki [Evaluation of installation efforts in metal coatings, allowing for assembly process]. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. No. 4. Pp. 28–37. (rus)
  42. Bondarev A. B., Yegov A.M. Opredelenie i analiz sborochnyh otklonenij v metallicheskom karkase bol'sheproletnogo sooruzheniya s kupol'nym pokrytiem [Identification and analysis of deviations in the assembly-span metal framework structures with dome cover]. *International journal for computational civil and structural engineering*. 2015. Vol. 11. No. 1. Pp. 90–96. (rus)
  43. Lebed E.V. *Prognozirovanie pogreshnostej vozvedenija bol'sheproletnykh metallicheskiykh kupolov na osnove geometricheskogo modelirovanija ih montazha* [Prediction errors in the construction of large-span metal dome based on geometric modeling of their installation]: Ph.D. thesis in Engineering Science. Moscow. 1988. 15 p. (rus)
  44. Lebed E.V., Grigorjan A.A. Vlijanie montazhnyh raschetnyh shem reber dvuhpoyasnogo metallicheskoj kupola na nachal'nye usilija pri ustranении pogreshnostej [Influence of assembly analytical models of the ribs of a double-layer metal dome on the initial forces in case of elimination of imperfections]. *Vestnik MGSU*. 2015. No. 8. Pp. 66–79. (rus)
  45. Lebed E.V., Grigoryan A.A. Nachal'nye usilija v dvukhpoyasnykh metallicheskiykh kupolakh iz-za pogreshnostej izgotovleniya i montazha ikh konstruksiy [Initial stresses in two-layer metal domes due to imperfections of their production and assemblage]. *Vestnik MGSU*. 2015. No. 4. Pp. 69–79. (rus)
  46. Kashuba L.A. Geometriya sborki nedeformiruyemykh detaley [Deformable geometry of the assembly parts]. *System analysis in science and education. Electronic scientific journal*. 2011. No. 4. Pp. 1–8. (rus)
  47. Bondarev A.B., Yegov A.M. A. s. 47952 Ukraine. Computer program "Computing system "Dimensional analysis of frame structures"» («CS DAFS») (Ukraine). № 48382; preference, 20.12.2012; published, 20.02.2013, Ballot papers № 1. 2 p. (ua)
  48. Isaev S.V. *Metodika otsenki lineynoy modeli*

- Electronic Journal of Structural Engineering. 2010. Vol. 10. Pp. 22–35.
34. Kaveh A., Nouri M. Weighted graph products for configuration processing of planar and space structures // *International Journal of Space Structures*. 2009. Vol. 24(1). Pp. 13–26.
  35. Matsumoto K., Wakabayashi S., Noumi M., Yoshida T., Ueno H., Fukase Y. Space Truss Handling Experiment on ETS-VII // *Automation and Robotics in Construction XVI. UC3M*. 1999. Pp. 225–230.
  36. Kelesoglu Ö., Ülker M. Fuzzy optimization of geometrical nonlinear space truss design // *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2005. Vol. 80(5). Pp. 321–329.
  - prostranstvennoy razmernoy tsepi dlya obespecheniya vzaimozamenyayemosti obyektov proizvodstva pri sborke* [Methodology to evaluate the linear model of the spatial dimension chain to ensure interchangeability of production facilities for assembly]. Ph.D. Dissertation. Moscow. 2007. 204 p. (rus)
  28. Shalomeenko M.A. Razmernyj analiz v Solid Works [Dimensional Analysis in Solid Works]. *CAD and graphics. Tools APM*. 2010. No. 10. Pp. 40–42. (rus)
  29. Farrar C. R., Worden K., Todd M. D., Park G., Nichols J., Adams D.E., Bement M.T., Farinholt K. *Impacts of artificial intelligence and optimization on design, construction and maintenance*. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos. National Laboratory. 2007. 143 p.
  30. Gantes C.J., Connor J.J., Lwxher R.D., Rosenfeld Y. Structural analysis and design of deployable structures *Computers and Structures*. 1989. Vol. 32 Pp. 661–669.
  31. Gaul L., Albrecht H., Wirtzner J. Semi-active friction damping of large space truss structures. *Shock and Vibration*. 2004. Vol. 11. Pp. 173–186.
  32. Hasan R., Xu L., Grierson D. E. Push-over analysis for performance-based seismic design. *Computers and Structures*. 2002. No. 80. Pp. 2483–2493.
  33. Kartal M.E., Basaga H.B., Bayraktar A., Muvafik M. Effects of semi-rigid connection on structural responses. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2010. Vol. 10. Pp. 22–35.
  34. Kaveh A., Nouri M. Weighted graph products for configuration processing of planar and space structures. *International Journal of Space Structures*. 2009. Vol. 24. Pp. 13–26.
  35. Matsumoto K., Wakabayashi S., Noumi M., Yoshida T., Ueno H., Fukase Y. Space Truss Handling Experiment on ETS-VII. *Automation and Robotics in Construction XVI. UC3M*. 1999. Pp. 225–230.
  36. Kelesoglu Ö., Ülker M. Fuzzy optimization of geometrical nonlinear space truss design. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2005. Vol. 80. Pp. 321–329.

Алексей Борисович Бондарев,  
+7(914)8645290; эл. почта:  
bondarev\_a\_b\_rus@mail.ru

Анатолий Михайлович Югов,  
+7(931)5797054; эл. почта: amyus@mail.ru

Alexey Bondarev,  
+7(914)8645290; bondarev\_a\_b\_rus@mail.ru

Anatoliy Yugov,  
+7(931)5797054; amyus@mail.ru

© Бондарев А.Б., Югов А.М., 2016