

АНАЛИЗ НАЧАЛЬНЫХ УСИЛИЙ СЕКТОРИАЛЬНО-СЕТЧАТОГО КУПОЛА ПРИ ПОЛНОСБОРНОЙ УСТАНОВКЕ В СРАВНЕНИИ СО ЗВЕЗДЧАТЫМ КУПОЛОМ

Е.В. Лебедь, В.А. Етеревский

Кафедра строительных конструкций и сооружений
Инженерный факультет
Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

На основе компьютерных исследований показан характер начальных усилий в стержнях секториально-сетчатого купола из-за деформации его несовершенной формы при полносборной установке. Выполнен сравнительный анализ возможных начальных усилий в стержнях при различных схемах начального опирания, а также при различных видах вероятностного сочетания предельных отклонений. Результаты данных исследований сравниваются с ранее полученными результатами аналогичных исследований звездчатого купола.

Ключевые слова: односетчатый купол, несовершенства формы, начальные усилия в стержнях, схема контурного опирания, деформация каркаса, компьютерная программа.

Ранее на примере звездчатого купола было показано, что при монтажной установке собранного с погрешностями каркаса неизбежно возникают начальные усилия в стержнях [1]. Это происходит из-за небольшого деформирования каркаса купола несовершенной формы под собственным весом. С целью выяснения влияния на этот процесс геометрических схем односетчатых куполов в данном материале приведены результаты аналогичных исследований с секториально-сетчатым куполом, который в отечественной литературе называли куполом схемы Чивитта.

Сведения о несовершенствах формы односетчатых куполов могут быть получены по компьютерной программе SBORKA, разработанной Е.В. Лебедем [2], в алгоритме которой заложен метод Монте-Карло. Основной задачей этой программы является многократная численная имитация сборки и монтажа каркаса односетчатого купола с целью получения данных о возможных отклонениях узлов δ_i путем вычисления статистик $m(\delta_i)$ и $\sigma(\delta_i)$.

Объектом исследования выбран металлический купол с восемью повторяющимися сетчатыми секторами диаметром 39 м, вписанный в сферу радиусом $R = 29$ м (рис. 1) по аналогии со звездчатым куполом [1]. Каркас насчитывает 289 узлов и собирается из 800 стержней длиной от 1,91 м до 3,24 м. В его опорном контуре 64 узла. Стержни каркаса двутавровые, аналогичные прокатному 20Ш1 ($A = 39 \text{ см}^2$) из алюминиевого сплава.

Отклонения в расстояниях между узлами задавались в соответствии с нормативными значениями допускаемых отклонений линейных размеров конструкций от номинальных значений [5]: для стержней ± 2 мм, для радиуса $R \pm 4$ мм.

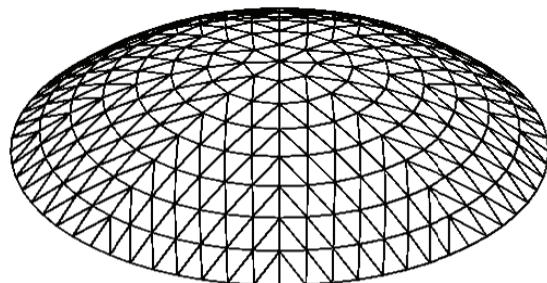


Рис. 1. Исследуемый односетчатый купол

Из-за искажения формы купола узлы его контура не могут лежать в одной плоскости и в начальный момент времени полносборной установки опираются только на три узла, а остальные узлы нависают над опорной плоскостью, образуя зазоры. Ранее выполненные исследования по программе SBORKA позволили получить сведения о вероятных схемах начального опирания односетчатых куполов при полносборной установке [3], а также о характере распределения отклонений узлов опорного контура [4].

Также как и для звездчатого купола [1], для секториально-сетчатого купола задавались три вида треугольников начального опирания с условными названиями «равносторонний», «прямоугольный» и «островершинный» (рис. 2). Распределение зазоров в узлах опорного контура также представлялось как нормальное с односторонним ограничением интервала (рис. 3). Вычисленные статистики опорных узлов $m(\delta_i)$ и $\sigma(\delta_i)$ соответствовали статистикам m_o и σ_o ограниченного нормального распределения [4]. Наибольшая величина зазора определяется как сумма математического ожидания m_o и предельного отклонения $[\delta_o]$.

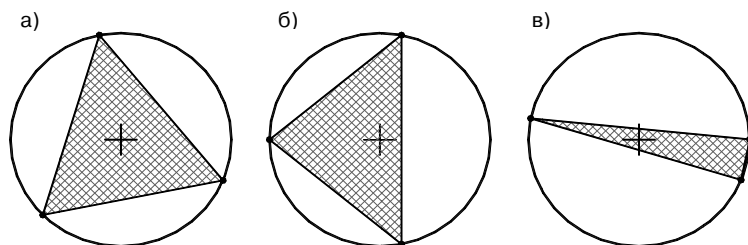


Рис. 2. Различные формы опорных треугольников

а) «равносторонний»; б) «прямоугольный»; в) «островершинный»

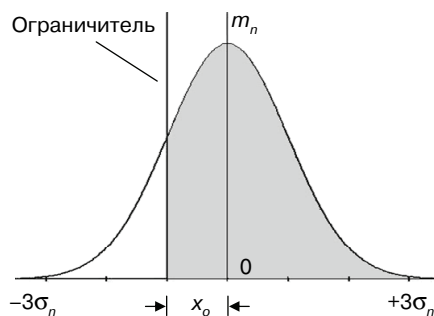


Рис. 3. Нормальное распределение с ограничением интервала

Отклонения контурных узлов на разных дугообразных участках опорного треугольника считались не зависящими друг от друга по величинам зазоров. Отклонения отдельных контурных узлов каркаса купола на каждом из участков опорного треугольника зависят друг от друга. Поэтому статистики зазоров на этих участках можно представить в виде плавных кривых, форма и подъем которых увязываются с данными статистических исследований. Для каждого участка опорного треугольника вероятность того, что отклонения от m_o в сторону увеличения зазора не превысят $[\delta_o]$, должна быть не менее $P = 0,99865$, что для нормального распределения эквивалентно значению $m_n + 3\sigma_n$. Учитывая, что зазоры на отдельных участках контура не зависят друг от друга, используем правило произведения вероятностей $P(A \cap B \cap C) = P(A) P(B) P(C)$ [6]. Вероятность совпадения максимальных зазоров на всех участках не должна быть более $P = 0,00135$, поэтому рассматриваем те же сочетания, что и в звездчатом куполе [1]. По аналогии с нормальным распределением они обозначены следующим образом:

$$3(m_n + 1,22\sigma_n) \text{ или } 3(P = 0,1112);$$

$$(m_n + 1,61\sigma_n) + 2(m_n + \sigma_n) \text{ или } (P = 0,0537) \cdot 2(P = 0,1587);$$

$$(m_n + 2,55\sigma_n) + 2m_n \text{ или } (P = 0,0054) \cdot 2(P = 0,5).$$

По компьютерной программе Е.В. Лебеда КО_NORM [4] ранее получены числовые таблицы предельных отклонений $[\delta_o]$ от m_o в диапазоне x_o от $-6\sigma_n$ до 0 с шагом ограничителя $0,025\sigma_n$ для вышеприведенных вероятностей $P(..)$. По ним построены зависимости между $[\delta_o]/\sigma_o$ и m_o/σ_o , которые использовались для назначения предельных зазоров.

Для определения статистик m_o и σ_o вероятных величин зазоров контурных узлов на разных дугообразных участках опорных треугольников (см. рис. 2) были выполнены специальные исследования по программе SBORKA. На рис. 4 представлены результаты статистических исследований зазоров контурных узлов секториально-сетчатого купола для опорных треугольников разных форм.

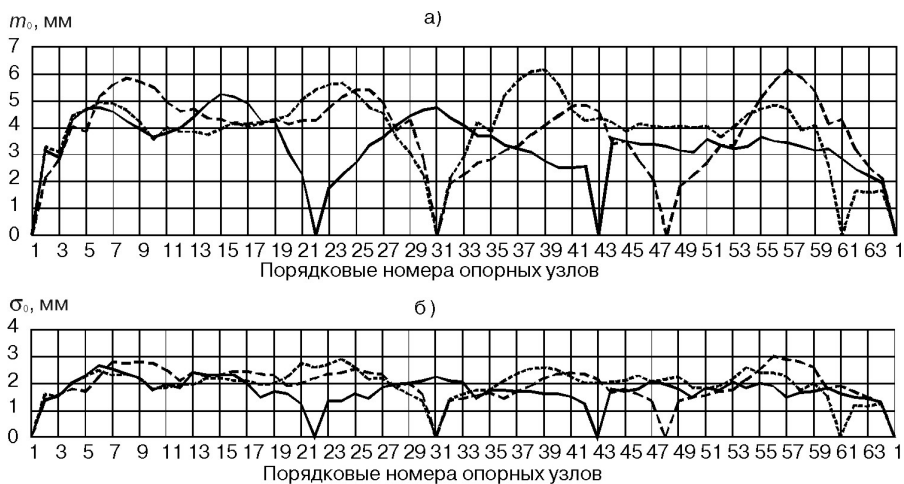


Рис. 4. Статистические данные зазоров для разных схем опорных треугольников:
 а) математическое ожидание m_o ; б) среднеквадратическое отклонение σ_o

———— «равносторонний»; - - - - - «прямоугольный»; «островершинный»

На основе представленных графиков m_o и σ_o были построены кривые максимальных зазоров на трех участках опорного контура с одинаковым и различным сочетанием предельных отклонений, но их общей вероятностью $P = 0,00135$.

Аналогично звездчатому куполу [1] влияние зазоров в узлах опорного контура на напряженное состояние каркаса секториально-сетчатого купола оценивалось для разных форм треугольников начального опирания и для разных видов вероятностного сочетаний зазоров на разных участках опорного треугольника.

В момент начального опирания по треугольной схеме под действием собственного веса каркас деформируется и зазоры в контурных узлах исчезают. Деформирование каркаса односетчатого купола сопровождается последовательным включением в работу в качестве опор новых узлов контура, что может рассматриваться как процесс быстрой смены расчетных схем. Поэтому исследование производилось путем последовательных поэтапных статических расчетов каркаса односетчатого купола на частичные действия нагрузки от собственного веса. Для этого использовалась программа ЛИРА, в которой была создана соответствующая расчетная модель исследуемого купола. На каждом отдельном этапе расчет производился на часть собственного веса каркаса, которой было достаточно для того, чтобы еще несколько контурных узлов включились в работу в качестве опор.

Исследования показали, что форма треугольника в момент начального опирания секториально-сетчатого купола, как и в звездчатом куполе, отражается на распределении усилий по стержням (рис. 5). Число опорных узлов, запрещения или разрешения их смещений в горизонтальной плоскости отражается и на распределении усилий по стержням в проектной и монтажной схемах купола (рис. 6).

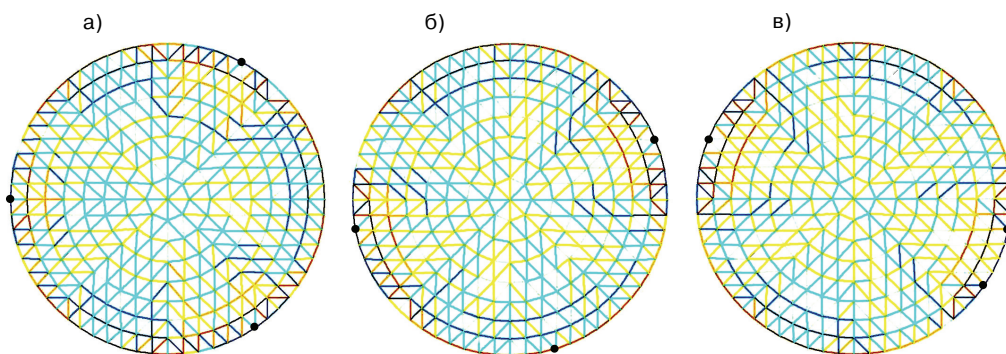


Рис. 5. Схемы распределения усилий в стержнях на 1-м этапе деформирования для разных схем опорных треугольников:
а) «равносторонний»; б) «прямоугольный»; в) «островершинный»

На рис. 7 показаны диаграммы поэтапного уменьшения максимальных зазоров при их одинаковой вероятности в процессе деформирования каркаса купола для разных форм опорных треугольников, а на рис. 8 — для «равностороннего» опорного треугольника при разных величинах максимальных зазоров и, соответственно, их разных вероятностях на отдельных участках.

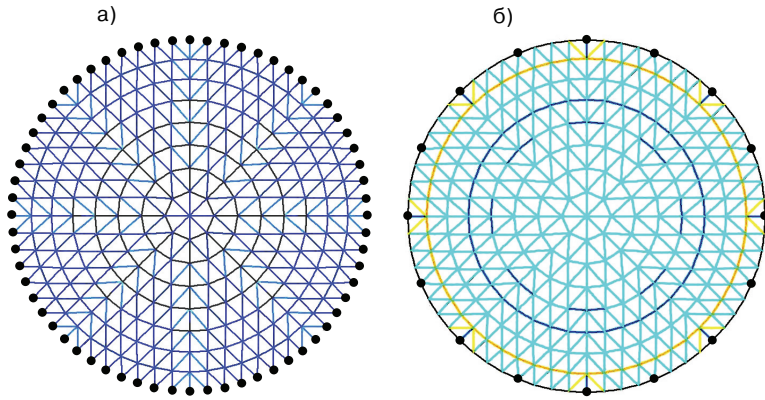


Рис. 6. Схемы распределения усилий в стержнях от собственного веса каркаса:
а) проектная схема; б) монтажная схема

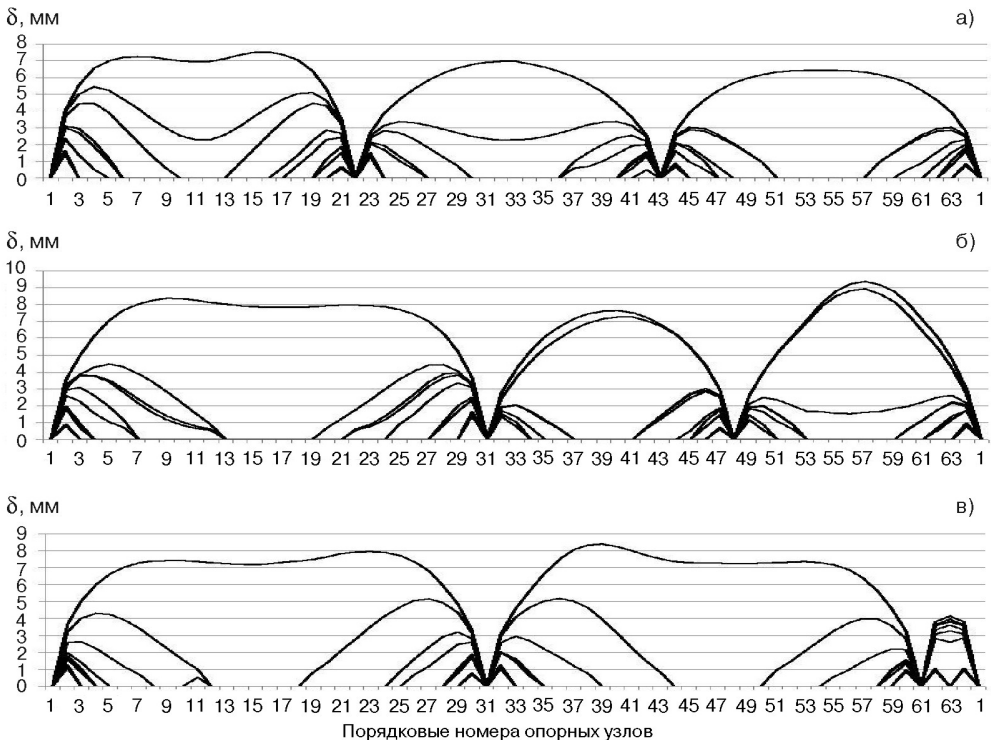


Рис. 7. Диаграммы поэтапного изменения зазоров в контурных узлах для разных схем опорных треугольников:
а) «равносторонний»; б) «прямоугольный»; в) «островершинный»

В секториально-сетчатом куполе число стержней равно 800, а в звездчатом куполе — 568 (рис. 9). Однако в связи с тем, что в секториально-сетчатом куполе использовался двутавр 20ш1, а в звездчатом куполе использовался двутавр 23ш1, по общему весу сетчатые каркасы были близки друг к другу. Вес секториально-сетчатого купола составил около 22 т, а вес звездчатого купола — 21 т. Поэтому в дальнейшем приводим сравнительные результаты исследований секториально-сетчатого купола с аналогичными результатами звездчатого купола [1].

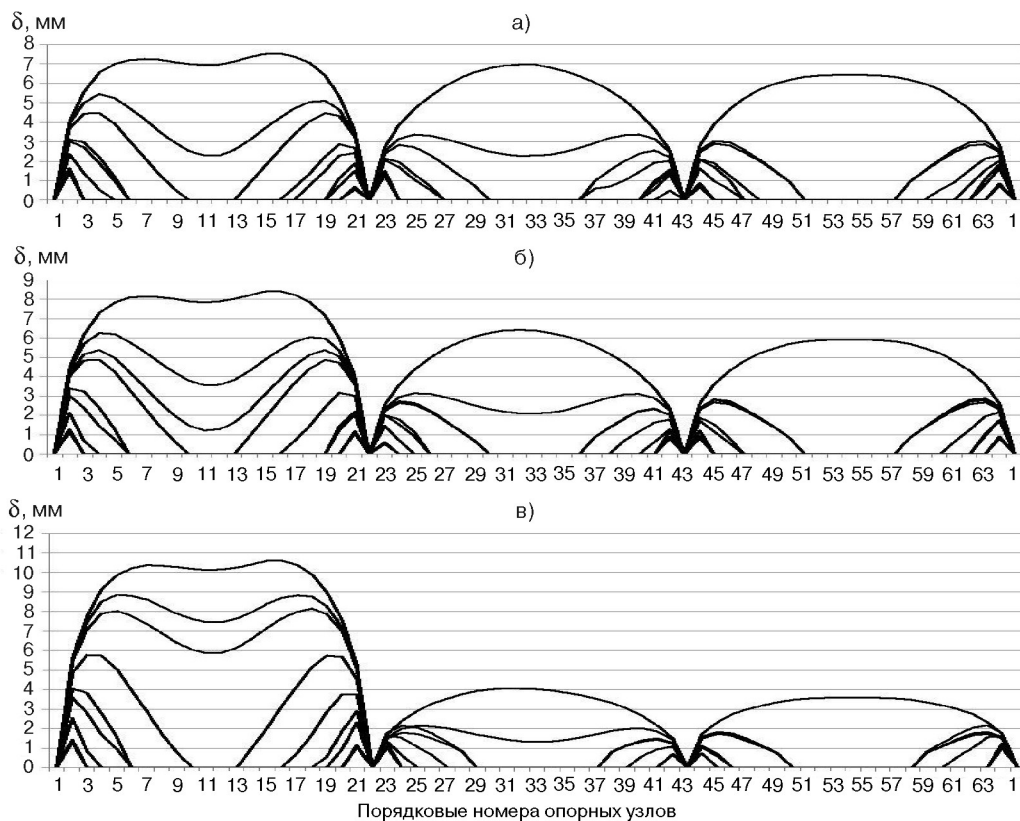


Рис. 8. Диаграммы поэтапного изменения зазоров в контурных узлах при разных величинах зазоров на участках:

а) $3(m_n + 1,22\sigma_n)$; б) $(m_n + 1,61\sigma_n) + 2(m_n + \sigma_n)$; в) $(m_n + 2,55\sigma_n) + 2 m_n$

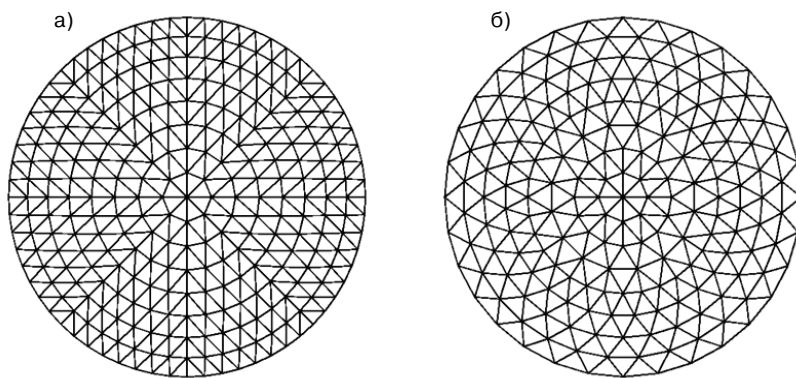


Рис. 9. Секториально-сетчатый купол (а) и звездчатый купол (б)

Исследования показали, что максимальные усилия растяжения появляются в кольцевых стержнях опорного контура во время монтажного перемещения собранного купольного каркаса. В табл. 1 приведены сравнительные данные по максимальным начальным усилиям растяжения в этих стержнях от несовершенств формы купольного каркаса относительно монтажных усилий.

Таблица 1

Сравнительные данные по растягивающим (+) начальным усилиям N_n в стержнях опорного кольца купола относительно усилий монтажной схемы N_m

Вид исследования	Формы треугольников или виды сочетаний зазоров	Секториально-сетчатый купол		Звездчатый купол	
		$k_n/k_{общ}$	N_n/N_m	$k_n/k_{общ}$	N_n/N_m
Форма опорного треугольника	Равносторонний	0,080	0,50—0,58	0,056	0,28—0,31
	Прямоугольный	0,080	0,50—0,59	0,056	0,29—0,32
	Острровершинный	0,080	0,52—0,60	0,056	0,78—0,80
Вероятные зазоры на участках	$3(m_n + 1,22\sigma_n)$	0,080	0,50—0,58	0,056	0,28—0,31
	$(m_n + 1,61\sigma_n) + 2(m_n + \sigma_n)$	0,080	0,52—0,61	0,056	0,34—0,36
	$(m_n + 2,55\sigma_n) + 2m_n$	0,080	0,56—0,65	0,056	0,22—0,24

Примечание: $k_n/k_{общ}$ — отношение числа стержней с относительно большими начальными усилиями к общему числу стержней купола.

Максимальные усилия сжатия появляются в разных местах купола и в основном зависят от формы треугольника в схеме начального опирания купола. Оценка влияния несовершенств формы рассматриваемых односетчатых куполов на начальные усилия при полносборной установке также выполнялась по относительным показателям. С целью получения наиболее достоверной информации в качественном и в количественном аспектах в расчет принимались только те стержни, усилия в которых достигали не менее 70% наибольшей величины, причем это касалось как стержней проектной схемы, так и стержней купола несовершенной формы, получающих начальные усилия. В соответствии с изложенными правилами в табл. 2 приведены сравнительные данные по наибольшим начальным усилиям сжатия в стержнях сетчатых каркасов исследуемых куполов.

Таблица 2

Сравнительные данные по наибольшим сжимающим (-) начальным усилиям N_n в стержнях сетчатого каркаса купола относительно усилий проектной схемы N_n

Вид исследования	Формы треугольников или виды сочетаний зазоров	Секториально-сетчатый купол		Звездчатый купол	
		$k_n/k_{общ}$	N_n/N_n	$k_n/k_{общ}$	N_n/N_n
Форма опорного треугольника	Равносторонний	0,268	1,54—1,98	0,173	0,26—0,40
	Прямоугольный	0,278	1,53—2,06	0,183	0,27—0,41
	Острровершинный	0,283	1,50—2,07	0,213	0,70—0,97
Вероятные зазоры на участках	$3(m_n + 1,22\sigma_n)$	0,268	1,54—1,98	0,173	0,26—0,40
	$(m_n + 1,61\sigma_n) + 2(m_n + \sigma_n)$	0,261	1,26—2,04	0,215	0,30—0,45
	$(m_n + 2,55\sigma_n) + 2m_n$	0,274	1,60—2,10	0,169	0,21—0,34

Примечание: $k_n/k_{общ}$ — отношение числа стержней с начальными усилиями $N_n \geq 0,7N_{n, \max}$, если усилия в проектной схеме $N_n \geq 0,7N_{n, \max}$, к общему числу стержней купола.

Из приведенных таблиц видно, что в стержнях секториально-сетчатого купола из-за несовершенств формы в процессе деформирования при полносборной установке возникают начальные усилия, относительные величины которых значительно превосходят начальные усилия, возникающие в стержнях звездчатого купола. Относительное число стержней, в которых возникают существенные по величине начальные усилия, в секториально-сетчатом куполе также больше.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

Исследования секториально-сетчатого купола еще раз подтвердили то, что примененная методика позволяет определить величины начальных усилий при полносборной установке односетчатых куполов с учетом вероятностного подхода к начальным несовершенствам их формы.

Начальные усилия в стержнях односетчатых куполов, возникающие в результате деформирования их несовершенных по геометрической форме каркасов при полносборной установке характеризуются усилиями, сопоставимыми с усилиями от собственного веса.

Величины начальных усилий в стержнях и количество таких стержней зависят от схем геометрического построения сеток купольных каркасов и числа узлов в их опорном контуре.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Лебедь Е.В., Етеревский В.А.* Начальные усилия в стержнях односетчатого купола из-за несовершенства его формы при полносборной установке // Научно-технический журнал Вестник МГСУ. — 2011. — № 2. — Т. 2. — С. 137—144.
- [2] *Лебедь Е.В.* Особенности численного моделирования монтажа каркаса односетчатого купола // Вестник ВолгГАСА. Серия «Строительство и архитектура». — 2003. — Вып. 3(9). — С. 81—86.
- [3] *Лебедь Е.В.* Статистический анализ схем начального опирания двух односетчатых куполов из-за погрешностей их сборки на основе численного моделирования // Вестник ВолгГАСУ. Серия «Строительство и архитектура». — 2010. — Вып. 18(37). — С. 23—28.
- [4] *Лебедь Е.В.* Характер распределения отклонений узлов опорного контура односетчатого купола при полносборной установке // Вестник ВолгГАСУ. Серия «Строительство и архитектура». — 2009. — Вып. 15(34). — С. 55—60.
- [5] *Котлов А.Ф.* Допуски и технические измерения при монтаже металлических и железобетонных конструкций. — М.: Стройиздат, 1988.
- [6] *Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В.С. Королюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин.* — М.: Наука, 1985.

ANALYSIS OF INITIAL STRESSES IN A SECTORIAL-LATTICE DOME DURING INSTALLATION AS AN ASSEMBLED STRUCTURE IN COMPARISON WITH A STAR-LATTICE DOME

E.V. Lebed, V.A. Eterevsky

Department of structural design and construction
Engineering Faculty
People's Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

The article presents the results of a computer-based research on the nature of the initial stresses in the bars of one-layer sectorial-lattice dome that arise from the deformation of the framework during its erection as a wholly assembled structure. Comparative analysis of the possible initial internal forces in the bars has been performed for various cases of the initial support, as well as for different types of probabilistic combination of tolerances. Obtained results are compared with the results of a similar research performed earlier for the star-lattice dome.

Key words: single-layer lattice dome, imperfections of form, initial bar forces, pattern of contour support, deformation of the framework, computer software.