

# Обеспечение долговременного качества купольных сооружений на основе применения сетчатых высококоресурсных конструктивно-силовых схем

## О.С. Долгов

*д.т.н., профессор, директор института  
№ 1 Московского авиационного  
института (НИУ); Москва*

*e-mail: dolgov@mai.ru*

## Т.В. Долгова

*к.т.н., доцент каф.101 Московского  
авиационного института (НИУ); Москва*

## А.М. Колпаков

*к.т.н., научный сотрудник каф.101,  
ассистент каф.104 Московского  
авиационного института (НИУ); Москва*

## В.В. Корольский

*инженер НИО-101 Московского  
авиационного института (НИУ); Москва*

**Аннотация.** В статье предложен комплексный подход к обеспечению долговременного качества сооружений за счет применения сетчатых высококоресурсных конструктивно-силовых схем при проектировании новых строений в труднодоступных районах со сложными условиями строительства и эксплуатации. Рассмотрены два типа конструктивно-силовых схем полусферических купольных сооружений, приведены результаты анализа их напряженно-деформированного состояния.

**Ключевые слова:** долговременное качество, конструктивно-силовая схема, геодезический купол, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, сетчатые оболочки.

Сетчатые конструкции получили свое широкое распространение в архитектурно-строительном направлении.

Великий русский инженер и архитектор В.Г. Шухов задал вектор в развитии строительных конструкций и технологий. Самые первые свод-

чатые сетчатые оболочки были спроектированы и построены В.Г. Шуховым в 1890 г. [1]. В 1899 г. он получил патент на изобретение «сетчатых систем» для покрытия зданий: «Привилегия Российской империи № 1896 от 12 марта 1899 года, группа XIII, Гиперболоидные конструкции (ажурная башня)» [2]. Им разработаны и внедрены в практику сетчатые поверхности в виде висячего или сводчатого покрытия, а затем в виде вертикальной несущей конструкции. Такие конструкции отличались изяществом, простотой сборки, стойкостью, надежностью, экологичностью при сравнительно небольших затратах. Они нашли самое широкое применение – мачты кораблей, башни, маяки, сооружения связи, покрытия промышленных объектов и общественных зданий. В настоящее время срок службы сохранившихся уникальных сооружений В.Г. Шухова составляет более 100 лет.

Наибольшую популярность приобрели гиперболоидные конструкции. Геометрической схемой является гиперболоид вращения из наружных и внутренних наклонных стоек, вращающихся по окружностям. Стойки связаны с горизонтальными кольцами, равномерно расположенными по высоте башни. Узлы пересечения четных и нечетных стоек и узлы крепления стоек к горизонтальным кольцам образуют треугольные ячейки, обеспечивающие геометрическую неизменяемость конструкции.

Уникальными были не только конструкции, но и технология их возведения. Башенные конструкции возводили телескопическим самоподъемным методом, когда верхние секции по очереди собирались внутри нижних и выдвигались друг на друга без лесов и подъемных кранов [3, 4].

Знаменитые архитекторы Р.Б. Фуллер и Н. Фостер внедрили сетчатые оболочки в мировую архитектуру. На сегодняшний день современные энергоэффективные сооружения с применением принципа сетчатых оболочек продолжают возводить по всему миру – небоскребы, здания аэропортов, театры, башни, стадионы, музеи.



Р.Б. Фуллер в 1965 г. получил патент на конструирование геодезических куполов. Конструкция геодезического купола имеет относительно небольшую массу при большом внутреннем пространстве, обладает большой несущей способностью, возможностью быстрого возведения и хорошей аэродинамической формой.

Известно большое количество геодезических куполов, имеющих различные технические характеристики и назначение: частные жилые объекты, складские помещения, теплицы для выращивания растений, купола планетариев и обсерваторий. Одним из наиболее известных сооружений является металлический геодезический купол антарктической станции США, который был возведен в 1975 г. и являлся основным укрытием научно-исследовательской экспедиции. Срок службы в экстремальных климатических условиях Южного полюса составил более 30 лет. Данное купольное сооружение было возведено из элементов, изготовленных в заводских условиях, доставленных авиационным транспортом. Как известно, в строительстве существует постулат о том, что увеличение веса конструкции строения не ведет к ухудшению его эксплуатационных характеристик. Однако условия транспортирования в удаленные регионы значительно изменяют подход к проектированию зданий и сооружений, вводя дополнительные ограничения по массе. В связи с этим в качестве материала конструкции в данном случае был использован алюминий.

В соответствии со «Стратегией научно-технологического развития РФ от 01.12.2016 г.», одним из основных вызовов является «...необходимость эффективного освоения и использования пространства, в том числе путем преодоления диспропорций в социально-экономическом развитии территории страны, а также укрепление позиций России в области экономического, научного и военного освоения космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики». Возникает острая необходимость в повышении эффективности новых строений в удаленных районах, к которым относятся Арктика и Антарктика. Она может быть обеспечена: сокращением затрат за счет экономии материалов; снижением условий транспортирования элементов конструкции к месту возведения сооружения; снижением трудозатрат за счет готовых модулей, произведенных в заводских условиях; сокращением затрат на обеспечение функционирования объектов, в том числе на отопление.

Одной из энергоэффективных форм пространственных конструкций является геодезический купол. На сегодняшний день в основном при проектировании таких куполов полусферической формы

применяется ставшая классической конструктивно-силовая схема (КСС), разработанная Р.Б. Фуллером (рис. 1).

К ее недостаткам можно отнести большое количество элементов, имеющих различную длину, что подразумевает необходимость изготовления большого парка технологической оснастки. При возведении каждого ряда конструкции такого типа необходимо производить установку элементов различной длины в определенной последовательности, что значительно усложняет процесс сборки.

В альтернативной КСС (рис. 2), разработанной сотрудниками кафедры № 104 Московского авиационного института, в отличие от классической сформированы явно выраженные горизонтальные пояса, равномерно расположенные по высоте, что дает преимущества в трех аспектах: прочностном (предпосылка к лучшему восприятию эксплуатационных нагрузок); технологическом (обеспечение возможности визуального контроля правильности сборки при возведении конструкции); конструктивном (унификация элементов конструкции в горизонтальных рядах).

Рассмотрим сегменты каждого типа КСС. На рис. 3 и 4 показаны сегменты классической и альтернативной КСС с указанием количества типов элементов по рядам.

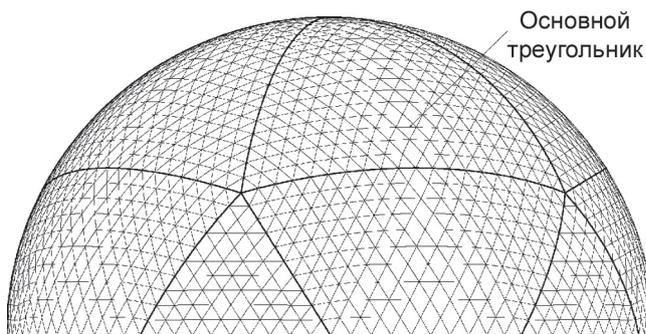


Рис. 1. Классическая конструктивно-силовая схема геодезического купола полусферической формы

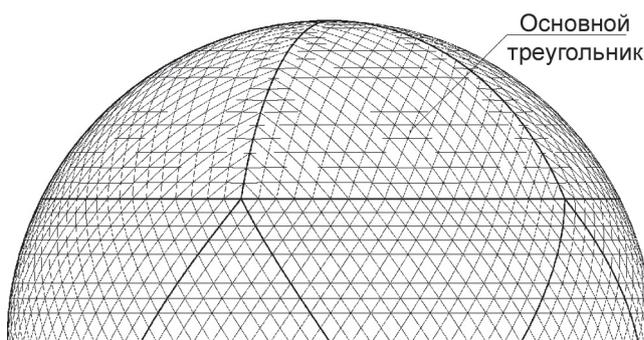


Рис. 2. Альтернативная конструктивно-силовая схема геодезического купола полусферической формы

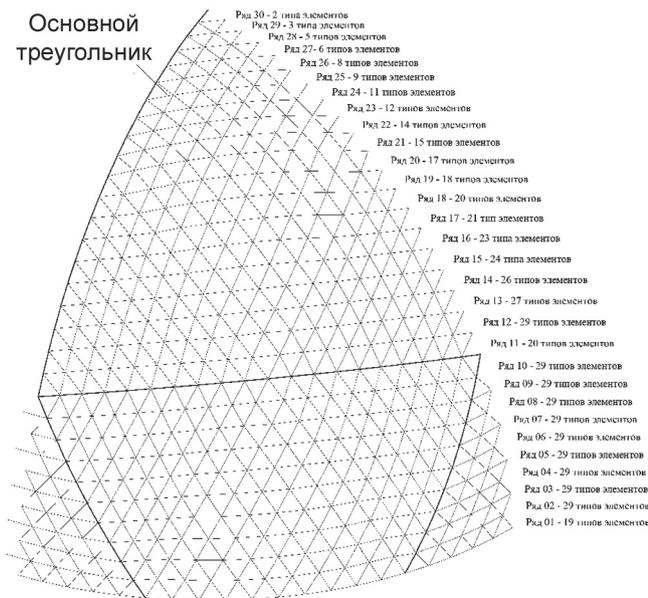


Рис. 3. Сегмент классической конструктивно-силовой схемы с указанием количества типов элементов по рядам

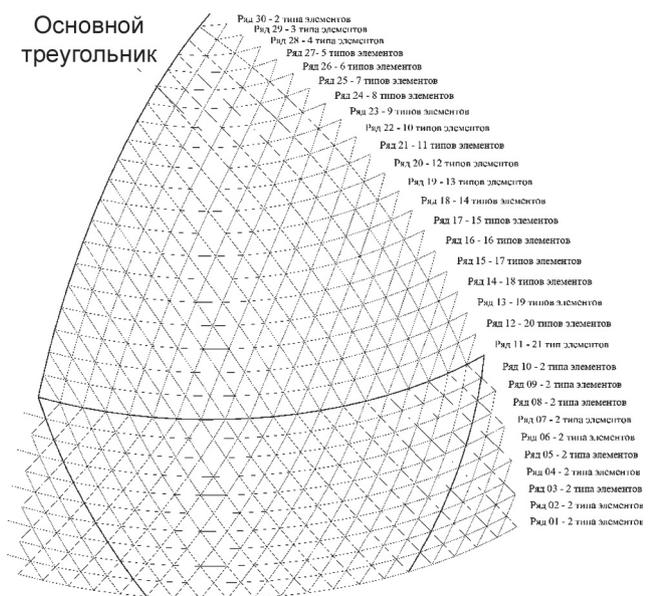


Рис. 4. Сегмент альтернативной конструктивно-силовой схемы с указанием количества типов элементов по рядам

На рис. 5 представлена количественная сводка типов элементов рассматриваемых конструктивно-силовых схем.

Как видно на рис. 5, альтернативная КСС имеет большее количество типоразмеров элементов, однако они расположены в конструкции таким образом, что при ее возведении в каждом из рядов используется меньшее количество различных типоразмеров (рис. 3 и 4).

В табл. 1 приведены значения массы конструкций рассматриваемых конструктивно-силовых схем в зависимости от количества граней на сторону основного треугольника.

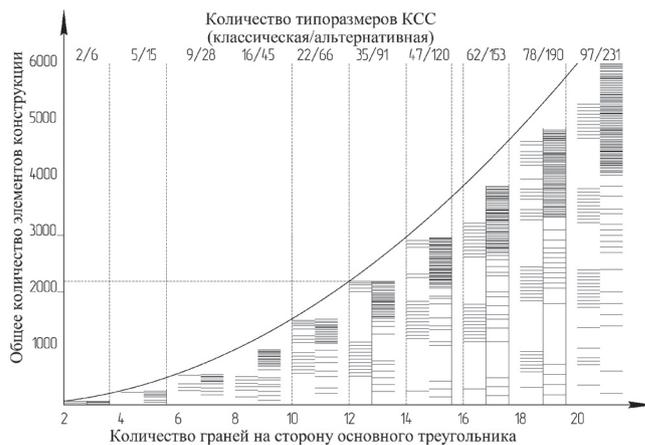


Рис. 5. Количественная сводка типов элементов рассматриваемых конструктивно-силовых схем

Таблица 1. Значения массы конструкций рассматриваемых конструктивно-силовых схем в зависимости от количества граней на сторону основного треугольника

Количество граней на сторону основного треугольника, шт.	Значения массы конструкции, т, т		$\Delta m, \%$	Общее количество элементов конструкции, шт.
	классической КСС	альтернативной КСС		
2	1,91	1,89	-1,05	65
4	3,72	3,74	+0,54	250
6	5,53	5,56	+0,54	555
8	7,34	7,38	+0,54	980
10	9,14	9,19	+0,55	1525
12	10,94	11,00	+0,55	2190
14	12,75	12,82	+0,55	2975
16	14,55	14,63	+0,55	3880
18	16,35	16,45	+0,61	4905
20	18,15	18,26	+0,60	6050

Таким образом, в альтернативной КСС наблюдается незначительное возрастание массы от 0,5 до 0,6 %. На рис. 6 показан алгоритм принятия решений при проектировании купольного сооружения для удаленных регионов.

На рис. 7 показано изменение массы конструкции рассматриваемых КСС и средней массы элемента конструкции в зависимости от количества граней на сторону основного треугольника.

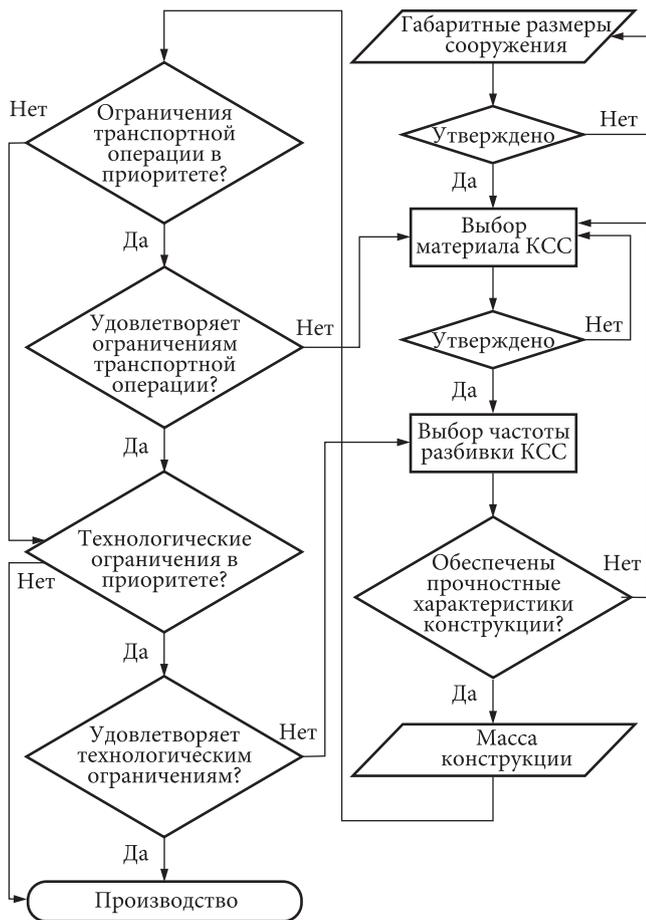


Рис. 6. Алгоритм принятия решений

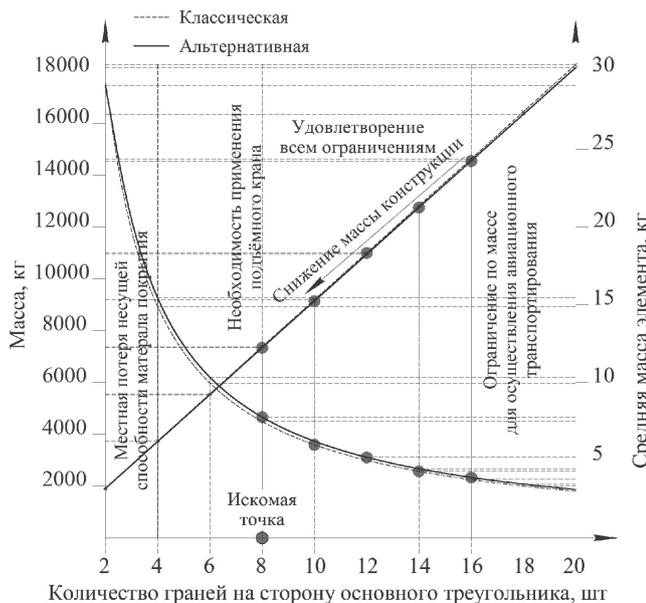


Рис. 7. Масса конструкции рассматриваемых КСС и средняя масса элементов конструкции в зависимости от количества граней на сторону основного треугольника

Прочностные расчеты проводились с помощью метода конечных элементов в программном комплексе ABAQUS CAE. Созданы две группы расчетных моделей, отличающихся изменением количества граней на сторону основного треугольника от

2 до 20. Параметры расчетных моделей приведены в табл. 2.

Расчет был проведен в статическом решателе. В качестве нагрузки задано ускорение свободного падения, в 10 раз превышающее нормальное – 98 м/с<sup>2</sup>. Это было сделано для более наглядного отображения напряженно-деформированного состояния (НДС). Каждой грани конструкции присвоено свойство балки круглого сечения диаметром 40 мм. Для всех расчетных моделей была построена конечно-элементная сетка с заданием 10 конечных элементов на грань.

На рис. 8 и 9 показаны НДС классической и альтернативной КСС. В классическом варианте присутствуют выраженные признаки местной потери устойчивости конструкции ввиду неравномерности нагружения, которая приводит к общей потере несущей способности КСС. В альтернативном варианте распределение полей НДС более равномерное, пиковые значения перемещений меньше по сравнению с классическим, что говорит о большей жесткости альтернативной КСС, а также не наблюдается признаков потери устойчивости.

В табл. 3 приведена разница перемещений по вертикальной оси узловых соединений основного треугольника классической и альтернативной КСС.

В табл. 4 и 5 приведены средние перемещения по вертикальной оси рядов узловых соединений основного треугольника классической и альтернативной КСС, соответственно.

На рис. 10 приведены средние перемещения по вертикальной оси рядов узловых соединений основного треугольника рассматриваемых КСС.

В табл. 6 приведены процентные значения разницы средних перемещений по вертикальной оси рядов узловых соединений основного треугольника рассматриваемых КСС.

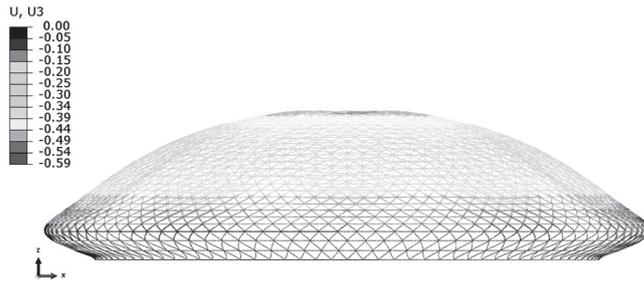
Таблица 2.

Параметры расчетных моделей

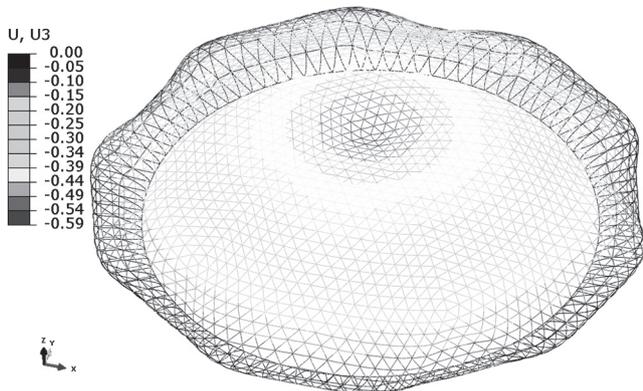
Наименования показателей	Значения
Диаметр купола, м	10
Вид сечения профиля элементов конструкции	Круг
Диаметр сечения элементов конструкции, мм	40
Материал	Сталь
Модуль упругости, МПа	2100000
Коэффициент Пуассона	0,3
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7700
Тип элементов	V31 – линейный пространственный балочный конечный элемент



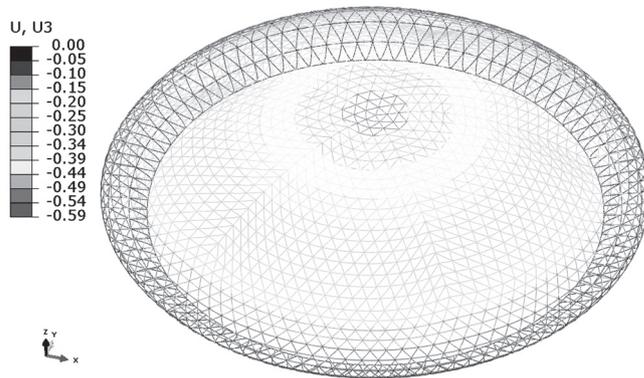
а – Масштаб НДС 4000:1



а – Масштаб НДС 4000:1



б



б – Масштаб НДС 4000:1

Рис. 8. Напряженно-деформированное состояние классической конструктивно-силовой схемы: а – вид сбоку; б – изометрический вид

Рис. 9. Напряженно-деформированное состояние альтернативной конструктивно-силовой схемы: а – вид сбоку; б – изометрический вид

Таблица 3.

Разница перемещений по вертикальной оси узлов соединений основного треугольника классической и альтернативной КСС

Ряд	Значения, %																																			
Полус	-11,7																																			
1	-10,9								-10,9																											
2	-9,1				-9,8				-9,8				-9,1																							
3	-7,4			-8,4			-8,4			-8,4			-7,4																							
4	-5,8		-6,6		-7,0		-7,0		-6,6		-6,6		-5,8																							
5	-4,1		-5,3		-5,8		-5,8		-5,3		-5,3		-4,1																							
6	-2,6		-4,0		-5,0		-5,4		-5,0		-4,0		-2,6																							
7	-0,9	-2,6		-4,5		-5,4		-5,4		-4,5		-2,6		-0,9																						
8	+1,2	-1,2		-3,8		-5,3		-5,8		-5,3		-3,8		-1,2	+1,2																					
9	+3,3	+0,5		-3,1		-5,5		-6,8		-6,8		-5,5		-3,1		+0,5	+3,3																			
10	+5,1	+2,1		-2,2		-5,3		-7,6		-8,0		-7,6		-5,3		-2,2		+2,1	+5,1																	
11	+6,2	+4,4		-0,5		-4,6		-7,5		-8,6		-8,6		-7,5		-4,6		-0,5		+4,4	+6,2															
12	+6,5	+4,9		+0,8		-3,3		-6,9		-8,8		-9,6		-8,8		-6,9		-3,3		+0,8		+4,9		+6,5												
13	+6,2	+4,9		+1,2		-2,6		-6,2		-8,8		-10,1		-10,1		-8,8		-6,2		-2,6		+1,2		+4,9	+6,2											
14	+6,3	+4,8		+1,3		-1,9		-5,2		-8,6		-10,7		-11,2		-10,7		-8,6		-5,2		-1,9		+1,3		+4,8	+6,3									
15	+6,3	+4,4		+1,0		-2,3		-5,8		-8,0		-10,6		-12,3		-12,3		-10,6		-8,0		-5,8		-2,3		+1,0	+4,4	+6,3								
16	+6,7	+4,4		+0,7		-3,2		-5,6		-8,2		-10,8		-13,2		-14,0		-13,2		-10,8		-8,2		-5,6		-3,2		+0,7	+4,4	+6,7						
17	+7,3	+4,7		+0,8		-3,4		-6,8		-8,9		-11,3		-13,6		-15,7		-15,7		-13,6		-11,3		-8,9		-6,8		-3,4		+0,8	+4,7	+7,3				
18	+8,4	+5,6		+0,8		-3,7		-7,4		-9,7		-12,0		-14,4		-16,7		-18,2		-16,7		-14,4		-12,0		-9,7		-7,4		-3,7	+0,8	+5,6	+8,4			
19	+9,8	+6,2		+1,9		-2,8		-6,8		-9,9		-12,3		-14,6		-17,1		-19,1		-19,1		-17,1		-14,6		-12,3		-9,9		-6,8		-2,8	+1,9	+6,2	+9,8	
20	+8,8	+6,0		+2,7		-1,1		-5,3		-8,2		-11,0		-13,6		-16,4		-19,5		-21,2		-19,5		-16,4		-13,6		-11,0		-8,2		-5,3	-1,1	+2,7	+6,0	+8,8

На рис. 11 показано сравнение усредненных перемещений узлов соединений основного треугольника, рассматриваемых КСС по вертикальной оси.

Комплексный подход позволит проектировать новые строения для удаленных районов с учетом всех ограничений, связанных с их географическим положением.

Конструктивно-технологические решения, рассмотренные в статье, позволят инженеру спроектировать более технически совершенное купольное сооружение за счет:

- упрощения процесса возведения благодаря унификации элементов конструкции в горизонтальных рядах;

Таблица 4.

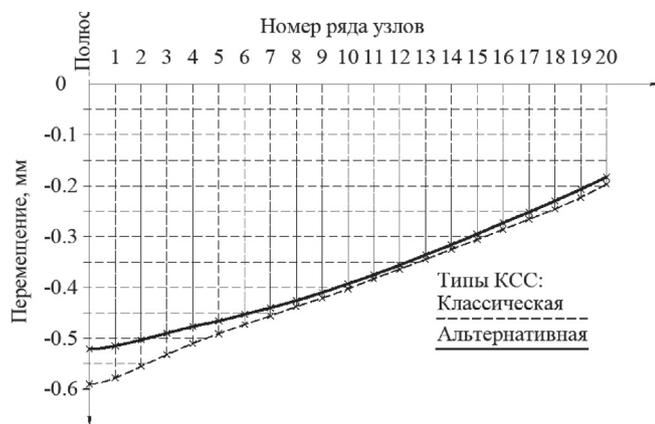
**Средние перемещения по вертикальной оси рядов узловых соединений  
основного треугольника классической КСС**

Ряд	Значение, мм
Полус	-0,590
1	-0,578
2	-0,555
3	-0,532
4	-0,510
5	-0,491
6	-0,473
7	-0,456
8	-0,438
9	-0,421
10	-0,403
11	-0,383
12	-0,364
13	-0,345
14	-0,325
15	-0,306
16	-0,286
17	-0,266
18	-0,246
19	-0,223
20	-0,197

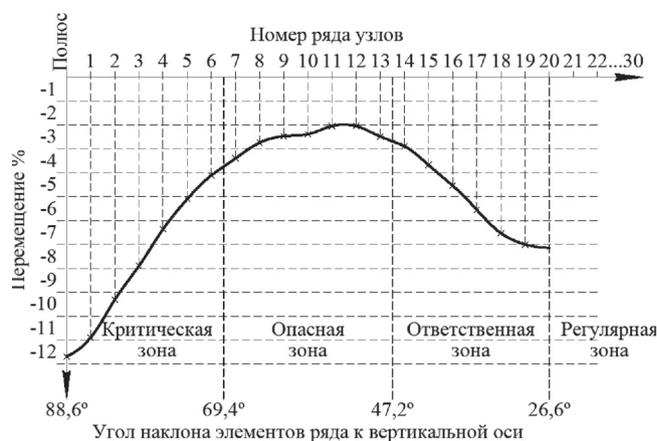
Таблица 5.

**Средние перемещения по вертикальной оси рядов узловых соединений  
основного треугольника альтернативной КСС**

Ряд	Значение, мм
Полус	-0,590
1	-0,515
2	-0,503
3	-0,490
4	-0,477
5	-0,466
6	-0,453
7	-0,440
8	-0,426
9	-0,410
10	-0,375
11	-0,383
12	-0,356
13	-0,336
14	-0,316
15	-0,295
16	-0,273
17	-0,252
18	-0,230
19	-0,207
20	-0,183



**Рис. 10. Средние перемещения по вертикальной оси рядов узловых соединений основного треугольника рассматриваемых КСС**



**Рис. 11. Сравнение средних перемещений рядов узловых соединений основного треугольника рассматриваемых КСС по вертикальной оси**

Таблица 6.

**Разница средних перемещений по вертикальной оси рядов узловых соединений  
основного треугольника рассматриваемых КСС**

Ряд	Значение, %
Полус	-11,69
1	-10,90
2	-9,31
3	-7,90
4	-6,36
5	-5,10
6	-4,11
7	-3,40
8	-2,74
9	-2,47
10	-2,39
11	-2,05
12	-2,05
13	-2,49
14	-2,89
15	-3,68
16	-4,54
17	-5,55
18	-6,53
19	-7,00
20	-7,14

- упрощения осуществления визуального контроля правильности сборки при возведении конструкции;
- снижения максимальных значений напряжений и перемещений в особо критичных зонах конструкции;
- упрощения осуществления контроля технического состояния конструкции в процессе эксплуатации.

Данные факторы особенно актуальны в контексте решения задач укрепления позиций Российской Федерации в области экономического, научного и военного освоения космического пространства, а также Арктики и Антарктики.

### Литература

1. Создание строительных и инженерных конструкций // Владимир Григорьевич Шухов: универсальный гений (1853-1939) / Сост. Н.Ф. Шутенко, Ю.Ю. Маркина. – Белгород, 2013.
2. Зеленова С.В., Ометова Г.Н. Нижегородский гиперболоид // В. Г. Шухов: нижегородские проекты : территория уникальных объектов / С.В. Зеленова и др. Нижний Новгород : Литера, 2016.
3. Гранев В.В. и др. Сохранение Радиобашни Шухова – современное состояние и перспективы // сб. науч. трудов РААСН «Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации». – М., 2018 г.
4. Отчет по проведению комплексных научных исследований объекта культурного наследия «Водопроводная башня», расположенного на территории АО «Выксунский металлургический завод», для разработки концепции реновации территории Чугунолитейного цеха с переносом сооружения в центральную часть г. Выкса, 2018 г. – С. 22.
5. Глушко К.К. Потеря местной устойчивости формы сетчатых куполов жесткими узлами // сб. статей II Международной научно-технической конференции «Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР)». – 2018. – С. 24–33.
6. Глушко К.К. Исследование устойчивости формы стержневых многогранников сетчатых куполов // сб. статей II Международной научно-технической конференции «Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР)». – 2018. – С. 33–42.
7. Ухолова А.А. Особенности определения аэродинамических коэффициентов для купольного покрытия по нормам Российской Федерации и еврокоду // Шаг в науку. – 2016. – №1. – С. 188–194.

8. Чепурненко А.С., Кочура В.Г., Сайбель А.В. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния волнистых оболочек // Строительство и техногенная безопасность. – 2018. – № 11 (63). – С. 27–31.

9. Designing and building a geodesic dome as a bearing structure for an 'artificial sky' lighting installation October 2009 Conference: Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures [International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009] At: Valencia (Spain) Project: Design-build workshops. Authors: Maria Vrontissi University of Thessaly.

### Providing Long-Term Quality of Dome Structures Based on the Use of Mesh High-Resource Design and Power Patterns

**O.S. Dolgov**, Doctor in Engineering, Professor, Director of Institute No.1 at Moscow Aviation Institute (NRU); Moscow

*e-mail:* dolgov@mai.ru

**T.V. Dolgova**, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department 101 at the Moscow Aviation Institute (NRU); Moscow

**A.M. Kolpakov**, PhD in Engineering, Research Officer of Department 101, Assistant Professor of Department 104 at the Moscow Aviation Institute (NRU); Moscow

**V.V. Korolskiy**, Engineer of NIO-101 at the Moscow Aviation Institute (NRU); Moscow

**Summary.** A complex approach to the long-term quality of structures by means of mesh high-resource design and power patterns in the design of new structures in hard-to-reach areas with difficult construction and operating conditions is proposed in the publication. Two types of structural-force patterns of hemispherical dome structures are considered, the results of their stress-strain state analysis are given.

**Keywords:** long-term quality, design and power pattern, geodesic dome, finite element method, stress-strain state, meshed shells.

#### References:

1. Creation of Construction and Engineering Structures // Vladimir Grigorievich Shukhov: Universal Genius (1853-1939) / Comp. by Shutenko N.F., Yu.Yu. Markina – Belgorod, 2013.
2. Zelenova S.V., Ometova G.N. Nizhny Novgorod Hyperboloid // V.G. Shukhov: Nizhny Novgorod Projects: the Area of Unique Objects / Zelenova S.V. et al. Nizhny Novgorod : Litera, 2016.
3. Granev V.V. et al. Conservation of the Shukhov Radio Tower – Current Status and Prospects // *Proceedings of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences «Fundamental, exploratory and applied research on scientific support for the development of architecture, urban planning and construction industry of the Russian Federation»*. – Moscow, 2018.
4. Report on Comprehensive Research of the Cultural Heritage Object «The Waterworks Tower»



located on the territory of Vyksa Metallurgical Plant, JSC for the development of renovation concept for the territory of the Iron Foundry site with relocation of the structure to the central part of Vyksa. Vyksa, 2018. – P. 22.

5. Glushko K.K. Loss of Local Form Stability of Mesh Domes by Stiff Units // *Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference «Theory and Practice of Research and Design in Construction with Application of Computer-Aided Design (CAD) Systems»*. – 2018. – P. 24–33.

6. Glushko K.K. The Stability Study of the Form of Core Polyhedrons of Mesh Domes // *Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference «Theory and Practice of Research and Design in Construction with the Application of Computer-Aided Design Systems (CAD)»*. – 2018. – P. 33–42.

7. Ukhlova A.A. Specific Features of Aerodynamic Coefficients Determination for Dome Coverage under Russian Federation and Eurocode Norms // *Step into Science*. – 2016. – No.1. – P. 188–194.

8. Chepurnenko A.S., Kochura V.G., Saibel A.V. Finite Element Analysis of Stress and Strain State of Undulating Shells // *Construction and Technogenic Safety*. – 2018. – No. 11(63). – P. 27–31.

9. Designing and building a geodesic dome as a bearing structure for an 'artificial sky' lighting installation October 2009 Conference: Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures [International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009] At: Valencia (Spain) Project: Design-build workshops. Authors: Maria Vrontissi University of Thessaly.

DOI: 10.34214/2312-5209-2021-32-4-00-00

## Обеспечение плавности вращения редуктора



### А.Б. Карпенко

начальник КБ  
ОАО «Специальное  
конструкторское  
бюро  
приборостроения  
и автоматики»;  
Владимирская  
область, г. Ковров

e-mail:  
karpenkoab@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены причины, влияющие на плавность вращения редукторов. Предложен метод, позволяющий значительно снизить зависимость плавности вращения от этих причин. Приведены результаты экспериментальных исследований плавности вращения редуктора, включающие результаты измерения вибрационных параметров. Предложенный в работе метод позволяет оценить плавность вращения редуктора и устранить причины, вызывающие его вибрацию.

**Ключевые слова:** редуктор, зубчатая передача, плавность вращения.

В системах автоматического сопровождения (приводы антенн радиолокаторов, приводы наведения вооружения, тяжелых астрономических приборов и пр.) требования к выходному движению определяются законом движения «цели», а точность электропривода (ЭП) во многом зависит от параметров механической передачи, например редуктора. Именно об этих редукторах пойдет речь в настоящей работе.

Так как редуктор работает в реверсивном режиме, в нем необходимо обеспечить безудар-

ное зацепление. Это улучшает плавность работы и, следовательно, точность всей системы [1, 2]. Работы в этом направлении проводили И.И. Артоблевский [3, 4], В.А. Бесекерский [5, 6], Б.В. Новоселов [7–10], Б.К. Чемоданов [11], Е.П. Попов [6], О.П. Михайлов [12], Е.А. Новикова [1].

Кинематическая погрешность (КП) исполнительного механизма существенно увеличивает неплавность работы привода, которая практически неустранима внешними мероприятиями [1]. Все возможные КП, вызывающие неточность и неплавность работы исполнительного механизма (ИМ), принято классифицировать по основным причинам, вследствие которых они возникают [13]. Такое разделение позволяет для каждой группы погрешностей применять свои методы выявления их влияния на общую погрешность работы ИМ, а также создавать приемы устранения или уменьшения их влияния. Различаются следующие пять групп погрешностей: погрешности схемы механизма; технологические; динамические; температурные; погрешности, изменяющиеся во времени.

Группа погрешностей схемы объединяет погрешности, вызванные применением конструктивной схемы ИМ, которая лишь приближенно реализует заданный закон движения. Такие погрешности необходимо учитывать в случаях, когда по технологическим или иным соображениям (сокращение цепи, замена сложных узлов более простыми элементами и т.п.) приходится упрощать или изменять схему в ущерб качеству выходного движения.

Технологические погрешности вызваны неточностью в изготовлении или монтаже элементов редуктора и делятся на четыре группы: