

УДК 624.042.1:624.074.27

**Н. Ю. ТРЯНИНА**, канд. техн. наук, проф. кафедры теории сооружений и технической механики; **Ю. С. ГЛЫНИНА**, магистрант кафедры теории сооружений и технической механики

## **ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ ЗАТЯЖЕК С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАТЯЖЕНИЕМ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕБРИСТО-КОЛЬЦЕВОГО КУПОЛА**

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-96;  
эл. почта: nadial2005@mail.ru

*Ключевые слова:* ребристо-кольцевой купол, система предварительно-напряженных затяжек, нижнее опорное кольцо, продольная сила в ребрах, геометрическая нелинейность.

---

*Представлены результаты численного исследования работы стального ребристо-кольцевого купола сплошного сечения с системой предварительно-напряженных наклонных затяжек, дана оценка напряженно-деформированного состояния элементов конструкции, сделан выбор оптимального варианта по материалоемкости и даны рекомендации по проектированию.*

---

**Введение.** Предварительное напряжение и регулирование усилий является мощным средством повышения эффективности металлических конструкций, снижения их стоимости и экономии материала. Для купольных конструкций наиболее подходящим является способ предварительного напряжения высокопрочных затяжек. В ребристых, ребристо-кольцевых куполах затяжки соединяют опорные части одноименных арок, что позволяет передать значительную часть распора на затяжки и тем самым существенно облегчить опорное кольцо купола. Для включения затяжек в работу производится их предварительное натяжение с упором на опорный узел ребра. Возможно дальнейшее предварительное натяжение затяжек с целью создания разгружающего напряженного состояния в ребрах по отношению к эксплуатационной нагрузке [1].

Известны предварительно-напряженные тросовые купола системы Гайгера. Такая система нашла применение при разработке покрытий зданий спортивных корпусов Олимпиады-88 в Сеуле. С помощью предварительного напряжения высокопрочных канатов могут быть созданы не только вогнутые и выпуклые двухпоясные конструкции, но и выпуклые пространственные купольные системы [2].

Известно использование предварительно-напряженных гибких элементов в арочных конструкциях с жестким криволинейным верхним поясом. В работах [3, 4] было проведено исследование влияния наклонных предварительно-напряженных тяг на напряженно-деформированное состояние арочных конструкций и были сделаны рекомендации о рациональном их расположении в арках. В работах [5, 6] были даны рекомендации по использованию предварительно-напряженных затяжек для ребристо-кольцевых



куполов в зависимости от стрелы подъема и величины предварительного напряжения. Настоящее исследование является продолжением вышеуказанных работ, уточняет и дополняет их.

Вопросы, связанные с предварительным напряжением куполов, достаточно актуальны, так как в настоящее время отсутствуют детальные теоретические и экспериментальные исследования по этой теме.

**Материалы и методы.** В данной статье представлено численное исследование напряженно-деформированного состояния ребристо-кольцевого купола сплошного сечения, опертого на арочную конструкцию, с двумя системами предварительно-напряженных наклонных затяжек в зависимости от величины предварительного натяжения. Дано сравнение полученных результатов с таким же куполом только без затяжек, произведен выбор оптимального варианта по материалоемкости.

Рассматривается ребристо-кольцевой купол диаметром 28 м со стрелой подъема  $f = 10$  м. В конструкцию купола вводилась система затяжек в двух вариантах: соединялись каждые одноименные арки и через одну. Величина предварительного напряжения подбиралась в различных вариантах таким образом, чтобы на последнем этапе нагружения при самом неблагоприятном сочетании нагрузок затяжки не выключались из работы (рис. 2 цв. вклейки). Высота расположения кольца для крепления затяжек равная 5 м была выбрана согласно рекомендациям проводимых ранее исследований [5].

Статический нелинейный расчет конструкций купола выполнен в соответствии с действующими нормативными положениями [9, 10] по первому и второму предельному состоянию на самый неблагоприятный вариант из комбинации расчетных сочетаний нагрузок с помощью программно-вычислительного комплекса *SCAD*. В качестве модели покрытия принята пространственная КЭ-модель (рис. 1 цв. вклейки), учитывающая геометрические параметры и характер распределения нагрузок (собственный вес, вес покрытия, снеговая нагрузка, ветровая нагрузка) с учетом геометрической нелинейности, было применено 4 этапа нагружения. Дальнейшая обработка результатов статического расчета и проверка проводилась с помощью программы *Microsoft Excel*.

В конструкции применяются прямоугольные и квадратные трубы из стали С255. В ходе исследования были подобраны оптимальные сечения элементов конструкции и посчитана их масса (таблица). Диаметр сечения затяжек составляет 10 мм, их общая масса равна 220,7 кг при расположении затяжек в каждой одноименной арке и 110,35 кг через одну.

**Результаты исследования.** Было отмечено, что величина предварительного натяжения в затяжках сильно не влияет на изменение внутренних усилий в элементах купола и ее величина подбиралась из условия не выключения затяжек из работы (в конечном итоге все затяжки должны быть растянуты).

На рис. 3–6 цв. вклейки показаны цветовые изображения величин продольных усилий, возникающих в элементах купола в двух вариантах систем затяжек и без них при наиболее неблагоприятном сочетании нагрузок (снег на половину купола).



Наименование конструктивного элемента	Значение преднапряжения в верхних и нижних затяжках	$N_{max}$ , кН	$M_{max}$ , кНм	Поперечное сечение	Масса, кг
Нижнее опорное кольцо	–	96,39	40,32	□240×160×10	4979,6
	Затяжки в каждой одноименной арке, 20 и 15 кН	74,14	5,27	□180×140×5	2082,9
	Затяжки через одну одноименную арку, 20 и 15 кН	79,56	7,26	□180×140×5	2082,9
	Затяжки в каждой одноименной арке, 25 и 10 кН	74,13	5,28	□180×140×5	2082,9
	Затяжки через одну одноименную арку, 25 и 10 кН	79,56	7,27	□180×140×5	2082,9
Верхнее опорное кольцо	–	-42,17	11,74	□160×100×8	180,5
	Затяжки в каждой одноименной арке, 20 и 15 кН	-32,76	10,59	□150×100×8	172,6
	Затяжки через одну одноименную арку, 20 и 15 кН	-34,32	12,87	□150×100×8	172,6
	Затяжки в каждой одноименной арке, 25 и 10 кН	-32,79	10,60	□150×100×8	172,6
	Затяжки через одну одноименную арку, 25 и 10 кН	-34,34	12,88	□150×100×8	172,6
Ребра	-	-149,16	19,93	□180×100×8	8729,0
	Затяжки в каждой одноименной арке, 20 и 15 кН	-136,07	20,82	□150×130×5,5	4102,0
	Затяжки через одну одноименную арку, 20 и 15 кН	-128,69	22,77	□150×130×5,5	4102,0
	Затяжки в каждой одноименной арке, 25 и 10 кН	-136,13	20,86	□150×130×5,5	4102,0
	Затяжки через одну одноименную арку, 25 и 10 кН	-128,70	22,79	□150×130×5,5	4102,0

**К СТАТЬЕ Н. Ю. ТРЯНИНОЙ, Ю. С. ГЛЫНИНОЙ  
«ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ ЗАТЯЖЕК С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ  
НАТЯЖЕНИЕМ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ  
СОСТОЯНИЕ РЕБРИСТО-КОЛЬЦЕВОГО КУПОЛА»**

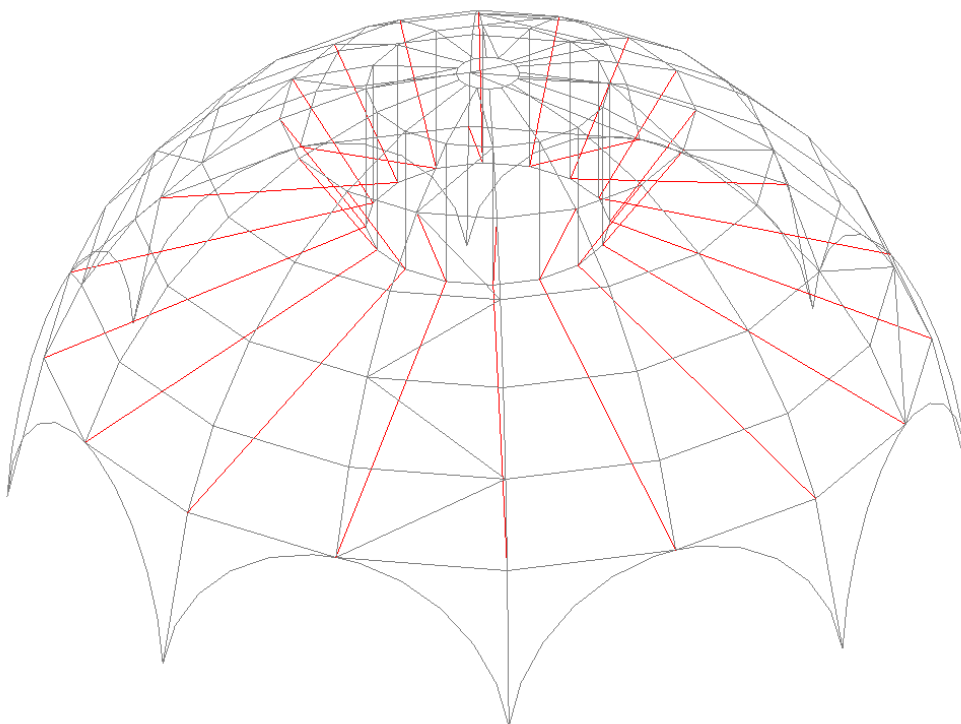


Рис. 1. Пространственная стержневая КЭ-модель ребристо-кольцевого купола (система затяжек выделена красным цветом)

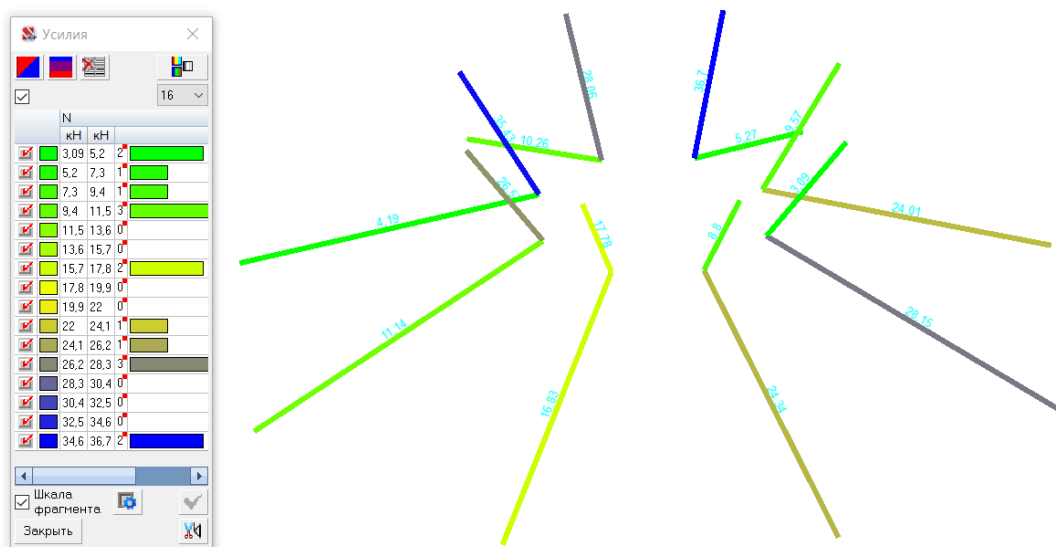


Рис. 2. Цветовое отображение значений продольных усилий в затяжках от комбинации нагрузок со снегом на половину купола с затяжками через одну одноименную арку, величина преднапряжения 25 кН в верхних и 10 кН в нижних затяжках

N		кН	кН	
✓	-156,76	-140,94	2	
✓	-140,94	-125,11	1	
✓	-125,11	-109,29	4	
✓	-109,29	-93,47	11	
✓	-93,47	-77,65	23	
✓	-77,65	-61,83	21	
✓	-61,83	-46	33	
✓	-46	-30,18	88	
✓	-30,18	-14,36	45	
✓	-14,36	1,46	59	
✓	1,46	17,28	40	
✓	17,28	33,11	15	
✓	33,11	48,93	1	
✓	48,93	64,75	9	
✓	64,75	80,57	0	
✓	80,57	96,39	4	

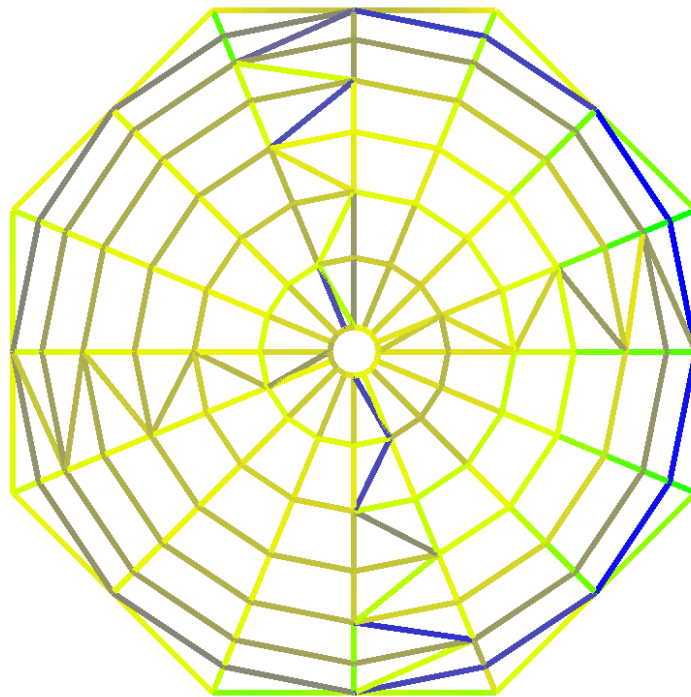


Рис. 3. Цветовое отображение значений продольных усилий в элементах конструкции от комбинации нагрузок со снегом на половину купола без системы затяжек

N		кН	кН	
✓	-128,7	-115,69	4	
✓	-115,69	-102,67	3	
✓	-102,67	-89,65	4	
✓	-89,65	-76,64	21	
✓	-76,64	-63,62	15	
✓	-63,62	-50,6	15	
✓	-50,6	-37,59	41	
✓	-37,59	-24,57	79	
✓	-24,57	-11,56	56	
✓	-11,56	1,46	50	
✓	1,46	14,48	57	
✓	14,48	27,49	21	
✓	27,49	40,51	6	
✓	40,51	53,53	2	
✓	53,53	66,54	0	
✓	66,54	79,56	4	

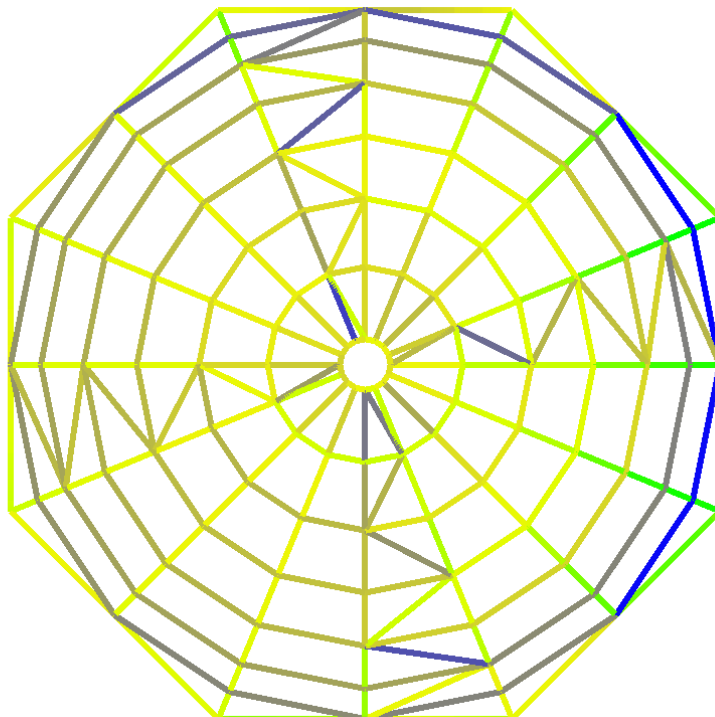


Рис. 4. Цветовое отображение значений продольных усилий в элементах конструкции от комбинации нагрузок со снегом на половину купола с затяжками через одну одноименную арку, величина преднапряжения 25 кН в верхних и 10 кН в нижних затяжках

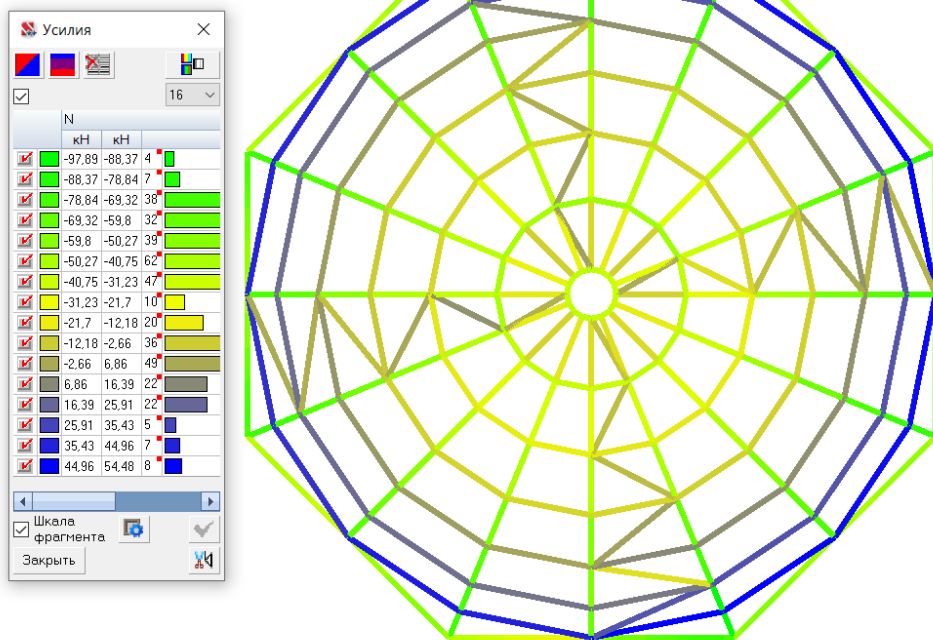


Рис. 5. Цветовое отображение значений продольных усилий в элементах конструкции от комбинации нагрузок со снегом на весь купол с затяжками через одну одноименную арку, величина преднапряжения 20 кН для верхних и 15 кН для нижних затяжек

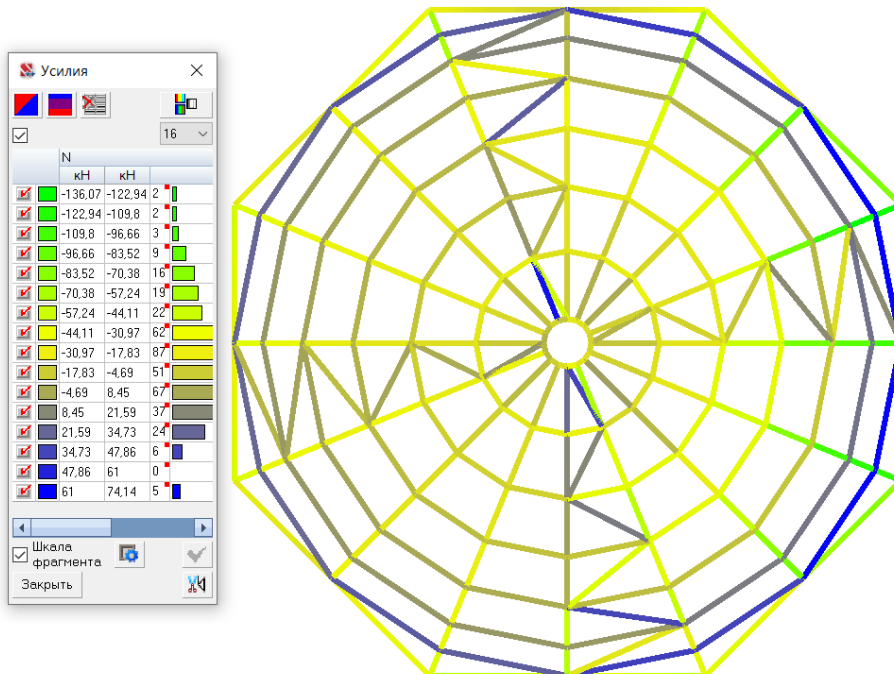


Рис. 6. Цветовое отображение значений продольных усилий в элементах конструкции от комбинации нагрузок со снегом на половину купола с затяжками в каждой одноименной арке, величина преднапряжения 20 кН для верхних и 15 кН для нижних затяжек

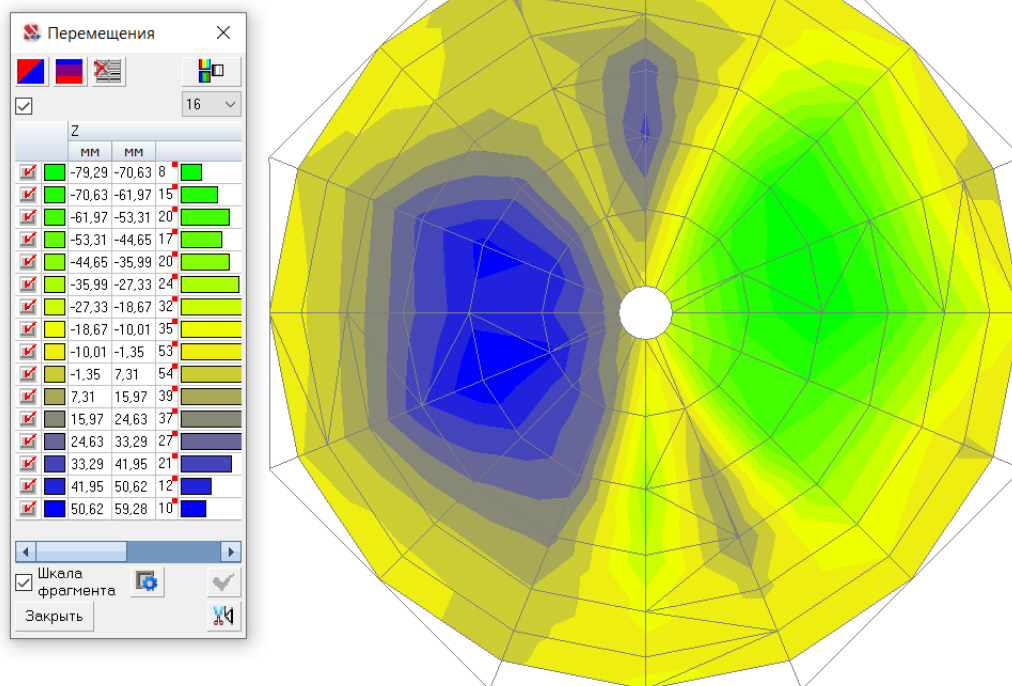


Рис. 7. Цветовое отображение значений перемещений от комбинации нагрузок со снегом на половину купола без предварительного напряжения затяжек

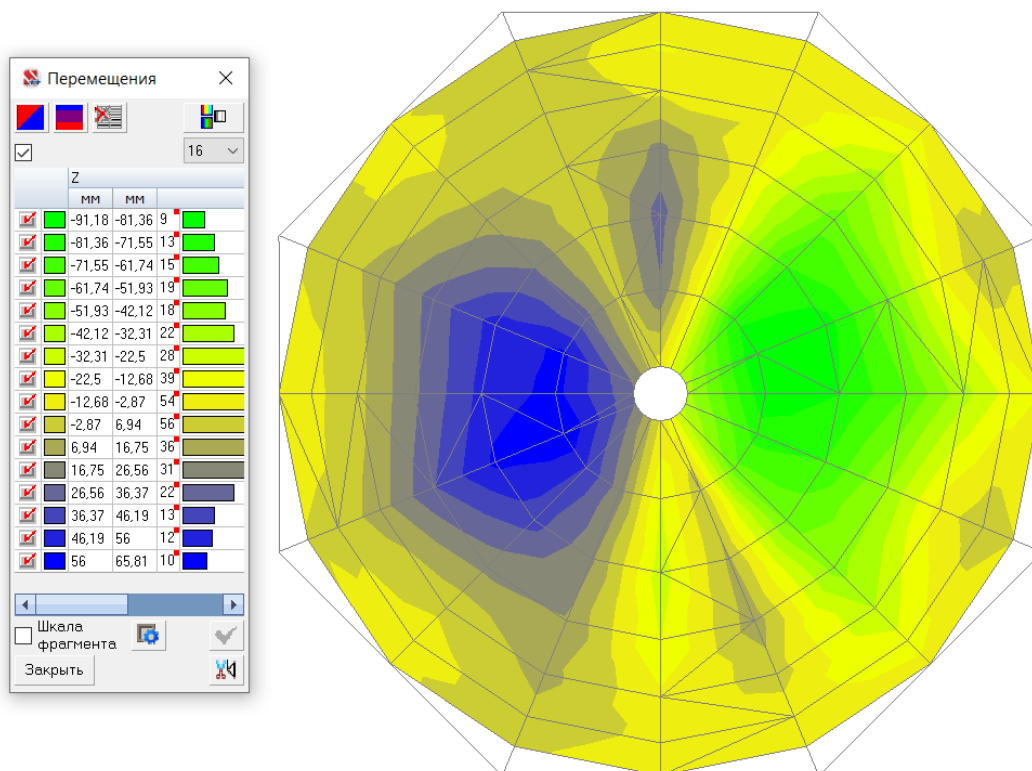


Рис. 8. Цветовое отображение значений перемещений от комбинации нагрузок со снегом на половину купола с затяжками в каждой одноименной арке, величина преднапряжения 20 кН для верхних и 15 кН для нижних затяжек





Окончание

Промежуточные кольца	-	-56,02	0,81	110×8	6470,1
	Затяжки в каждой одноименной арке, 20 и 15 кН	-37,23	0,27	□90×5	3476,0
	Затяжки через одну одноименную арку, 20 и 15 кН	-44,91	0,27	□90×5	3476,0
	Затяжки в каждой одноименной арке, 25 и 10 кН	-37,33	0,27	□90×5	3476,0
	Затяжки через одну одноименную арку, 25 и 10 кН	-44,94	0,27	□90×5	3476,0
Опорные стойки	-	-156,76	4,87	□200×160×6	1315,6
	Затяжки в каждой одноименной арке, 20 и 15 кН	-130,14	1,30	□150×130×5,5	606,3
	Затяжки через одну одноименную арку, 20 и 15 кН	-125,78	2,52	□150×130×5,5	606,3
	Затяжки в каждой одноименной арке, 25 и 10 кН	-130,12	1,31	□150×130×5,5	606,3
	Затяжки через одну одноименную арку, 25 и 10 кН	-125,79	2,52	□150×130×5,5	606,3
Опорные арки	-	-104,1	43,53	□260×240×10	7675,0
	Затяжки в каждой одноименной арке, 20 и 15 кН	-94,16	35,06	□260×240×9	6962,1
	Затяжки через одну одноименную арку, 20 и 15 кН	-95,87	37,66	□260×240×9	6962,1
	Затяжки в каждой одноименной арке, 25 и 10 кН	-94,16	35,08	□260×240×9	6962,1
	Затяжки через одну одноименную арку, 25 и 10 кН	-95,86	37,67	□260×240×9	6962,1

**Выводы.** Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Применение системы предварительно напряженных затяжек приводит к снижению усилий в элементах купола, что позволяет уменьшить их сечения и, следовательно, металлоемкость. Особенно ощутимо разгружается нижнее опорное кольцо, продольная сила в нем уменьшается на 18 %, а изгибающий момент до 85 %. Промежуточные кольца также разгружаются, в них продольная сила уменьшается на 20 %. В ребрах продольная сила уменьшается в среднем на 10 %. Уменьшаются усилия также в опорных стойках и опорных арках.





2. Для данного варианта купольного покрытия наиболее оптимальная величина предварительного напряжения затяжек исходя из условия не выключения их из работы – 25 кН для верхних и 10 кН для нижних. Возможно уменьшение величины натяжения верхних затяжек до 15 кН, при этом две затяжки выключаются из работы, но это не оказывает существенного влияния на работу всей конструкции.

3. Перемещения точек возрастают, но находятся в пределах допустимых.

4. Несмотря на дополнительные затраты стали на затяжки, их введение в расчетную схему купола приводит к снижению материалоемкости конструкции в среднем на 42 %.

5. Предпочтение следует отдавать системе затяжек через одну одноименную арку.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тур, В. И. Купольные конструкции : формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности : учебное пособие / В. И. Тур. – Москва : АСВ, 2004. – 96 с. – ISBN 5-93093-249-2. – Текст : непосредственный.

2. Михайлов, В. В. Предварительно напряженные комбинированные стержневые и вантовые конструкции : учебное пособие. – Москва : АСВ, 2002. – 256 с. – ISBN 5-93093-137-2. – Текст : непосредственный.

3. Трянина, Н. Ю. Исследование работы арочных конструкций с системой наклонных тяг / Н. Ю. Трянина, М. А. Карзанов. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2011. – № 2. – С. 16–19.

4. Токарев В. С. Напряженно-деформированное состояние стальных арок с системой наклонных затяжек / В. С. Токарев, Н. Ю. Трянина. – Текст : непосредственный // Результаты фундаментальных и прикладных исследований в области естественных и прикладных наук : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции / Агентство перспективных и научных исследований. – Белгород, 2017. – С. 227–230.

5. Трянина, Н. Ю. Исследование работы ребристо-кольцевых куполов с системой предварительно-напряженных затяжек / Н. Ю. Трянина, Н. А. Репьева. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2020. – № 3. – С. 34–39.

6. Глынина, Ю. С. Напряженно-деформированное состояние ребристо-кольцевого купола с системой наклонных тяг / Ю. С. Глынина. – Текст : непосредственный // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В. Г. Шухова. – Белгород, 2023. – Часть 2. – С. 147–151.

7. Geiger, D. Design details of an elliptical cable dome and a large span cable dome under construction in the USA : st. O. Kerensky Mem / D. Geiger [et. al] // Conference June. – 1988. – P. 14/3–17/3.

8. Geiger, D. The design and construction of two cable domes for the Korean Olympics. IASS Osaka 2. – 1986. – P. 265–272.

9. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия : свод правил : издание официальное : актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* : дата введения 04.06.17 / Минрегион России. – Москва : Минстрой России, 2016. – IV. – 80 с. – Текст : непосредственный.

10. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции : свод правил : издание официальное : актуализированная редакция СНиП II -23-81\* дата введения 28.08.17 / Минрегион России. – Москва : Стандартинформ, 2017. – V. – 144 с. – Текст : непосредственный.



**TRYANINA Nadezhda Yurevna, candidate of technical sciences, professor of the chair of theory of structures and technical mechanics; GLYNINA Yuliya Sergeevna, undergraduate student of the chair of theory of structures and technical mechanics**

### **THE EFFECT OF A PRESTRESSED TIGHTENING SYSTEM ON THE STRESS-STRAIN STATE OF A RIBBEDRING DOME**

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Tel.: + 7 (831) 430-54-96;  
e-mail: nadial2005@mail.ru

*Key words:* ribbed-ring dome, prestressed tightening system, lower support ring, longitudinal force in the ribs, geometric nonlinearity.

---

*The article presents the results of the numerical study of the operation of the steel rib-ring dome of solid section with various systems of pre-stressed inclined puffs; the stress-strain state of structural elements is assessed, the choice of the best option for material consumption is made, and design recommendations are given.*

---

#### REFERENCES

1. Tur V. I. Kupolnye konstruksii: formoobrazovanie, raschyot, konstruirovaniye, povysheniye effektivnosti [Dome constructions: shaping, calculation, designing, increasing efficiency]: uchebnoye posobie. – Moscow : ASV, 2004 – 96 p. – ISBN 5-93093-249-2.
2. Mikhaylov V. V. Predvaritelno napryazhyonnye kombinirovannyye sterzhnevyye i vantovyye konstruksii [Prestressed combined rod and cable-stayed structures] : uchebnoye posobie. – Moscow : ASV, 2002, 256 p. – ISBN 5-93093-137-2.
3. Tryanina N.Yu., Karzanov M. A. Issledovaniye raboty arochnykh konstruksiy s sistemoy naklonnykh tyag [Study of the work of arch structures with a system of inclined rods]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, NNGASU, 2011, № 2. P. 16–19.
4. Tokarev V. S., Tryanina N. Yu. Napryazhyonno-deformirovannoye sostoyaniye stalnykh arok s sistemoy naklonnykh zatyazhek [The stress-strain state of steel arches with a system of inclined puffs]. Rezultaty fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy v oblasti estestvennykh i prikladnykh nauk: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / Agentstvo perspektivnykh i nauchnykh issledovaniy. – Belgorod, 2017. – P. 227–230.
5. Tryanina N. Yu. Repeva N. A. Issledovaniye raboty rebristo-kolstevykh kupolov s sistemoy predvaritelno-napryazhyonnykh zatyazhek [Investigation of the operation of ribbed-ring domes with a system of prestressed puffs] // Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod. – 2020, № 3. – P. 34–39.
6. Glynina Yu. S. Napryazhyonno-deformirovannoye sostoyaniye rebristo-koltsevogo kupola s sistemoy naklonnykh tyag [Stress-strain state of a ribbed-ring dome with a system of inclined rods] // Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya molodykh uchyonykh BGTU im. V.G. Shukhova, posvyashchyonnaya 170-letiyu so dnya rozhdeniya V.G. Shukhova. Belgorod, 2023. – Ch. 2. – P. 147–151.
7. Geiger D, et. al.: Design details of an elliptical cable dome and a large span cable dome under construction in the USA. st. O. Kerensky Mem. Conference June (1988). P. 14/3–17/3.



8. Geiger D, et. al.: The design and construction of two cable domes for the Korean Olympics. IASS Osaka 2 (1986). P. 265–272.

9. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya [Load and impact]. Svod pravil: aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85\* : data vved. 04.06.17 / Minregion Rossii. – Moscow : Minstroy Rossii, 2016. – IV. – 80 p.

10. SP 16.13330.2017. Stalnye konstruksii [Steel constructions]. Svod pravil: aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-23-81\* : data vved. 28.08.17 / Minregion Rossii. – Moscow : Standartinform, 2017. – V. – 144 p.

© Н. Ю. Трянина, Ю. С. Глынина, 2024

Получено: 09.01.2024 г.