



УДК 692.45

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

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОГНУТОЙ СЕТЧАТОЙ ОБОЛОЧКИ С ДВУМЯ ХРЕБТОВЫМИ АРКАМИ И ОПОРНЫМ КОЛЬЦОМ

ФБГОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-96;
эл. почта: nadial2005@mail.ru

Ключевые слова: сетчатая оболочка, хребтовые арки, стальное опорное кольцо, перемещения узлов оболочки, прямолинейные стержни.

Представлены результаты численного исследования работы стального покрытия, представляющего собой сетчатую оболочку двоякой отрицательной кривизны, состоящую из прямолинейных жестких стержней и опирающуюся на хребтовые арки и сплошное опорное кольцо. Дана оценка напряженно-деформированного состояния несущих элементов покрытия.

Поиск и создание новых конструктивных форм, принятие интересных решений для перекрытия больших пролетов всегда являлось актуальной задачей.

Исследуемое покрытие – круглое в плане, диаметр окружности 60 м. Оно образовано двумя сетчатыми оболочками, представляющими собой гиперболические параболоиды, симметрично расположенные относительно одной из центральных осей [1, 2]. Две внутренние хребтовые опорные арки высотой 21,5 м, наклоненные под углом 84 градуса к горизонту, шарнирно опираются на фундамент и соединены между собой связевыми фермами. Арки имеют сварное коробчатое сечение 2000×1000 мм из листов толщиной 30 мм. Внутри поперечного сечения арок в местах соединения элементов покрытия устанавливаются диафрагмы жесткости [1]. Сетчатая оболочка образована из жестких прямолинейных стержней, выполненных из гнуто-сварных прямоугольных труб сечением 250×150×6,5 мм. Распорные усилия воспринимаются сплошным наклонным опорным кольцом коробчатого сварного сечения 1000×500×30 мм. Распор в арках воспринимается затяжкой.

Была создана конечно-элементная модель покрытия здания (рис. 1). Статический расчет был выполнен численным методом при помощи программного комплекса “SCAD”. Для расчета конструкций по первой и второй группе предельных состояний составлялись неблагоприятные сочетания нагрузок по [3, 4].

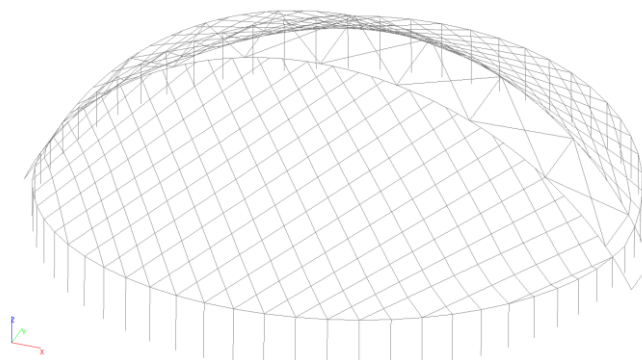


Рис. 1. Первоначальная конечно-элементная модель покрытия

Снеговая нагрузка была задана в нескольких вариантах, согласно [5]: 3 варианта – на арки, 2 варианта – на оболочку с разделением на всю и половину покрытия (рис. 2). Нормативные значения снеговой нагрузки вычислялись приблизительно по Б.11 и Б.12 [5].

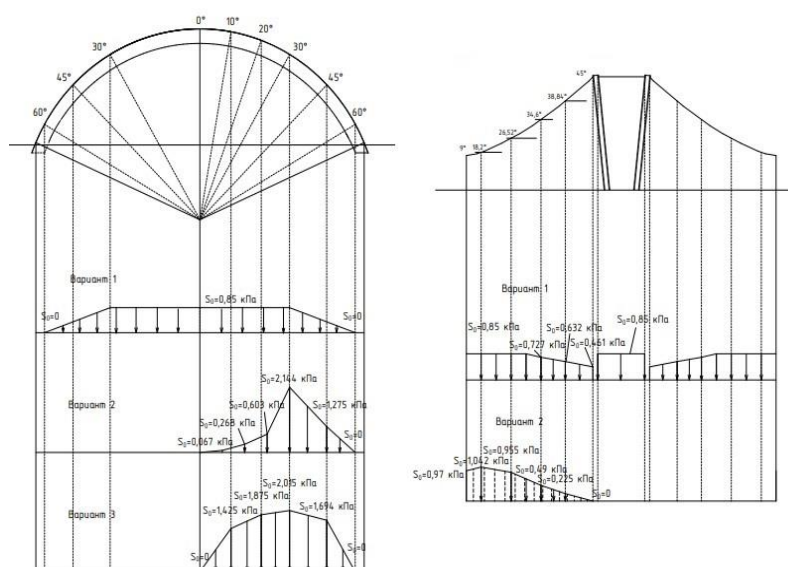


Рис. 2. Варианты загрузки снеговой нагрузкой

Ветровая нагрузка принималась только на арки – вдоль и поперек [5]. Ветровая нагрузка на покрытие на данном этапе исследования не учитывалась, так как, с одной стороны, она в основном оказывает разгружающее воздействие, а, с другой стороны, не известны аэродинамические коэффициенты для такой сложной формы покрытия, что требует или постановки эксперимента с применением аэродинамической трубы, или проведения численного исследования. Изучению вопросов аэродинамики зданий и сооружений в последние десятилетия посвящено большое количество работ. Для нашей работы интерес представляют аэродинамические исследования большепролетных зданий с криволинейным очертанием кровли [6, 7, 8]. Исследование воздействия ветра на

принятое покрытие является следующей задачей изучения работы данной конструкции.

В результате статического расчета были получены значения внутренних усилий и перемещений в элементах покрытия. Максимальные перемещения точек сетчатой оболочки по выше приведенной расчетной схеме (рис. 1) при принятом поперечном сечении стержней $250 \times 150 \times 6,5$ мм получались достаточно большими и составили 607 мм, что больше предельно допустимых. Поэтому решался вопрос по увеличению жесткости покрытия путем введения дополнительных элементов, кольцевых и поперечных стержней. Было рассмотрено 19 вариантов расчетных схем:

1. Пять разных положений одного и двух промежуточных колец.
2. Два положения трех промежуточных колец.
3. Три положения поперечных элементов.
4. Три комбинации промежуточных колец и поперечных элементов.

По наименьшему значению перемещений узлов была определена оптимальная расчетная схема, перемещения в ней снизились в 16 раз и достигли значения в 46 мм. Эта расчетная схема с двумя кольцами с тремя поперечными элементами (рис. 3) и была принята как наилучшая, и далее в ней подбирались поперечные сечения с учетом коэффициента использования K_{\max} в *SCAD office*. Для сетки были выбраны сечения $250 \times 140 \times 6$ мм. Принятые поперечные сечения элементов в конечном варианте расчетной схемы представлены на рис. 1 (цв. вклейки). Покрытие оказалось легче первоначального, и экономия стали по массе составила 24 %.

От наиболее неблагоприятной комбинации загружений были найдены внутренние усилия в элементах покрытия и перемещения узлов.

На рис. 2–4 (цв. вклейки) представлено цветовое отображение значений продольных усилий в элементах покрытия и опорном кольце от комбинации загружений с симметричной снеговой нагрузкой на все покрытие и несимметричной в двух вариантах на половину покрытия. На рис. 5 (цв. вклейки) показаны внутренние усилия в элементах хребтовых арок.

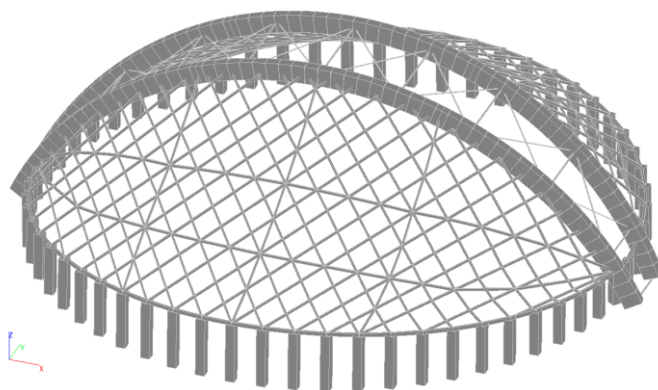


Рис. 3. Итоговая расчетная схема с элементами усиления

Самыми нагруженными являются несущие хребтовые арки, работающие на сжатие с изгибом. В сетчатой оболочке самыми нагруженными оказались элементы введенных промежуточных колец, они также сжаты. Усилия в других элементах сетки значительно меньше, и эти элементы работают как на

**К СТАТЬЕ Н. Ю. ТРЯНИНОЙ, Н. С. ГОЛИЦЫНА
«НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОГНУТОЙ
СЕТЧАТОЙ ОБОЛОЧКИ С ДВУМЯ ХРЕБТОВЫМИ АРКАМИ И
ОПОРНЫМ КОЛЬЦОМ»**

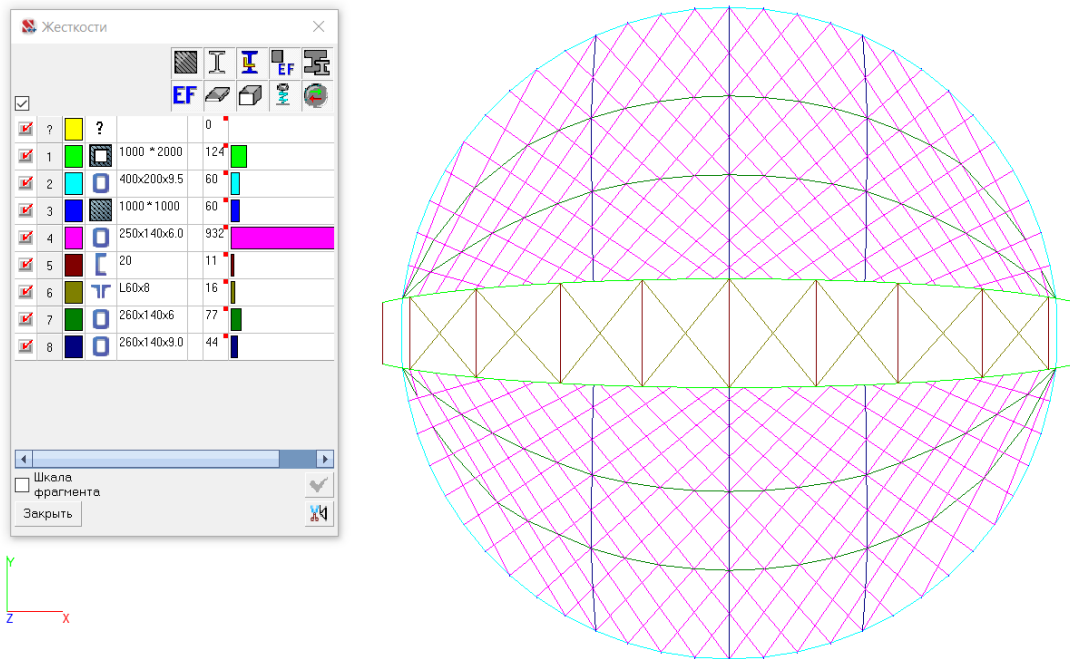


Рис. 1. Цветовое отображение принятых жесткостей элементов

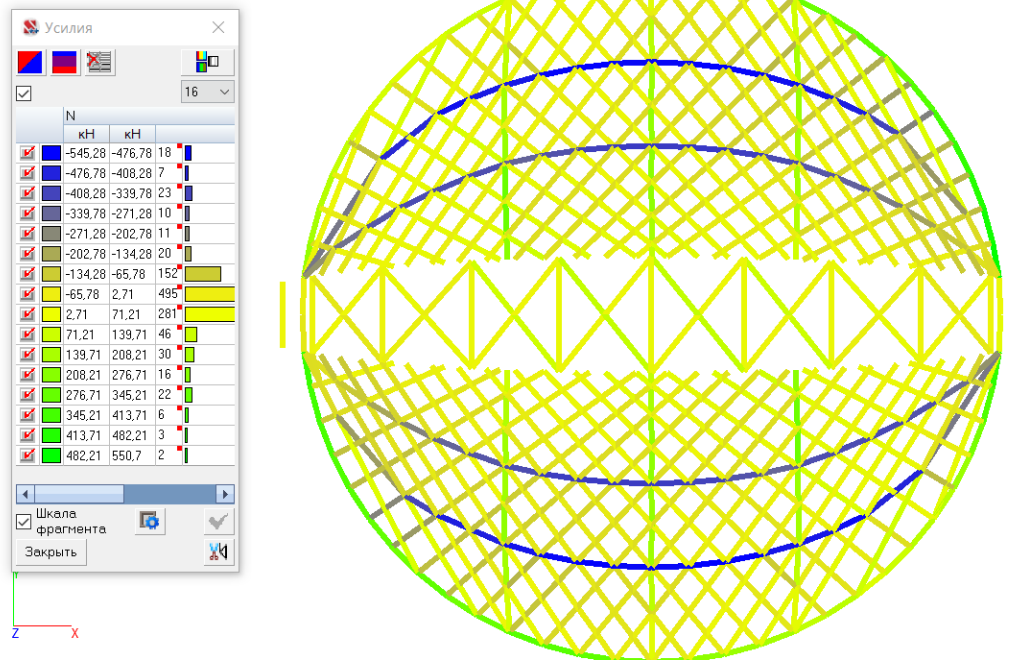


Рис. 2. Цветовое отображение значений продольных усилий в элементах покрытия и опорном кольце от комбинации нагрузок со снегом на все покрытие

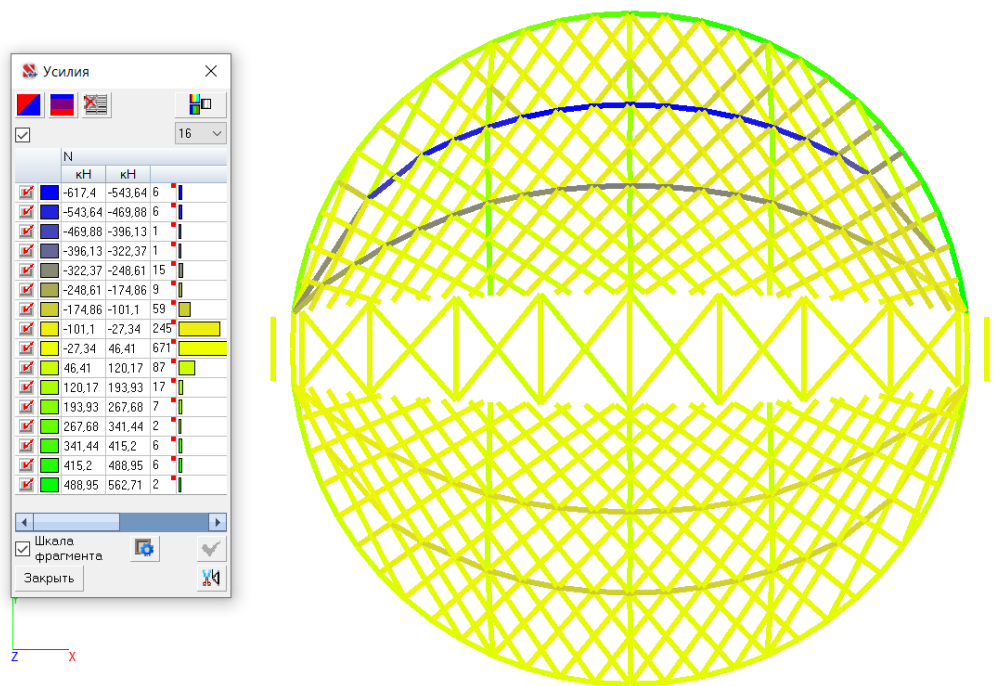


Рис. 3. Цветовое отображение значений продольных усилий в элементах покрытия и опорном кольце от комбинации загрузений со снегом на верхнюю половину покрытия

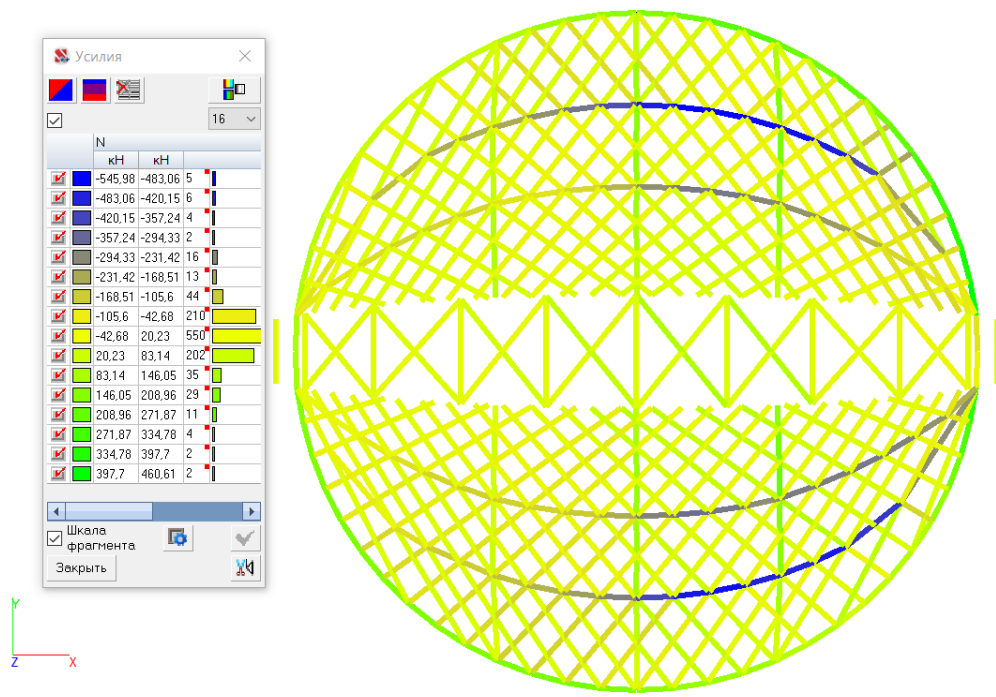


Рис. 4. Цветовое отображение значений продольных усилий в элементах покрытия и опорном кольце от комбинации загрузений со снегом на правую половину покрытия

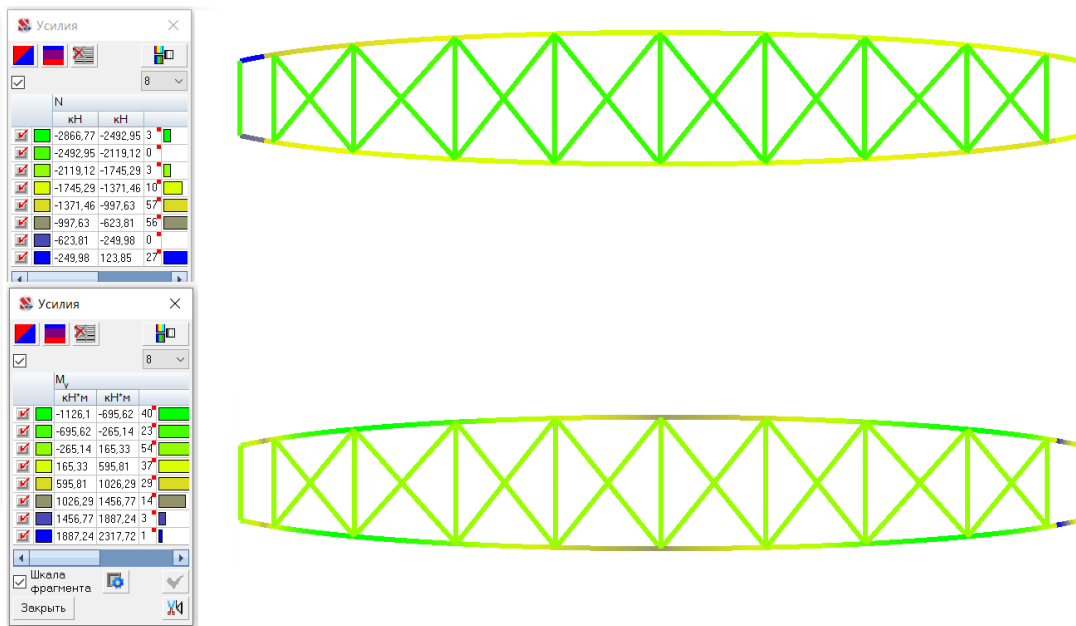


Рис. 5. Цветовое отображение значений продольных усилий и изгибающих моментов в арках при комбинации загрузений со снегом на все покрытие

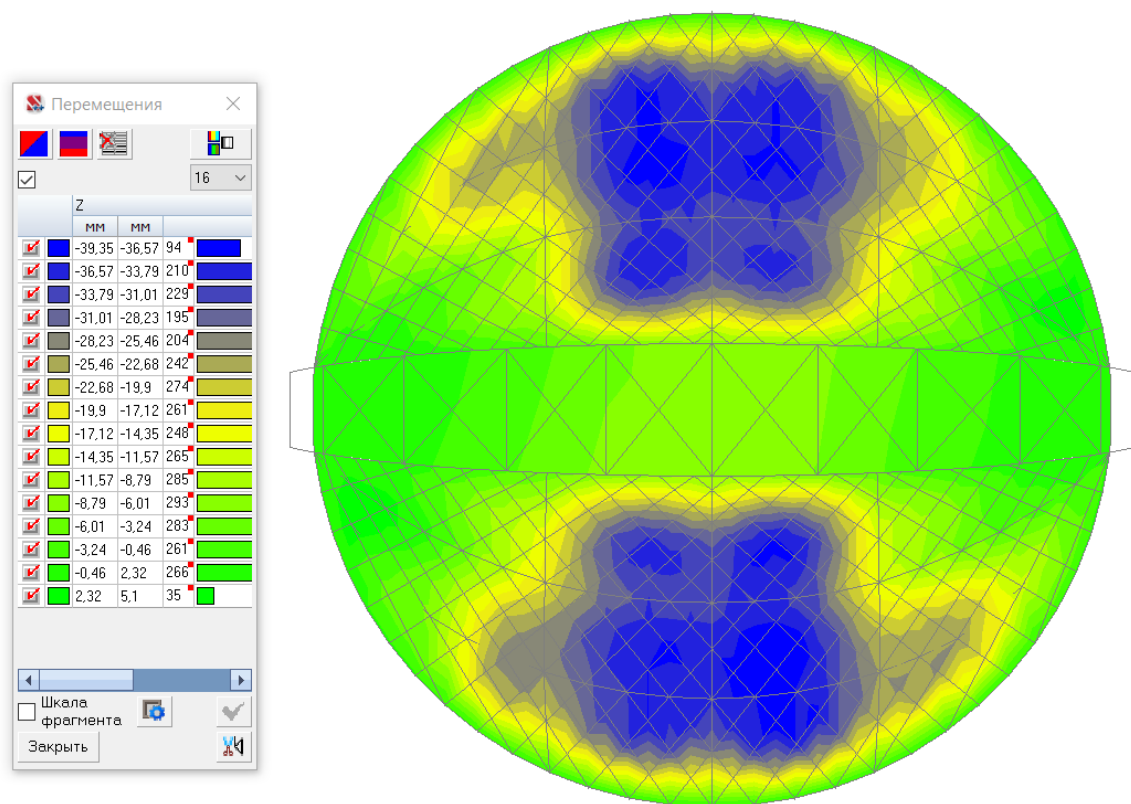


Рис. 6. Цветовое отображение значений перемещений от комбинации загрузений со снегом на все покрытие

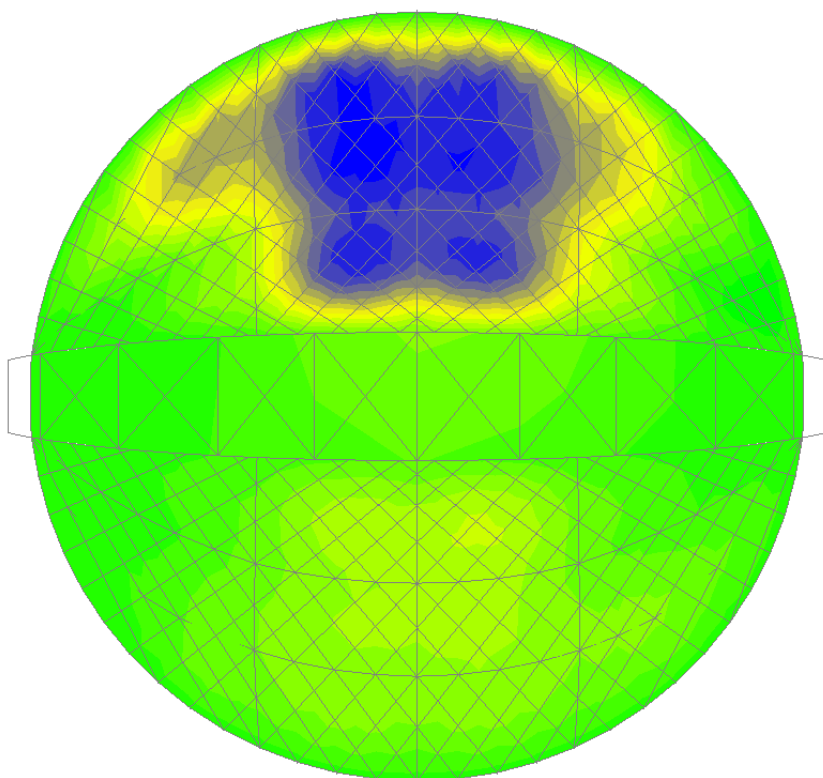
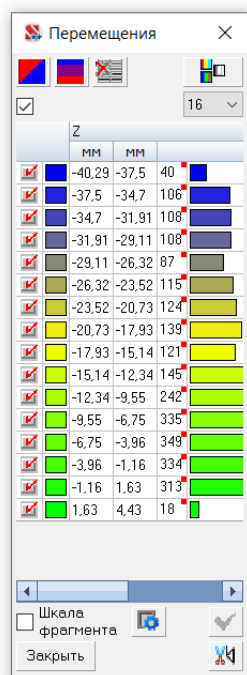


Рис. 7. Цветовое отображение значений перемещений от комбинации нагрузок при несимметричном нагружении снегом на верхнюю половину покрытия

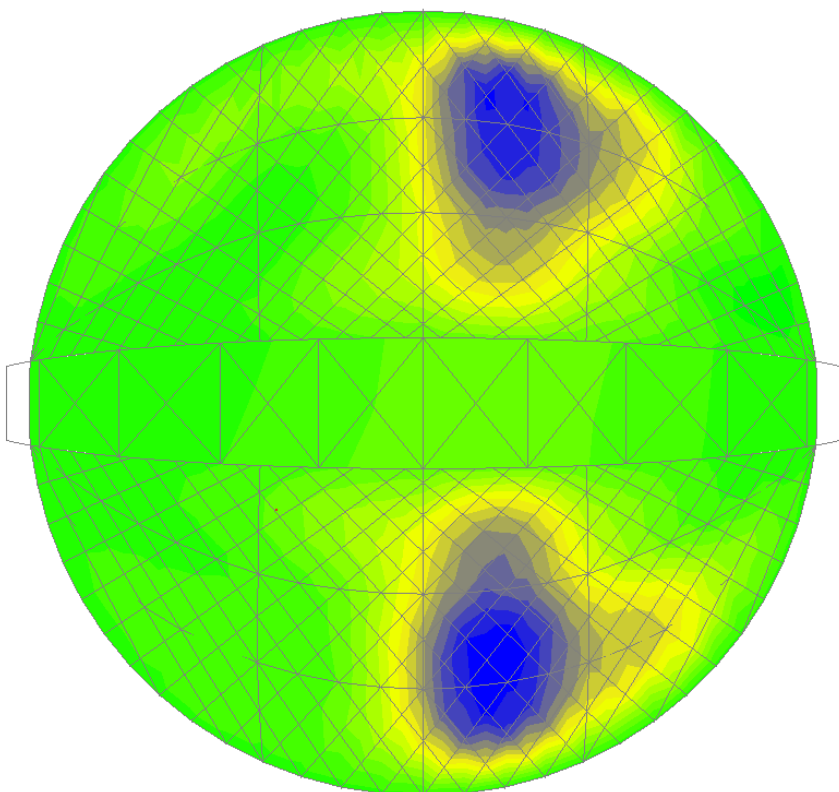
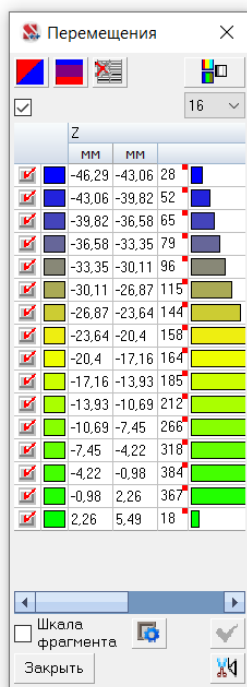


Рис. 8. Цветовое отображение значений перемещений от комбинации нагрузок при несимметричном нагружении снегом на правую половину покрытия



растяжение, так и на сжатие. Во введенных поперечных стержнях возникают растягивающие усилия. Опорное кольцо растянуто.

На рис. 6–8 (цв. вклейки) представлено цветовое отображение значений перемещений от комбинации нагрузок со снегом на половину и на все покрытие в итоговом варианте усиления конструкции. Все значения перемещений получаются незначительные, гораздо меньше допустимых.

В заключение следует отметить, что подобная конструкция большепролетного здания является привлекательной и интересной не только с точки зрения архитектурного облика, но и с точки зрения ее работы на характерные виды нагрузок. Данное исследование является основой для дальнейшего изучения этого вида покрытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трушин, С. И. Влияние морфологии сетчатого гиперблоида на его напряженно-деформированное состояние, устойчивость и собственные частоты колебаний / С. И. Трушин, Ф. И. Петренко. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 4. – С. 59–64.

2. Дыховичный, В. А. Большепролетные конструкции сооружений Олимпиады-80 в Москве / В. А. Дыховичный. – Стройиздат, 1982. – 277 с. – Текст : непосредственный.

3. Свод правил : СП 16.13330.2017. Стальные конструкции : актуализированная редакция СНиП II-23-81* : заменяет СП 16.13330.2011. – Москва : МРРФ «НИЦ «Строительство», 2017. – 151 с. – Текст : непосредственный.

4. Халаби, С. М. Численный расчет упругих тонких оболочек (с использованием проектно-вычислительного комплекса SCAD) : учебное пособие / С. М. Халаби, А. В. Макаров. – Москва : РУДН, 2008. – 131 с. (Приоритетные национальные проекты "Образование") (Инновационная образовательная программа / Российский университет дружбы народов). – Текст : непосредственный.

5. Свод правил : СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия : актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* . – Москва : Минстрой России, 2016. – 80 с. – Текст : непосредственный.

6. Экспериментальное исследование распределения ветровой нагрузки на поверхность большепролетного здания / П. А. Хазов, А. В. Февральских, Б. Б. Лампси, Ю. Д. Щелокова, А. М. Анущенко. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2019. – № 2. С. 9–16.

7. Исследование обтекания воздушными потоками большепролетной поверхности численным и экспериментальным методами / А. М. Анущенко, В. И. Ерофеев, П. А. Хазов, А. А. Сатанов, А. В. Февральских. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 1. – С. 9–18.

8. Лампси, Б. Б. Численное и физическое моделирование ветровых потоков на большепролетное покрытие / Б. Б. Лампси, С. С. Шилов, П. А. Хазов – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2022. – Том 17, № 1. – С. 21–31.

TRYANINA Nadezhda Yurevna, candidate of technical sciences, professor, the chair of theory of structures and technical mechanics; GOLITSYN Nikita Sergeevich, undergraduate student of the chair of theory of structures and technical mechanics

STRESS-STRAIN STATE OF A CONCAVE MESH SHELL WITH TWO SPINAL ARCHES AND A SUPPORT RING



Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 430-54-96;
e-mail: nadial2005@mail.ru

Key words: mesh shell, spine arches, steel support ring, displacement of shell nodes, rectilinear rods.

The article presents the results of a numerical study of the operation of a steel coating, which is a mesh shell of double negative curvature, consisting of rectilinear rigid rods and a solid support ring resting on ridge arches. An assessment of the stress-strain state of the bearing elements of the coating is given.

REFERENCES

1. Trushin S. I., Petrenko F. I. Vliyanie morfologii setchatogo giperboloida na ego napryazhyonno-deformirovannoe sostoyanie, ustoychivost i sobstvennyye chastoty kolebaniy [The influence of the morphology of a mesh hyperboloid on its stress-strain state, stability and natural frequencies of oscillations] // Stroitel'naya mekhanika i raschyot sooruzheniy [Structural Mechanics and Analysis of Constructions]. 2014. № 4. P. 59–64.
2. Dykhovichny V. A. Bolsheprolyotnye konstruksii sooruzheniy Olimpiady-80 v Moskve [Large-span structures of the Olympic Games-80 in Moscow]. – Stroyizdat, 1982. – 277 p.
3. Svod pravil: SP 16.13330.2017. Stalnye konstruksii [Steel constructions]. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp II-23-81* : zamenyaet SP 16.13330.2011. – Moscow: MRRRF «NITs «Stroitelstvo», 2017. – 151 p.
4. Svod pravil: SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya [Load and impact]. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.01.07-85*. – Moscow : Minstroy Rossii, 2016 – 80 p.
5. Khalabi S. M., Makarov A. V. Chislenny raschyot uprugikh tonkikh obolochek (s ispolzovaniem proektno-vychislitel'nogo kompleksa SCAD) [Numerical calculation of elastic thin shells (using the SCAD design and computing complex)] : Uchednoe posobie. – Moscow : RUDN, 2008. – 131 p.
6. Khazov P. A., Fevralskikh A. V., Lampsy B. B., Shyolokova Yu. D., Anuschenko A. M. Eksperimentalnoe issledovanie raspredeleniya vetrovoiy nagruzki na poverkhnost bolsheprolyotnogo zdaniya [Experimental study of the wind load distribution on the surface of large-span buildings] / Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegor. gos. arkhitektur. – stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2019. № 2. P. 9–16.
7. Anushenko A. M., Erofeev V. I., Khazov P. A., Satanov A. A., Fevralskikh A. V. Issledovanie obtekaniya vozdushnymi potokami bolsheprolyotnoiy poverkhnosti chislennym i eksperimentalnym metodami [Study of air flows streamlining a large-span surface by numerical and experimental methods] / Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegor. gos. arkhitektur. – stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2021. № 1. P. 9–18.
8. Lampsy B. B., Shilov S. S., Khasov P. A. Chislennoe i fizicheskoe modelirovanie vetrovykh potokov na bolsheprolyotnoe pokrytie [Numerical and physical modeling of wind flows on a long-span coating] / Vestnik MGSU. 2022. Vol. 17. № 1. P. 21–31.

© Н. Ю. Трянина, Н. С. Голицын, 2023

Получено: 27.02.2023 г.