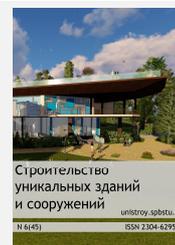


## Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: [www.unistroy.spb.ru](http://www.unistroy.spb.ru)



### Вариантное проектирование покрытия стадиона "ФИШТ" в городе Сочи

А.А. Семенов<sup>1</sup>, И.А. Порываев<sup>2\*</sup>, Р.Р. Шигапов<sup>3</sup>, С.В. Беляева<sup>4</sup>, А.А. Кокорева<sup>5</sup>

<sup>1,2,4,5</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450062, Республика Башкортостан, Уфа, Космонавтов ул., 1

<sup>3</sup> Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

#### Информация о статье

УДК 69.07

#### История

Подана в редакцию 18 ноября 2015

#### Ключевые слова

большепролетное покрытие;  
плоские фермы;  
структурное покрытие;  
перекрестные фермы;  
линзообразные фермы;  
рациональная высота;  
сравнительный анализ;

#### АННОТАЦИЯ

Объектом статьи является навес покрытия стадиона «Фишт» - места проведения Церемонии Открытия Летних Олимпийских Игр 2014. В ходе исследования предложено несколько вариантов устройства навеса – навес из двускатных ферм (существовавший в 2012-2015 гг.), навес из линзообразных ферм, переменных по высоте, навес из перекрестных ферм и навес из структурных плит. Произведен анализ напряженно-деформированного состояния разных вариантов устройства навеса с использованием ПК SCADOffice; затронуты вопросы оптимизации геометрических параметров предлагаемых вновь вариантов и проведен сравнительный анализ разработанных решений. Установлено, что использование конструкций переменной высоты наиболее эффективно.

#### Содержание

1.	Введение	8
2.	Обзор литературы	8
3.	Цель и задачи исследования	9
4.	Краткая характеристика объекта	9
5.	Создание КЭ модели расчетной схемы	12
6.	Характеристика нагрузок	12
7.	Расчет и анализ напряженно-деформированного состояния исходного варианта навеса	15
8.	Проектирование вариантов устройства навеса	16
9.	Сравнение вариантов	27
10.	Выводы	28

#### Контактный автор:

- +7(917)7765858, [asfugntu@yandex.ru](mailto:asfugntu@yandex.ru) (Семенов Александр Александрович, к. т. н, доцент)
- \*. +7(917)4011118, [iporivaev@gmail.com](mailto:iporivaev@gmail.com) (Порываев Илья Аркадьевич, старший преподаватель)
- +7(917)4588368, [shigapov.rustam@gmail.com](mailto:shigapov.rustam@gmail.com) (Шигапов Рустам Рамилевич, аспирант)
- +7(961)3652587, [lanawhite75@gmail.com](mailto:lanawhite75@gmail.com) (Беляева Светлана Владимировна, магистрант)
- +7(967)7359155, [fymrf270992@mail.ru](mailto:fymrf270992@mail.ru) (Кокорева Анна Андреевна, магистрант)

## 1. Введение

Спортивные сооружения играют очень важную роль в архитектурном облике города и нередко прямым образом отражаются на популярности и посещаемости спортивных соревнований, в том числе национальных и международных первенств по индивидуальным и игровым видам спорта. В связи с этим, проектированию и сооружению уникальных спортивных объектов уделяется значительное внимание. В ходе работ над уникальными объектами задействуется большое число материально-технических и трудовых ресурсов, поэтому перед проектировщиками каждый раз остро встает вопрос оптимизации конструктивной схемы и отдельных решений при сохранении привлекательности архитектурного облика сооружения. Так же важно обеспечить комфортабельные условия для проведения соревнований и посещения стадиона болельщиками.

Зависимость этого параметра от климатических условий заставляет проектировщиков всего мира все чаще обращать внимание на необходимость создания крытых всепогодных спортивных сооружений. Возможность круглогодичного проведения соревнований в таких сооружениях приводит к рентабельности самого сооружения в связи с большей загрузкой объекта в году. [3].

Поскольку проектирование объектов такого рода является сложной комплексной задачей с необходимостью вариации большого количества параметров и постоянных перерасчетов, как отдельных фрагментов расчетных схем, так и общей схемы в целом, для расчета используются различные программные комплексы на основе метода конечных элементов (МКЭ). Главными плюсами метода являются проработанность его теоретической базы и сравнительная легкость реализации в программных комплексах. Наиболее полно возможности реализации его в САПР изложены в трудах [5-7].

В ходе данной работы был использован программный комплекс SCAD Office (далее SCAD), являющийся одним из наиболее популярных в России и странах СНГ [4].

## 2. Обзор литературы

В вопросах исследования сооружений такого масштаба и сложности необходимо как можно более полно изучить мировой и отечественный опыт проектирования уникальных большепролетных спортивных сооружений.

Крупные спортивные соревнования проводятся достаточно часто, поэтому существует множество работ, посвященных покрытиям стадионов [10-29], в том числе построенным целенаправленно для проведения, например, футбольных соревнований [23-27].

Подобные сооружения в России и странах СНГ описаны в работах [10-17]. Значительный объем исследований выполнен П.Г. Еремеевым, В.И. Драганом, Е.В. Гороховым, Н.В. Канчели.

Наибольший интерес представляют работы по исследованию покрытий таких объектов, как Большая спортивная арена в Лужниках [14-16], Большая ледовая арена для хоккея с шайбой в г. Сочи [16], а также зарубежных объектов: футбольный стадион в Браге [26, 27], Олимпийский стадион в Мюнхене [28], стадионы в Шанхае [29].

Работы содержат развернутые требования, которые предъявляются к уникальным большепролетным сооружениям. Особое внимание уделяется вопросам исследования и назначения действующих нагрузок, главным образом, климатических: ветровых и снеговых. Описаны наиболее эффективные конструктивные решения покрытий.

Проектированию и оптимизации конструкций уникальных объектов посвящена значительная часть публикаций [30-36]. Отмечается комплексность и сложность постановки и решения задач оптимизации уникальных большепролетных покрытий. Часто выбор наиболее рационального решения происходит по результатам вариантного проектирования.

Вопросы моделирования конструкций стадионов в САПР встречаются в работах [8,26,36]. При расчете уникального объекта необходимо решать вопросы, которые выходят за рамки задач актуальных для массового строительства: учет действительной пространственной работы конструкций, проведение нелинейных расчетов, уточненный динамический расчет (включая прямое интегрирование уравнений движения), учет последовательности возведения и др.

Однако крупных работ, включающих в себя моделирование, оптимизацию и вариантное проектирование таких сооружений обнаружено не было.

### 3. Цель и задачи исследования

Цель данной работы — разработка и исследование нескольких вариантов устройства навеса покрытия стадиона Фишт.

Из поставленной цели вытекают следующие задачи:

- создать КЭ модель навеса над полем и пространственной металлической конструкции покрытия в целом стадиона Фишт в среде SCAD для каждого из предложенных вариантов;
- провести анализ напряженно-деформированного состояния несущих элементов;
- провести оптимизацию предлагаемых вариантов покрытия;
- осуществить сравнение исследуемых вариантов.

### 4. Краткая характеристика объекта

В конструктивном отношении Центральный стадион состоит из 6-ти этажного здания с трибунами и подтрибунными помещениями, запроектированными в монолитном железобетонном каркасе, и металлического большепролетного покрытия над трибунами и полем. Проект стадиона выполнен ГУП МНИИП Моспроект-4 и ООО «ГК-ТЕХСТРОЙ».

#### Покрытие над трибунами

Покрытие над трибунами стадиона (рисунок 1) представляет собой неправильную криволинейную поверхность, образованную конструкциями арочных плоских ферм переменного пролета с треугольной решеткой. Большепролетное покрытие имеет две секции над восточной и западной трибунами.

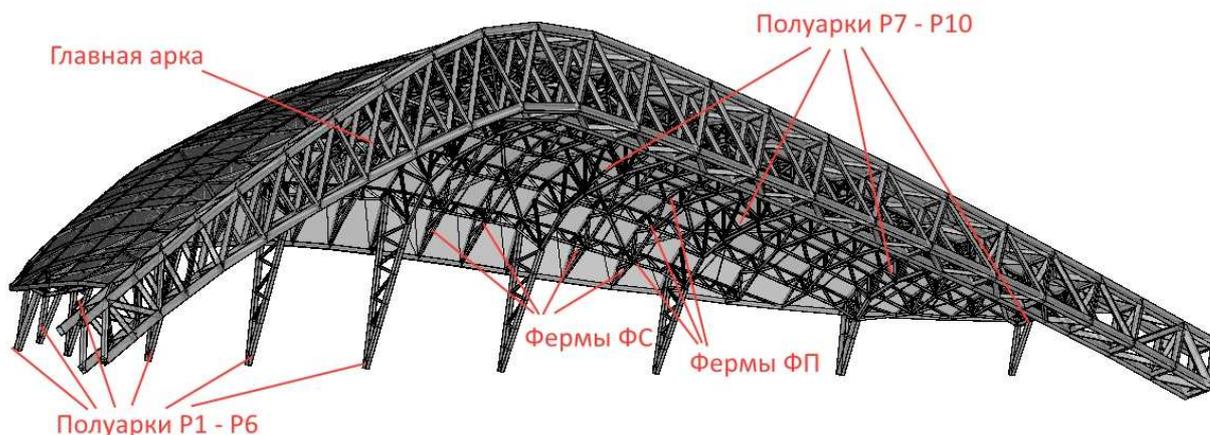


Рисунок 1. Покрытие над трибунами

Секции по фронтальному краю покрытия поддерживаются конструкциями основных (главных) арок А1 и А2. Пролет арок – 285 м, а высота – 70 м. Каждая из двух 4-х поясных арок имеет форму трапеции в поперечном направлении и отклонена от вертикальной оси на  $14^{\circ}$  в сторону трибун. Сечение основной арки запроектировано переменной высоты 7.0÷14.4 м и ширины 5.5 м. С южной стороны сооружения основная арка жестко закреплена в устои фундамента за счет опирания 4-х поясов и системы раскосов арки на траверсные опоры. С северной стороны сооружения основная арка опирается нижними поясами и системой раскосов на цилиндрический шарнир [4]. Шарнирно неподвижная цилиндрическая опорная часть обеспечивает поворот опорных узлов главной арки в своей плоскости с коэффициентом трения не более 3% при расчетной температуре наружного воздуха наиболее холодной пятидневки.

Поперечная устойчивость основных арок обеспечивается рядом второстепенных, параллельно расположенных, полуарок Р1...Р10, отходящих в перпендикулярном направлении от основных арок. Шаг полуарок 28 м, пролет 18.0÷71.0 м, высота сечения 2.5÷8.5 м. Со стороны противоположной полу, полуарки опираются шарнирно на железобетонный каркас подтрибунных помещений на шарнирно неподвижную опорную часть. Шарнирно неподвижная опорная часть обеспечивает поворот опорных узлов полуарок в 3-х плоскостях с коэффициентом трения не более 3% при расчетной температуре наружного воздуха наиболее холодной пятидневки.

Нагрузки от кровли передаются на основные арки и полуарки через систему плоских ферм ФП1...ФП6, расположенных в перпендикулярном направлении к полуаркам с шагом 12.0 м и ферм ФС1...ФС18, опирающихся на фермы ФП и расположенных в перпендикулярном направлении к ним с шагом 9.0 м (рисунок 2).

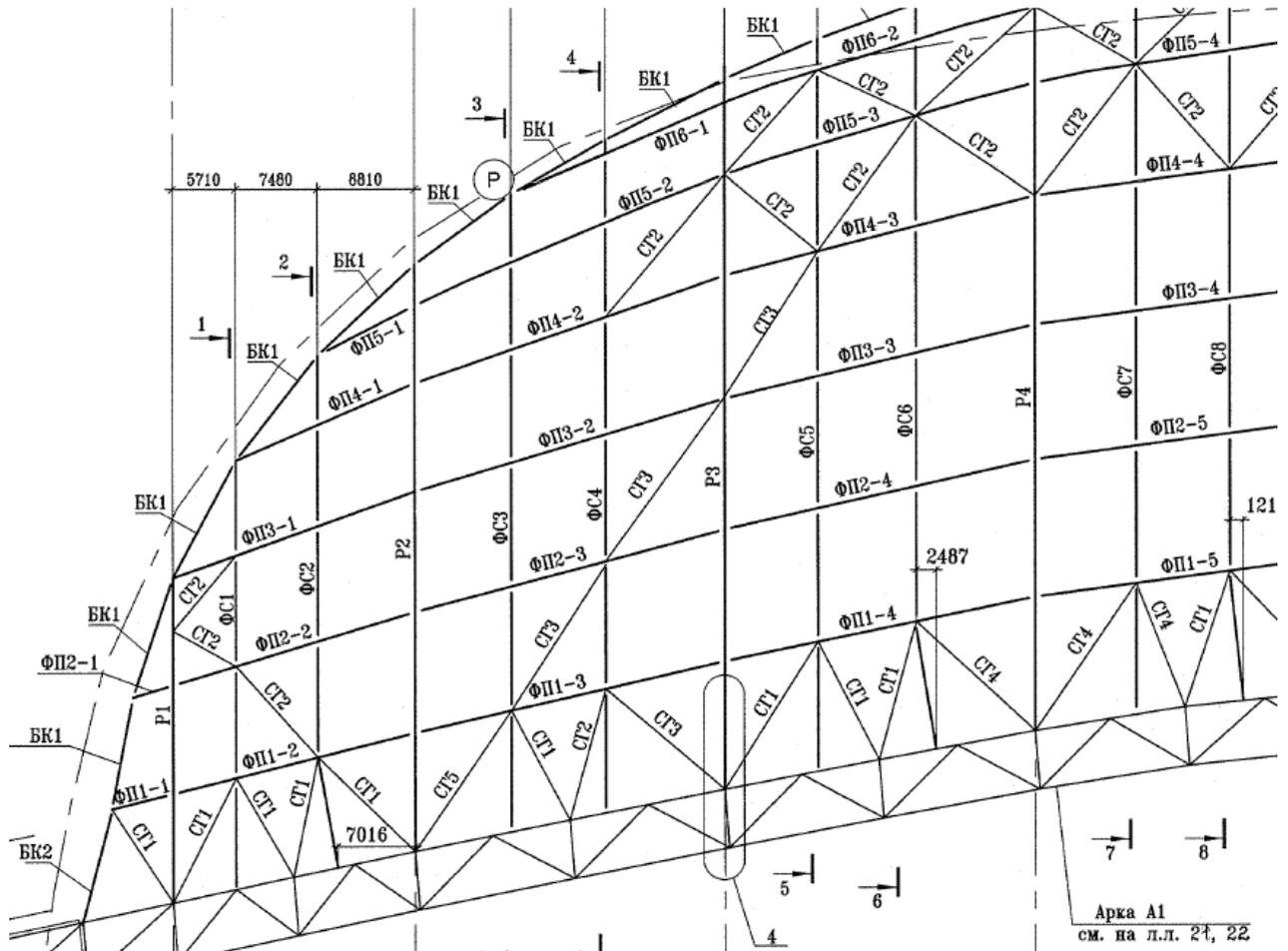


Рисунок 2. Фрагмент схемы расположения несущих конструкций покрытия

В качестве сечений элементов покрытия стадиона используются сварные коробчатые и сварные двутавровые сечения. Материал стальных конструкций – сталь марки С390 толщиной до 50 мм и сталь марки С345 толщиной до 120 мм.

Навес над полем

Пространство над полем стадиона перекрыто при помощи системы из двускатных металлических ферм.

Большепролетное покрытие над полем представляет собой пространственную систему из семнадцати плоских двускатных ферм Ф1...Ф17, опирающихся с двух сторон на арки покрытия над трибунами стадиона и соединенных системой связей и распорок (рисунки 3-5)

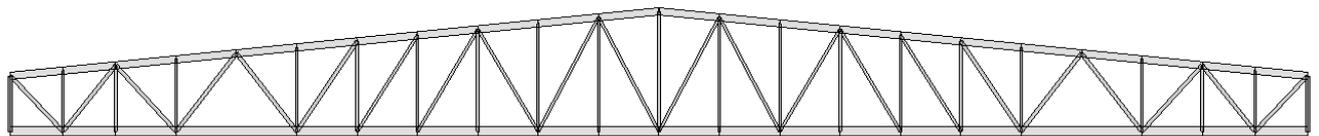


Рисунок 3. Ферма Ф9

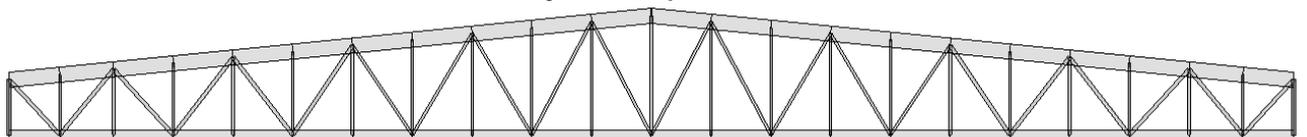


Рисунок 4. Ферма Ф14

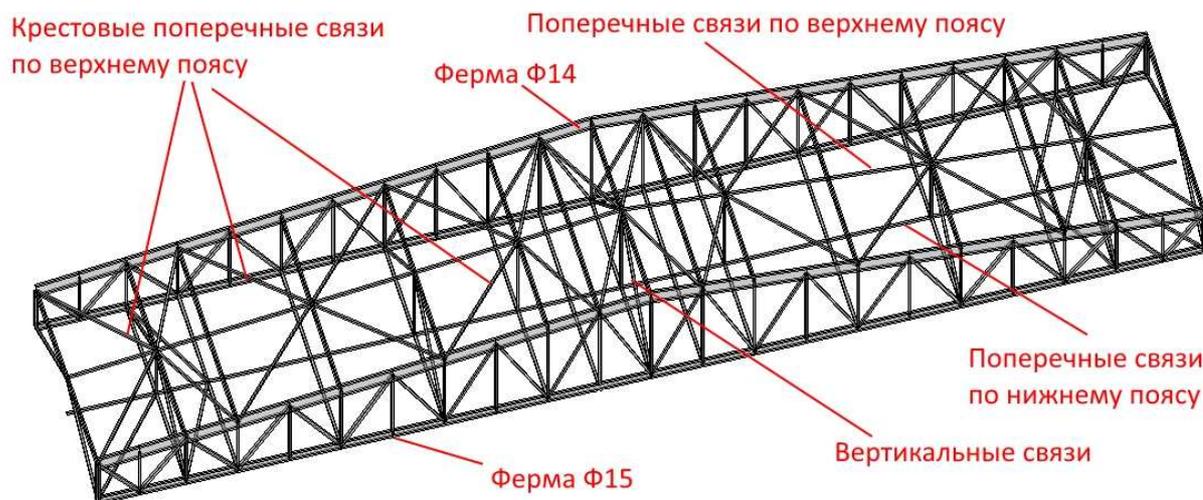


Рисунок 5. Связевой блок

Пролет ферм составляет 52,8...82,3 м, шаг ферм – 14 метров. Высота ферм 5,25...8 метров.

Фермы опираются на арки шарнирно. Со стороны западной трибуны рядовые фермы имеют шарнирно-неподвижные опоры, со стороны восточной трибуны – шарнирно-подвижные.

Фермы связевого блока (Ф8, Ф9, Ф10) со стороны западной трибуны оперты шарнирно-неподвижно, со стороны восточной трибуны – шарнирно подвижно.

Сечения:

- пояса ферм– сварные двутавры;
- раскосы и стойки – сварные двутавры и гнутосварные замкнутые профили;
- связи и распорки – гнутосварные замкнутые профили и сварные двутавры.

Материал конструкций – прокат листовой горячекатанной из стали С390 толщиной от 8 до 50 миллиметров, листовой прокат из стали С345-3, профили гнутосварные из листового проката стали С345-3.

Общая устойчивость сооружения обеспечивается системой горизонтальных связей и распорок по верхним и нижним поясам ферм, а также вертикальными связевыми фермами (рисунок 6)

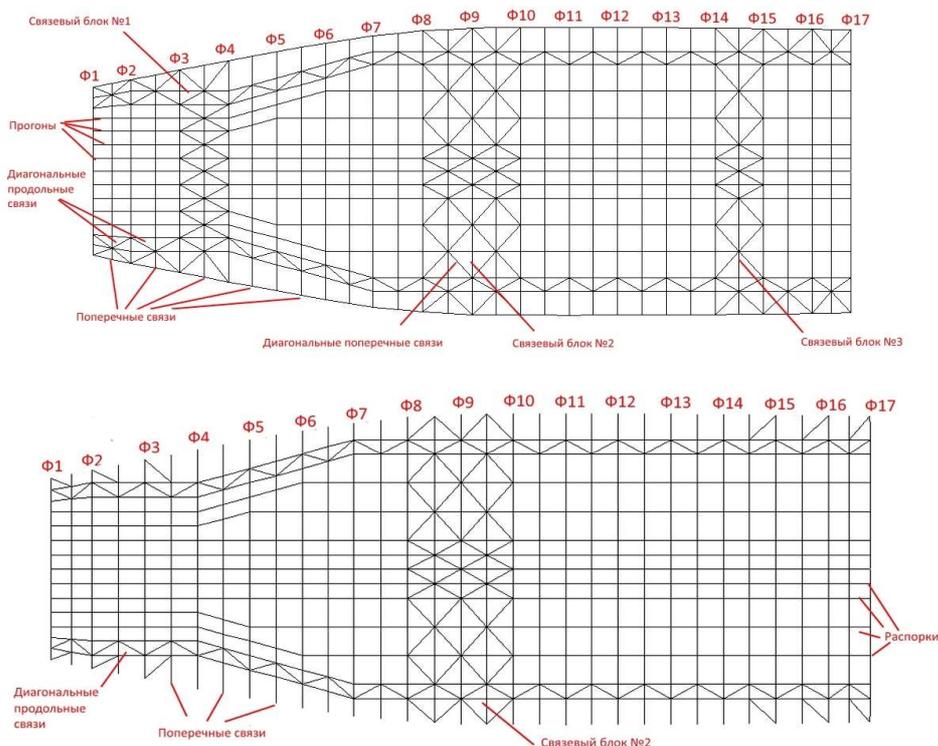


Рисунок 6. Расположение связей верхнего и нижнего поясов

Прогоны покрытия представляют собой балки, шарнирно-опертые на пояса ферм. Узлы крепления прогонов к несущим конструкциям покрытия должны обеспечивать независимую работу прогонов и несущих конструкций и передавать на несущие конструкции только вертикальные усилия.

## 5. Создание КЭ модели расчетной схемы

В ходе построения расчетной модели стадиона была использована методика, описанная в [8].

Для создания интегрированной расчетной схемы навеса над полем и покрытия над трибунами было решено использовать следующие возможности программы [4]:

- импорт геометрии системы из программы «AutoCAD»;
- прочтение данных из текстового файла;
- режим сборки.

В результате была создана пространственная расчетная модель, представленная на рисунке 7.

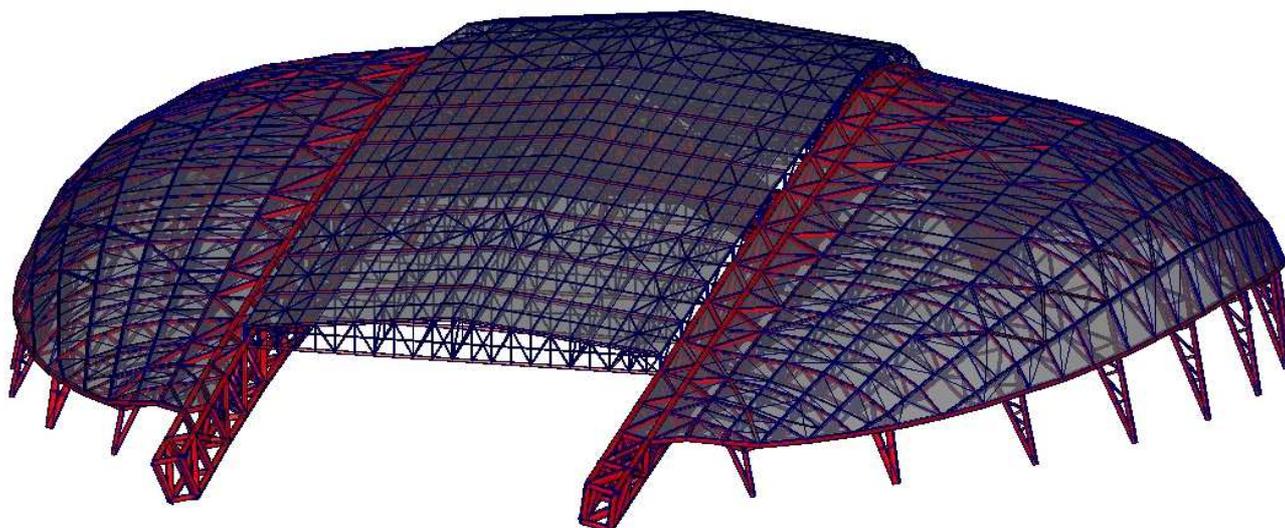


Рисунок 7. Конечно-элементная модель стадиона в среде SCAD

## 6. Характеристика нагрузок

Нагрузки были собраны на основе общих сведений о сборе нагрузок из проекта и схем [1].

При расчетах учитывался коэффициент надежности по ответственности сооружения, равный 1,2.

Постоянная нагрузка представляет собой вес металлических конструкций стадиона, приложенный при помощи штатных средств вычислительного комплекса SCAD, в котором проводились расчеты.

Длительными нагрузками были представлены вес технологических мостиков и вес экранов.

Из кратковременных нагрузок были рассмотрены:

а) снеговая - рассмотрены семь вариантов загрузений при разных направлениях ветра и с учетом возможности неравномерных загрузений. Эти схемы составлялись на основе требований раздела 10 [1], а так же результатов исследований распределения снега на куполах, овальных в плане. Площадь покрытия была разделена на зоны в зависимости от угла наклона пластин. Для каждой зоны принимался свой коэффициент  $\mu$ . При задании загрузений в SCAD расчетное значение снеговой нагрузки умножалось на  $\cos\alpha$  для перехода от горизонтальной распределенной нагрузки к наклонной (рисунок 8);

б) ветровая – задавалась по требованиям раздела 11 [1] для куполов круглых в плане зданий (рисунок 9);

в) температурная нагрузка – по требованиям раздела 13 [1] с использованием сателлита «BeCT» программного комплекса SCAD;

г) Вес движущихся декораций Церемонии Открытия и Закрытия Олимпийских Игр. При задании нагрузок от декораций (таблица 1) было выбрано несколько наиболее тяжелых декораций (от 1 до 16 т), прикладывавшихся по схемам передвижения декораций вдоль крановых путей в ходе церемоний (рисунок 10).

Таблица 1. Характеристики декораций

Наименование	Масса, т	Характеристика	Время появления
Острова (7 штук)	5	Длина – от 16 до 26 метров. Строение: металлический каркас, на который помещается пенопласт	0 ч 15 мин
Олимпийские кольца	1,2	Каждое олимпийское кольцо состоит из 36 лопастей-лезвий с подсветкой. Диаметр колец увеличивался в размере вдвое - с 5 до 10 метров.	0 ч 17 мин
Тройка	9	Одна из самых технически сложных конструкций. В длину она составила 23 метра, в высоту — 20.	1 ч 28 мин
Средневековое Солнце	2,5	Строение: каркас из стали и пластика.	1 ч 29 мин
Паровоз	н/д	н/д	1 ч 49 мин
Рабочий и колхозница	н/д	Надувные конструкции созданы из синтетической ткани	1 ч 57 мин
Олимпийские боги зимних видов спорта (20)	1	Высота от 8 до 13 метров. Сделаны из металлического профиля и инкрустированы светодиодами	2 ч 40 мин
Ледокол «Мир»	16	н/д	Паралимпиада

На основании проведенного анализа были выбраны невыгодные сочетания нагрузок по разделу 6 [1] для каждого из покрытий в отдельности. Для сравнения эффективности вариантов покрытий была выбрана комбинация, при которой деформации каждого из покрытий оказались максимальны.

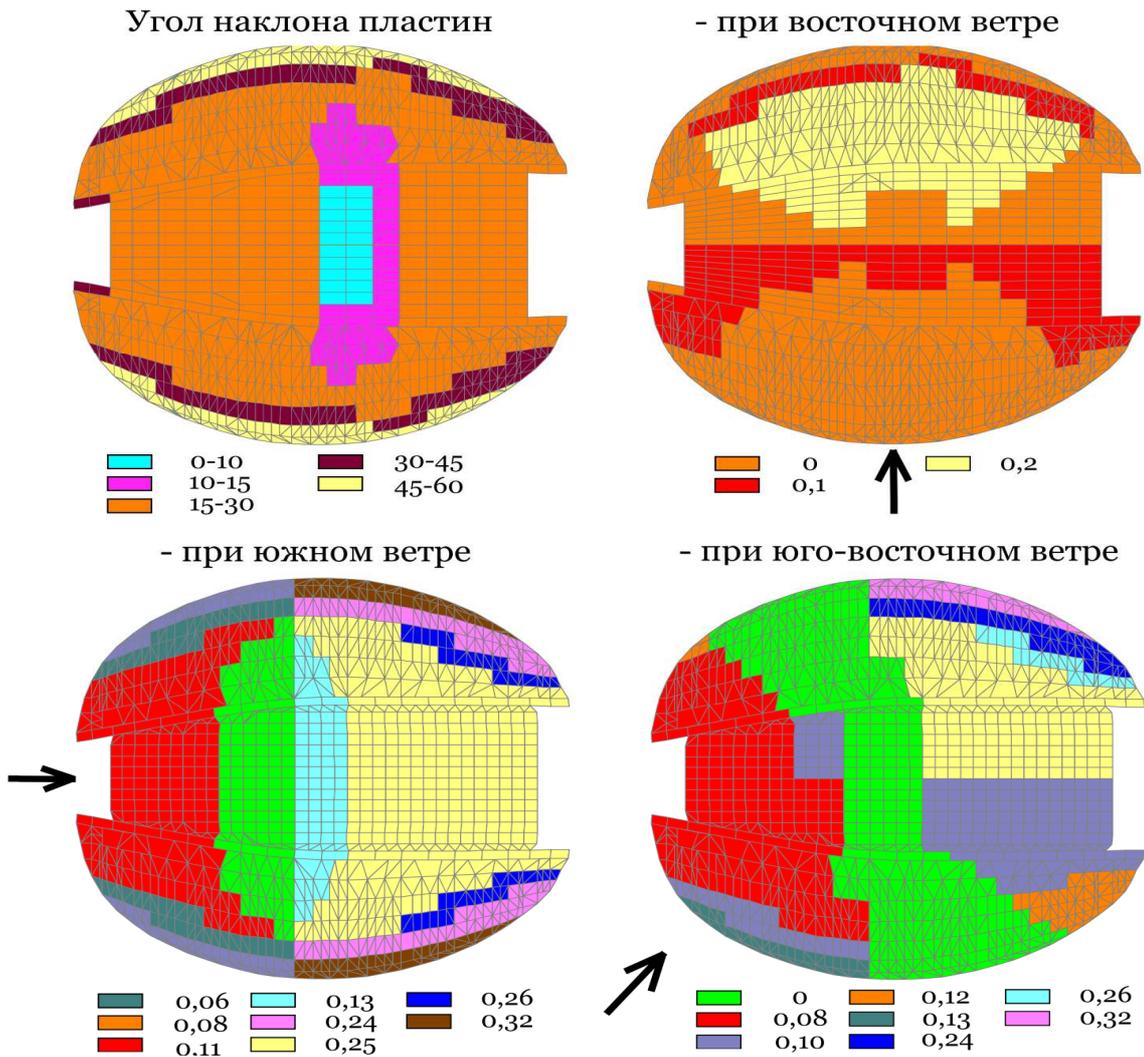


Рисунок 8. Задание снегового нагружения

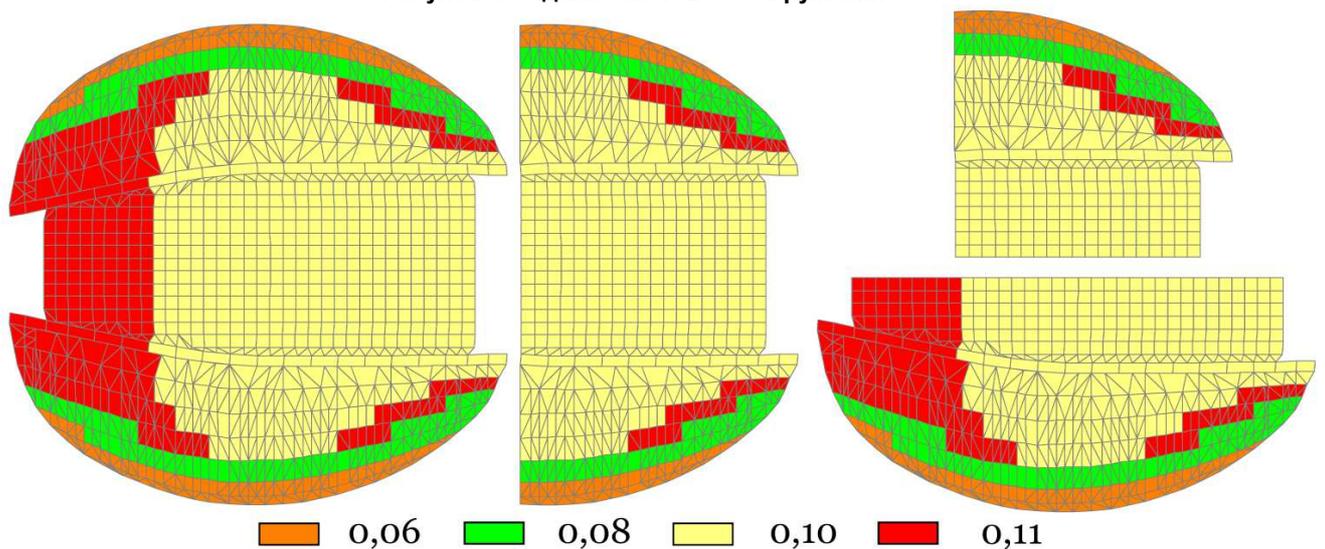


Рисунок 9. Задание ветрового нагружения

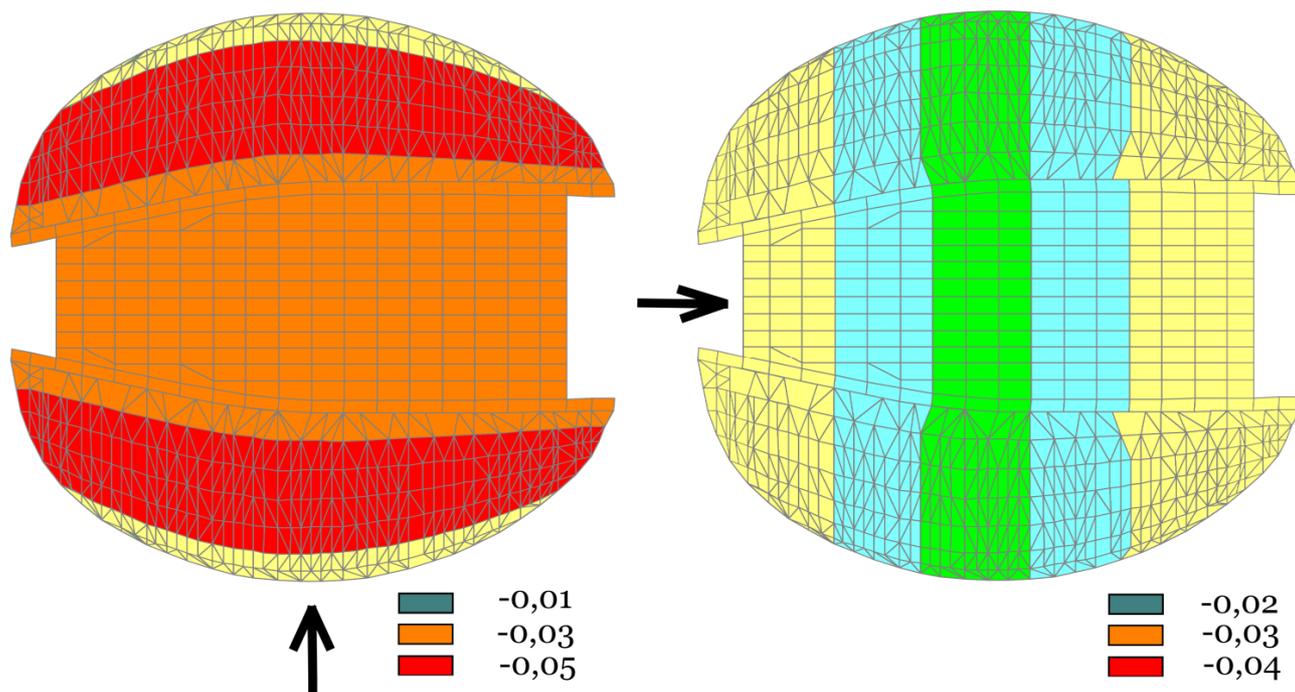


Рисунок 10. Моделирование перемещения декораций на примере загрузки «Острова»

## 7. Расчет и анализ напряженно-деформированного состояния исходного варианта навеса

Для того, чтобы привести все предполагаемые варианты устройства навеса к одним и тем же условиям, было принято решение изменить исходную схему навеса в соответствии с вновь собранными нагрузками, а именно – изменить сечения конструктивных элементов навеса. В частности, сварные двутавры поясов ферм были заменены на двутавры прокатные.

В процессе подбора сечений был задействован постпроцессор SCAD «Проверка сечений из металлопроката».

В результате расчета были получены следующие характеристики исходного варианта навеса:

- масса: 1324,6 т. Для определения массы навеса было сформировано отдельное нагружение стандартной функцией «Собственный вес», примененной для фрагментированной схемы, не включающей в себя покрытие над трибунами и пластины.

- значения максимальных деформаций в самой большой ферме (рисунок 11).



Рисунок 11. Значения деформаций в ферме Φ14

Максимальное значение деформации:  $\Delta = 353 - 240 = 113$  мм.

- Деформированные схемы стадиона приведены на рисунках 12-13

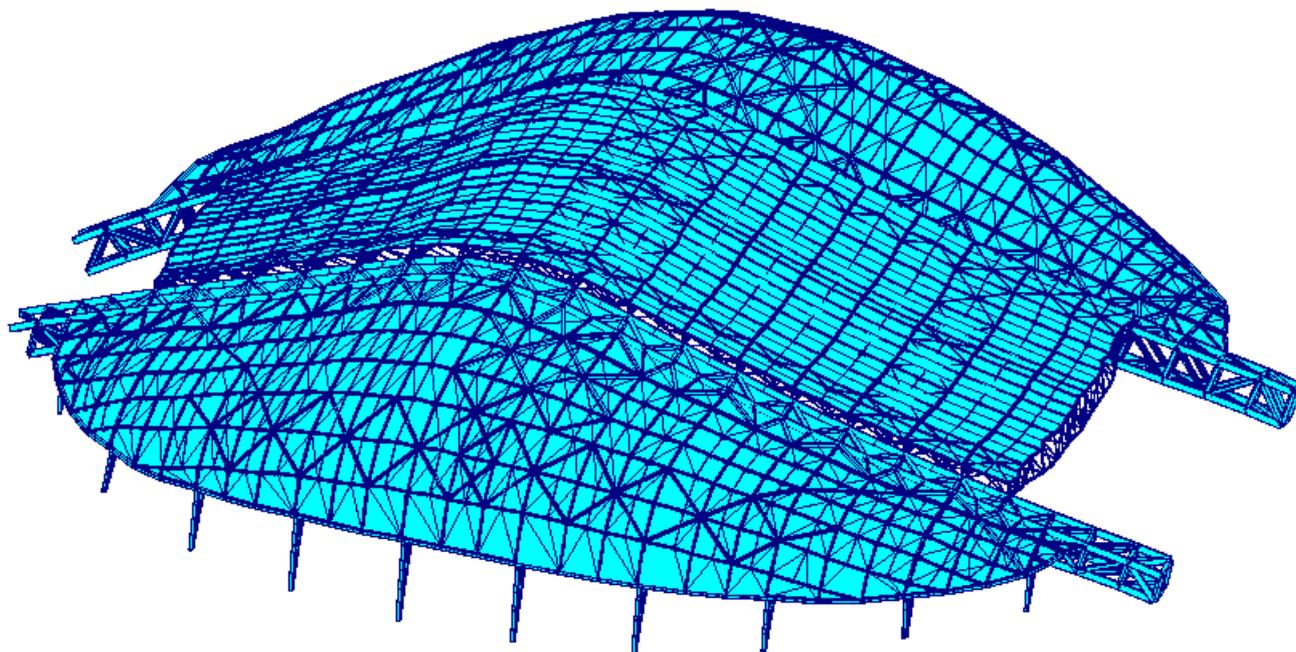


Рисунок 12. Деформированная схема стадиона

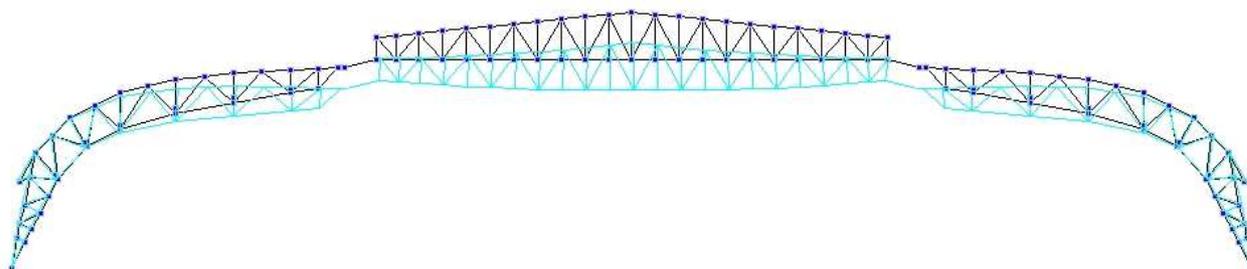


Рисунок 13. Деформированная схема поперечного сечения стадиона

– продольные усилия (кН) в ферме Ф14 приведены на рисунке 14.



Рисунок 14. Усилия в ферме Ф14

## 8. Проектирование вариантов устройства навеса

Исходный вариант устройства навеса плохо вписывается в архитектурный облик стадиона, поэтому в ходе работы были рассмотрены альтернативные варианты перекрытия пространства над полем.

Существует много способов перекрыть 90-метровый пролет: балочные покрытия; рамные системы; арки; пространственные оболочки и структуры; висячие системы; перекрестные схемы [9]

В данной работе предложены 3 новых конструктивных решения навеса.

### 1 вариант – навес из перекрестных ферм.

#### 1. Несущие элементы

В качестве конструкции покрытия между двумя главными арками была выбрана система перекрестных ферм, пересекающихся в плане под углом 90°, и составляющих сетку из квадратных ячеек (рисунки 15-16).

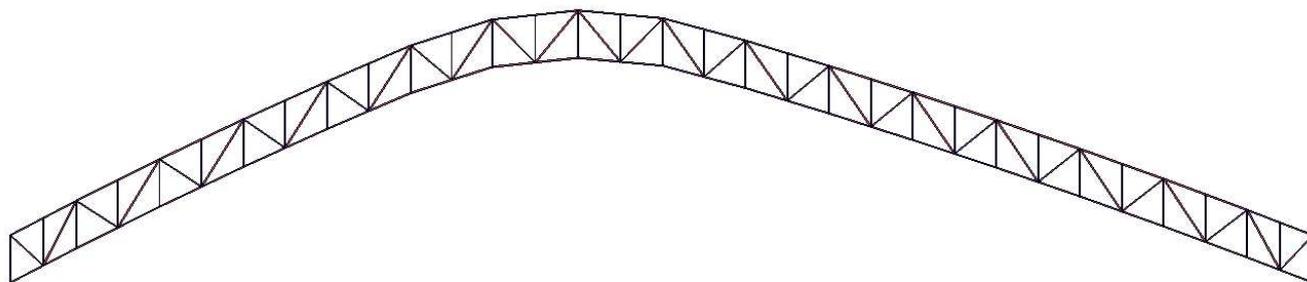


Рисунок 15. Продольная ферма

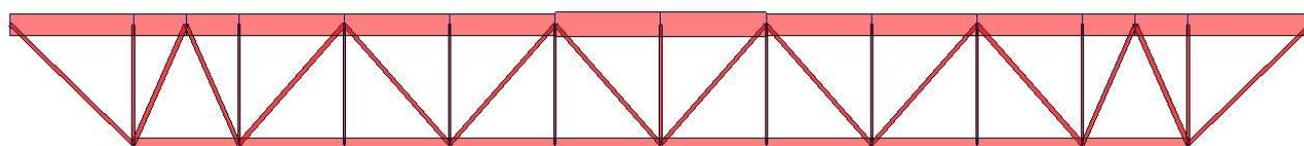


Рисунок 16. Поперечная ферма

## 2. Пространственная жесткость

Пространственная жесткость такой системы обеспечивается введением связевых блоков (рисунки 17-18) и продольных распорок.

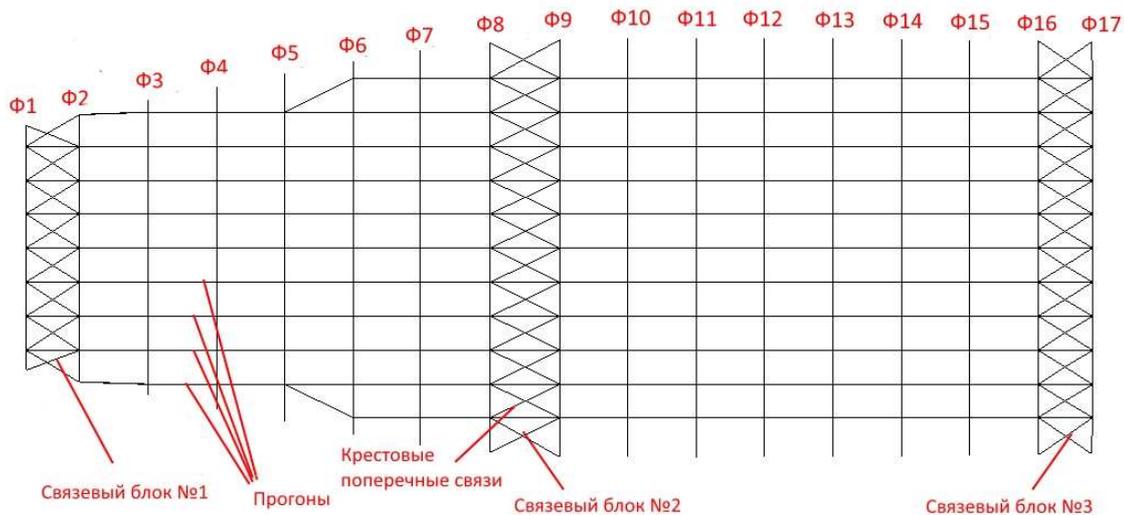


Рисунок 17. Связи по верхнему поясу

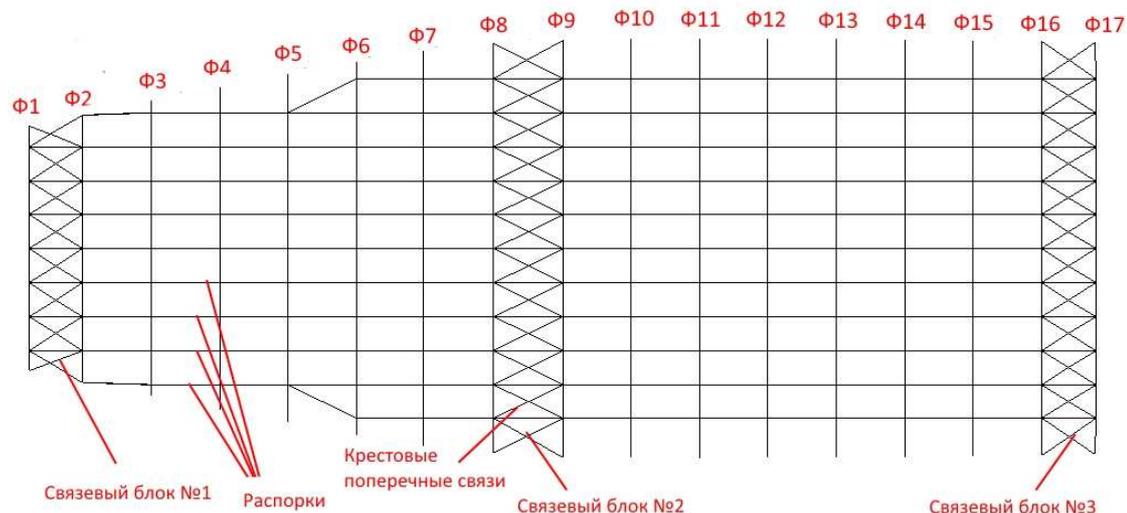


Рисунок 18. Связи по верхнему поясу

### 3. Построение модели и расчет

При создании интегрированной расчетной модели стадиона использован режим сборки SCAD [4]. В результате была создана пространственная расчетная схема, представленная на рисунке 19.

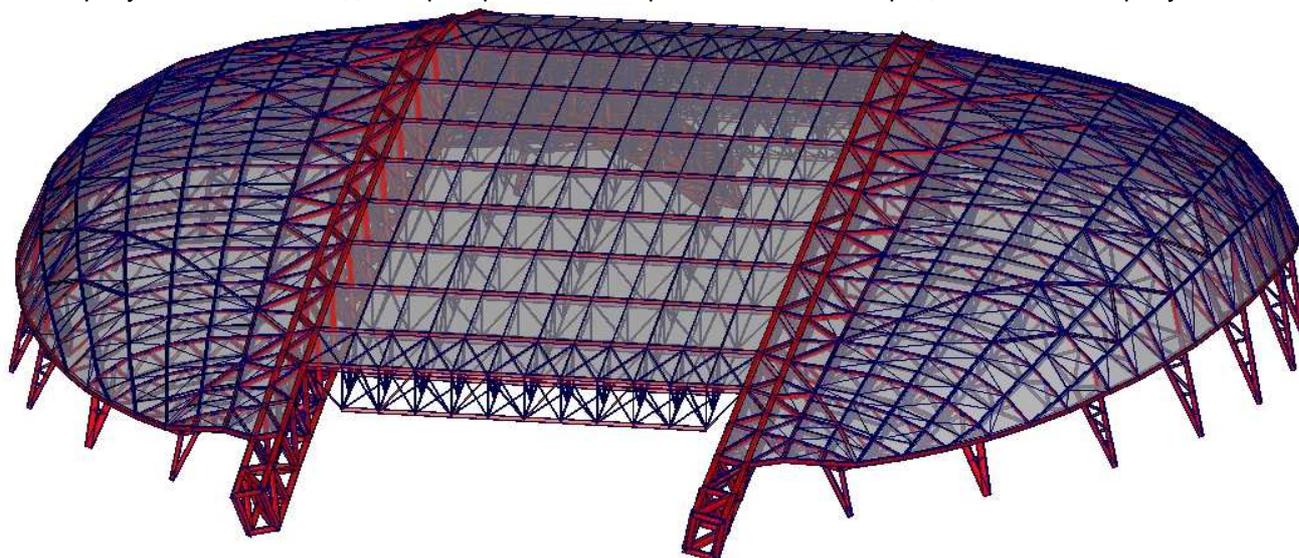


Рисунок 19. Модель стадиона в SCAD

### 4. Вариантный анализ

Вариантный анализ заключается в нахождении оптимальных геометрических и физических параметров путем минимизирования целевой функции. Математическое представление задачи проектирования записывается в форме [37]:

$$P = \min\{F(x_1), F(x_2), F(x_3), \dots, F(x_n)\} \quad (1)$$

где –  $F$  – некая целевая функция,

$x$  – оптимизируемый параметр.

В качестве оптимизируемого параметра рассмотрена высота ферм навеса при неизменных форме и координатах верхнего пояса.

В качестве целевых функций рассмотрены итоговый вес навеса и значение максимальных деформаций в ферме максимального пролета.

Выбор оптимальной высоты конструкции покрытия

Для анализа поставленной задачи было создано 10 моделей несущих конструкций покрытия, отличающихся высотой с шагом 1 м.

Исследуемый диапазон высот: 5-14 м.

На основе полученных данных были выведены зависимости целевых функций от высоты (рисунки 20-21)

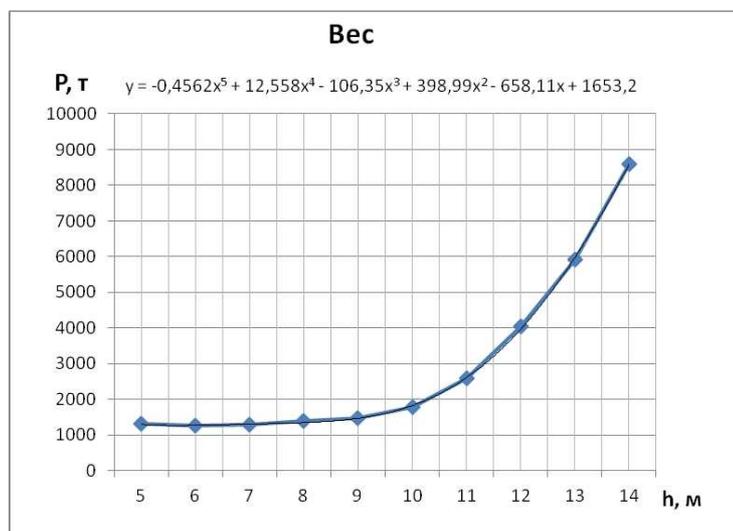


Рисунок 20. Зависимость веса покрытия от высоты

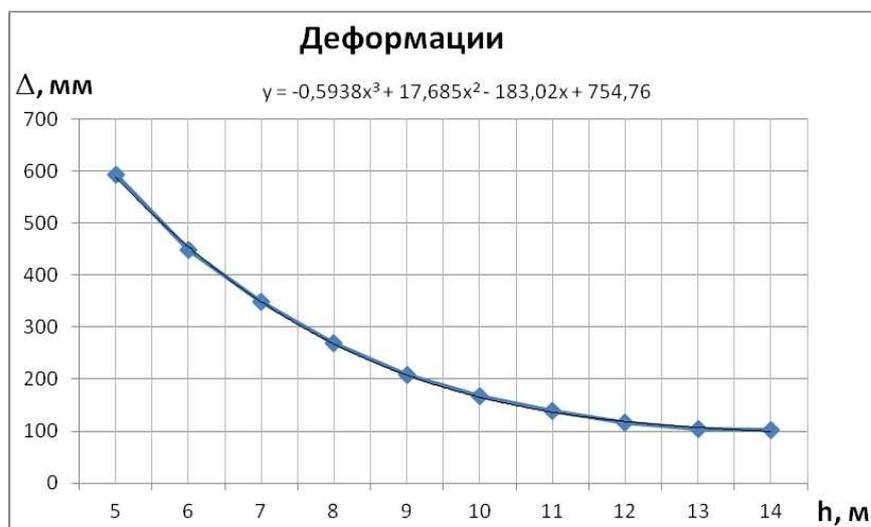


Рисунок 21. Зависимость максимальных вертикальных деформаций от высоты

На основе сравнения и анализа полученных диаграмм можно сделать следующие выводы:

- металлоемкость уменьшается с уменьшением высоты покрытия;
- деформации снижаются и стабилизируются с увеличением высоты покрытия;

#### 5. Анализ результатов расчета

В процессе подбора сечений был задействован постпроцессор SCAD «Проверка сечений из металлопроката».

В результате расчета были получены следующие характеристики варианта навеса:

- масса: 1099 т. Для определения массы навеса было сформировано отдельное нагружение стандартной функцией «Собственный вес», примененной для фрагментированной схемы, не включающей в себя покрытие над трибунами и пластины.

- деформированная схема и значения максимальных деформаций (рисунок 22)

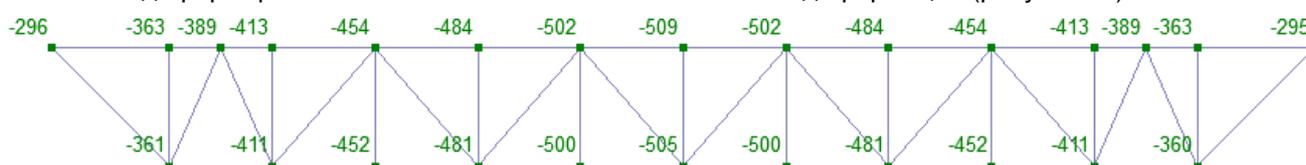


Рисунок 22. Значения деформаций в ферме Ф14

Итоговое значение деформации:  $\Delta = 508,6 - 295,9 = 212,7$  мм.

- Деформированные схемы стадиона приведены на рисунках 23-24

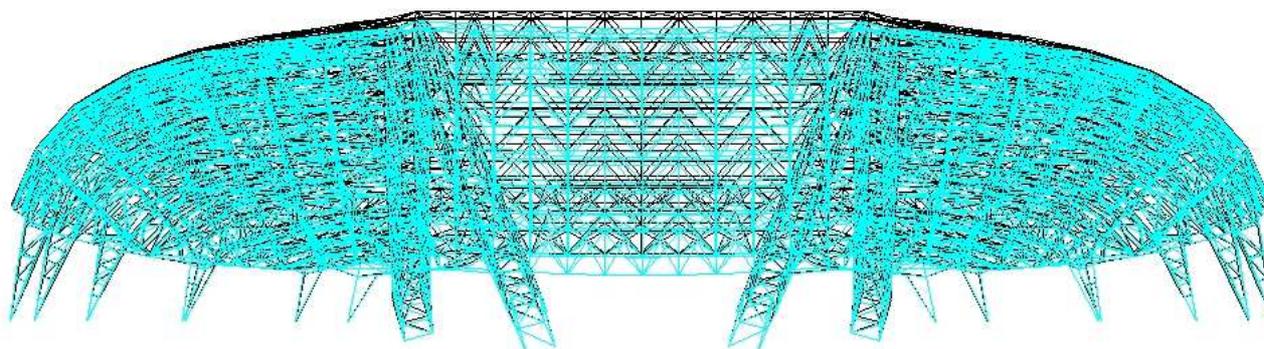


Рисунок 23. Деформированная схема стадиона

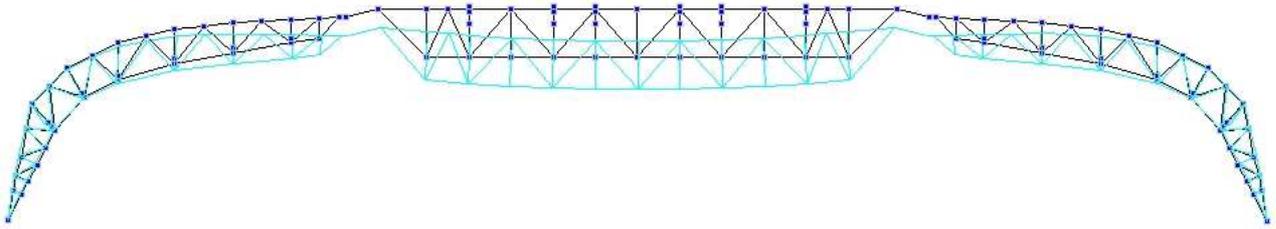


Рисунок 24. Деформированная схема поперечного сечения стадиона

– усилия в ферме Ф14 приведены на рисунке 25.

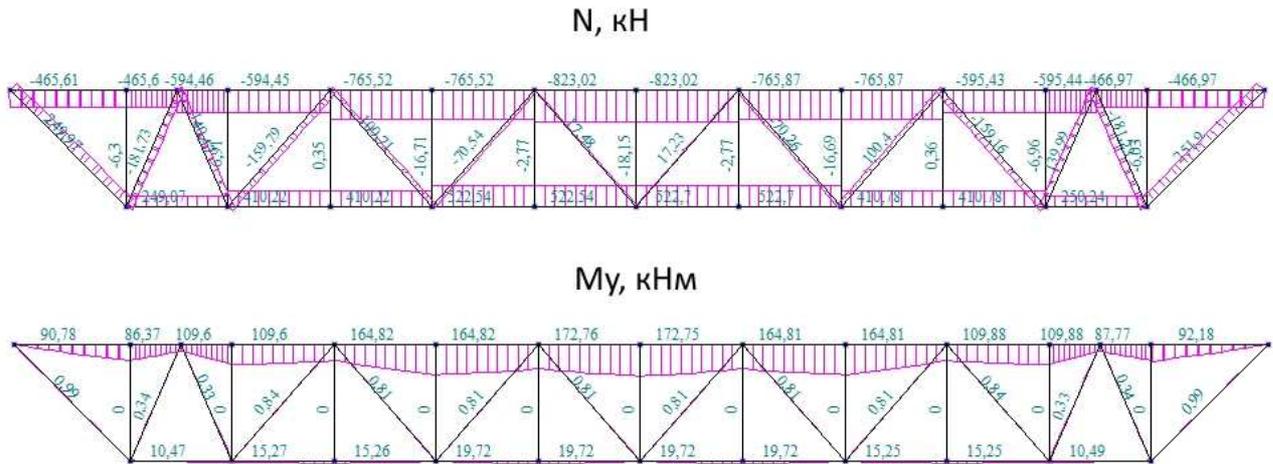


Рисунок 25. Усилия в ферме Ф14

## 2 вариант – навес из структурных плит.

### 1. Несущие элементы

Большепролетное покрытие над полем представляет собой структурную плиту – пространственную стержневую конструкцию, шарнирно опирающуюся на основные арки покрытия.

Верхний и нижний пояса структурной плиты представляют собой систему квадратных ячеек, сложенных продольными и поперечными стержнями. Шаг продольных стержней верхнего пояса составляет 6,45 м. Шаг поперечных стержней верхнего пояса – 7 м. Шаг продольных стержней нижнего пояса составляет 6,37 м, шаг поперечных стержней – 7 м.

Высота структуры составляет 7 м. Пояса плиты соединены между собой системой раскосов. Структурная плита опирается на арки с помощью опорных раскосов различной длины, исходящих, как от нижнего пояса, так и от верхнего.

Опорные раскосы структурной плиты опираются в узлах верхнего пояса арки и в середине профилей верхнего пояса арки.

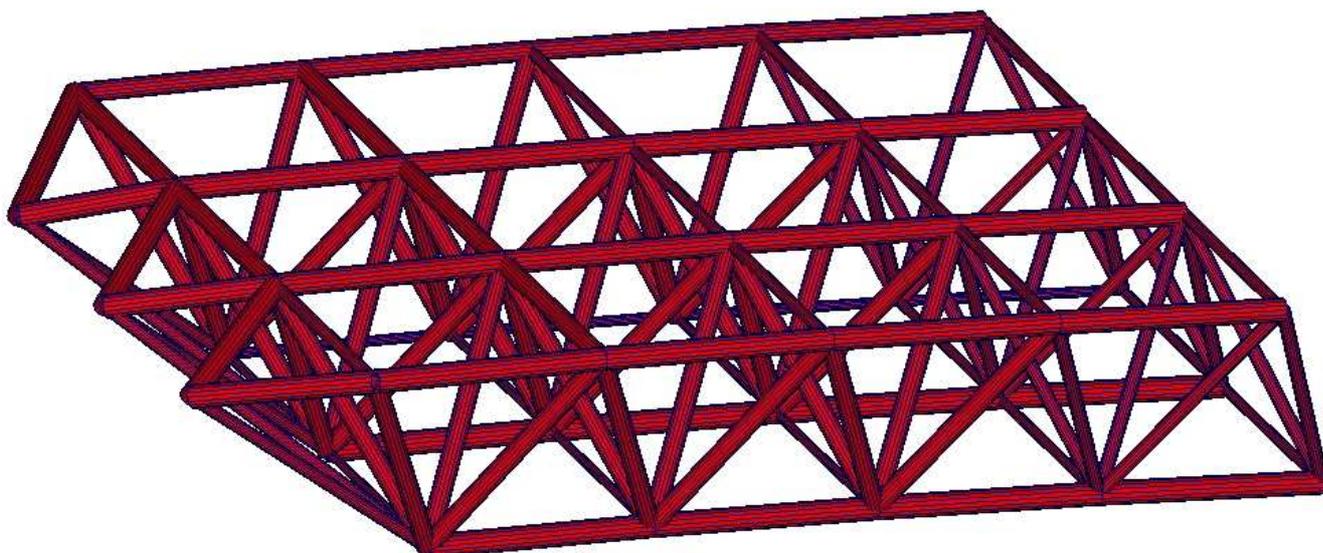


Рисунок 26. Структурный блок

2. Пространственная жесткость

Общая устойчивость сооружения обеспечивается пространственной работой структурного покрытия.

3. Построение модели и расчет

При создании интегрированной расчетной модели стадиона использован режим сборки SCAD [4]. В результате была создана пространственная расчетная схема, представленная на рисунке 27.

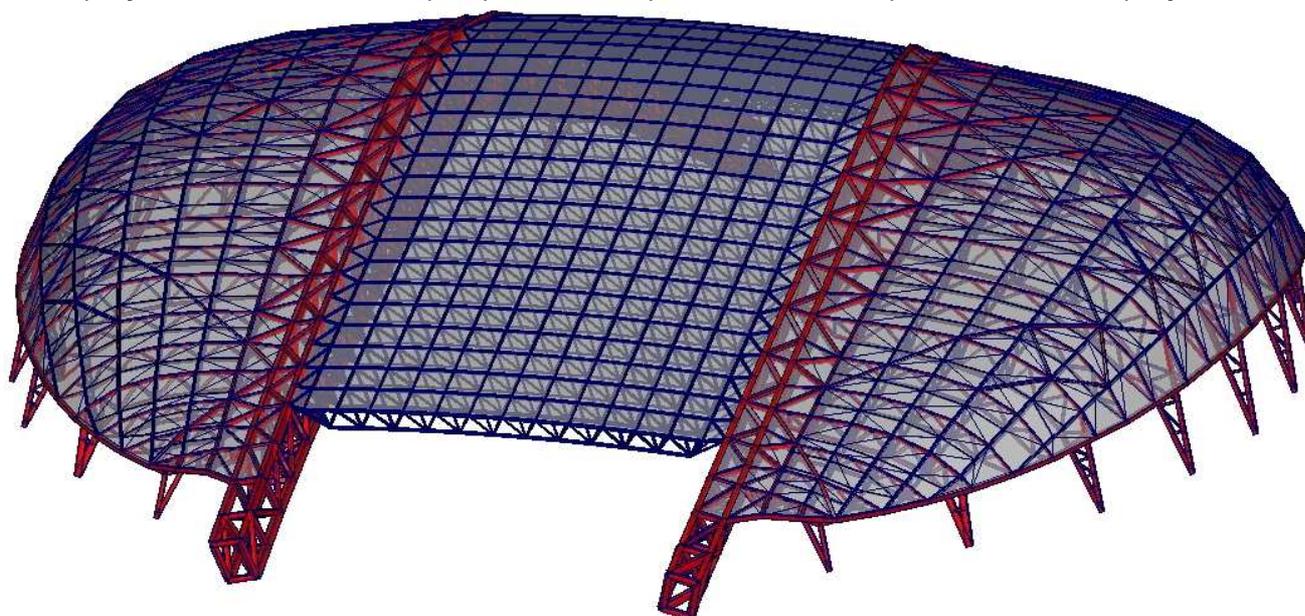


Рисунок 27. Модель стадиона в SCAD

4. Вариантный анализ

Выбор оптимальной высоты конструкции покрытия

Для анализа поставленной задачи было создано 10 моделей несущих конструкций покрытия, отличающихся высотой с шагом 1 м.

Исследуемый диапазон высот: 4 -14 м.

На основе полученных данных были выведены зависимости целевых функций от высоты (рисунки 28-29)

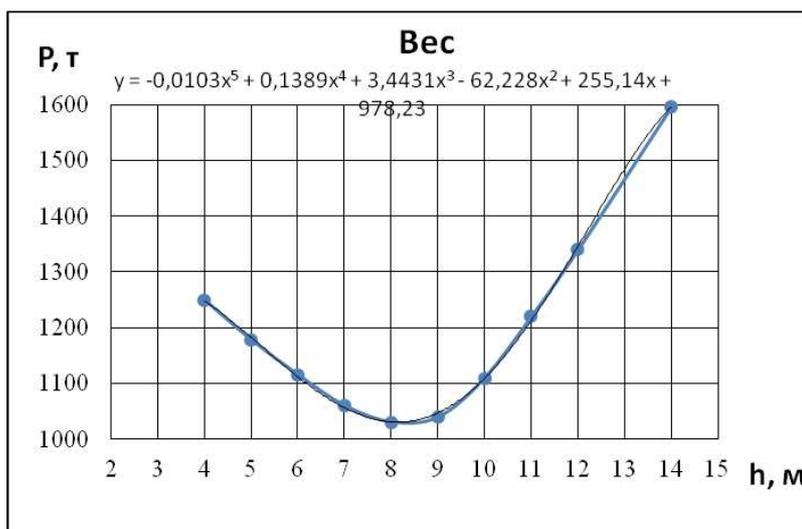


Рисунок 28. Зависимость веса покрытия от высоты



Рисунок 29. Зависимость максимальных вертикальных деформаций от высоты

По итогам вариантного анализа определяется, что навес высотой 9 м является наиболее оптимальным по показателям веса и деформативности.

#### 5. Анализ результатов расчета

В процессе подбора сечений был задействован постпроцессор SCAD «Проверка сечений из металлопроката».

В результате расчета были получены следующие характеристики исходного варианта навеса:

- масса: 1039 т.
- значения максимальных деформаций (рисунок 30)

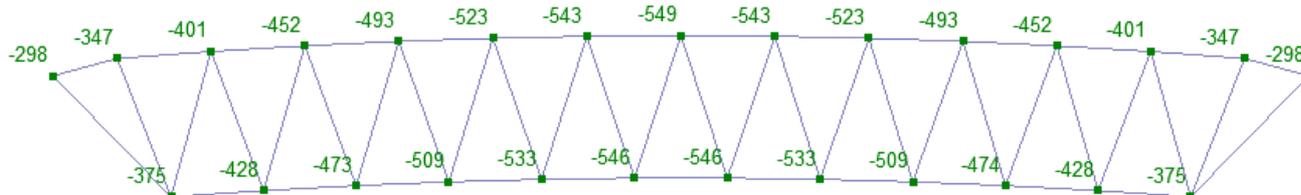


Рисунок 30. Деформации в наибольшем пролете

Итоговое значение деформации:  $\Delta = 549,3 - 298,2 = 251,1$  мм.

- Деформированные схемы стадиона приведены на рисунках 31-32.

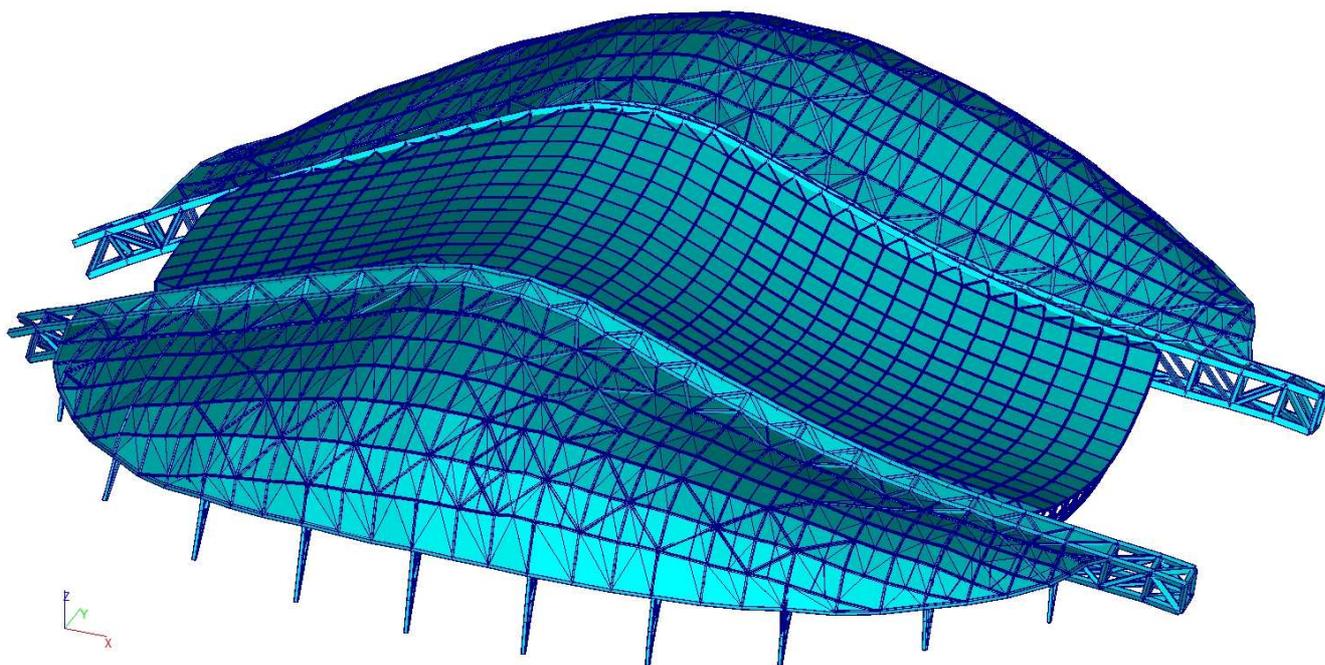


Рисунок 31. Деформированная схема стадиона

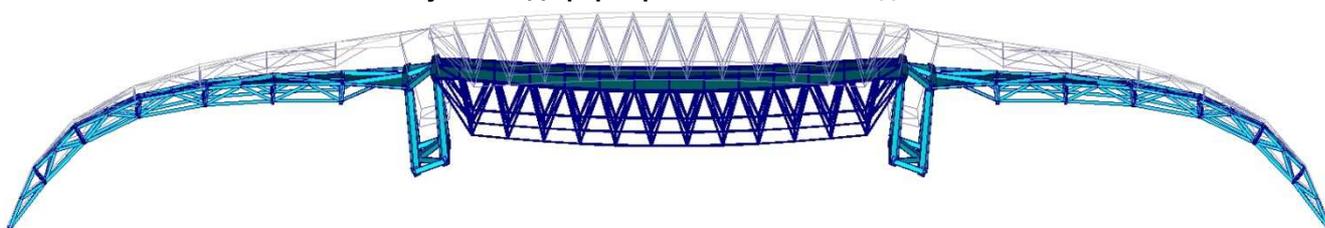


Рисунок 32. Деформированная схема поперечного сечения стадиона

– усилия в наибольшем пролете приведены на рисунке 33.

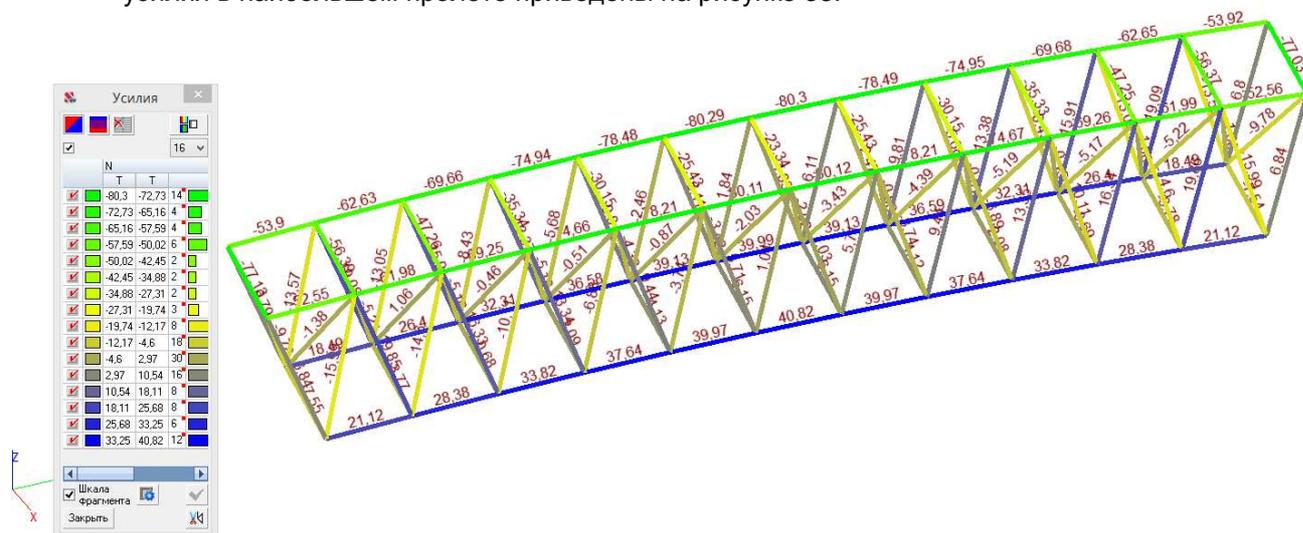


Рисунок 33. Усилия в элементах структуры

### 3 вариант – навес арочных линзообразных ферм.

#### 1. Несущие элементы

В качестве несущего элемента применены арочные фермы линзообразного очертания (рисунок 34), изменяющиеся по высоте в зависимости от пролета.

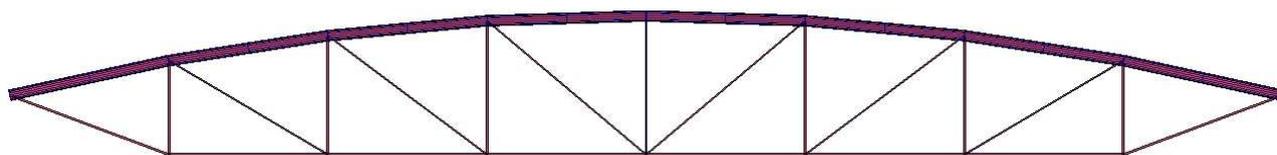


Рисунок 34. Ферма Ф14

## 2. Пространственная жесткость

Пространственная жесткость обеспечивается введением связевых блоков (рисунки 35-36)

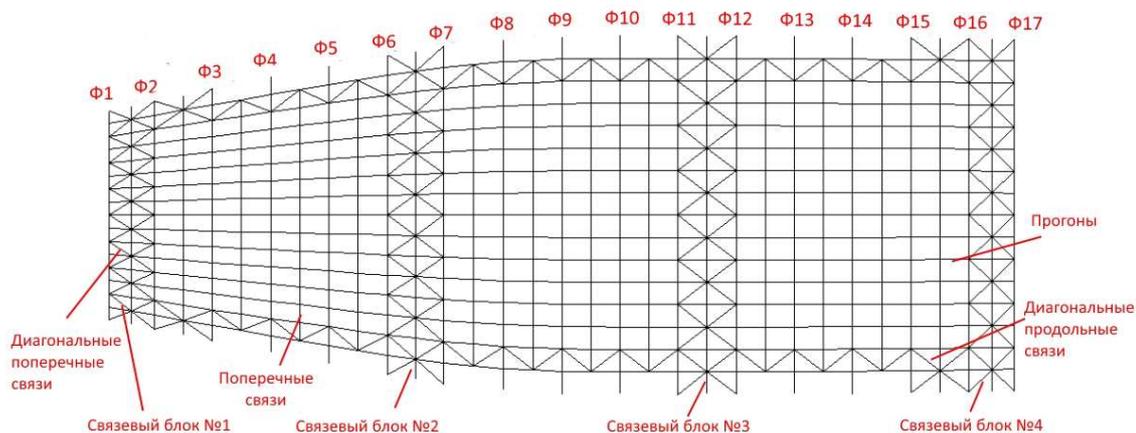


Рисунок 35. Связи по верхнему поясу

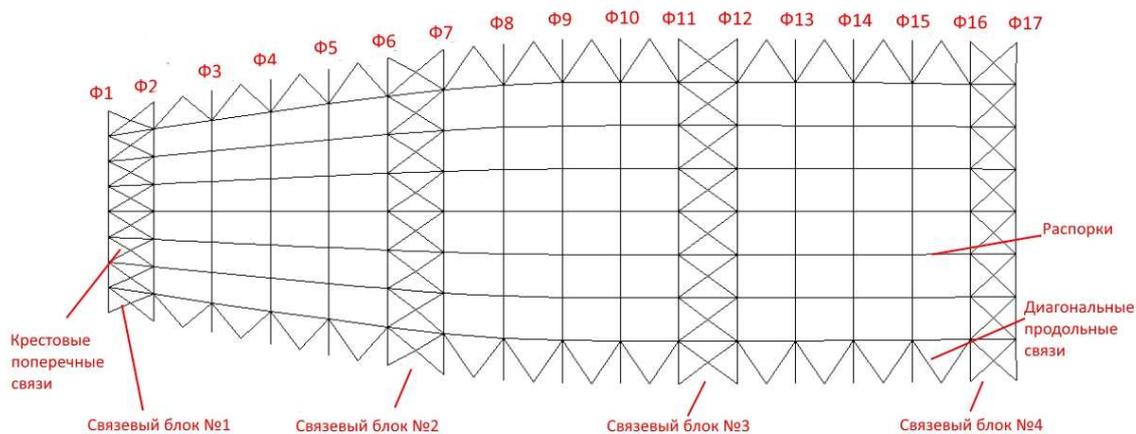


Рисунок 36. Связи по верхнему поясу

## 3. Построение модели и расчет

Для создания модели интегрированной расчетной схемы навеса над полем и покрытия над трибунами было решено использовать следующие возможности программы [4]:

- импорт геометрии системы из программы «AutoCAD»;
- прочтение данных из текстового файла;
- режим сборки.

В результате была создана пространственная расчетная схема, представленная на рисунке 37.

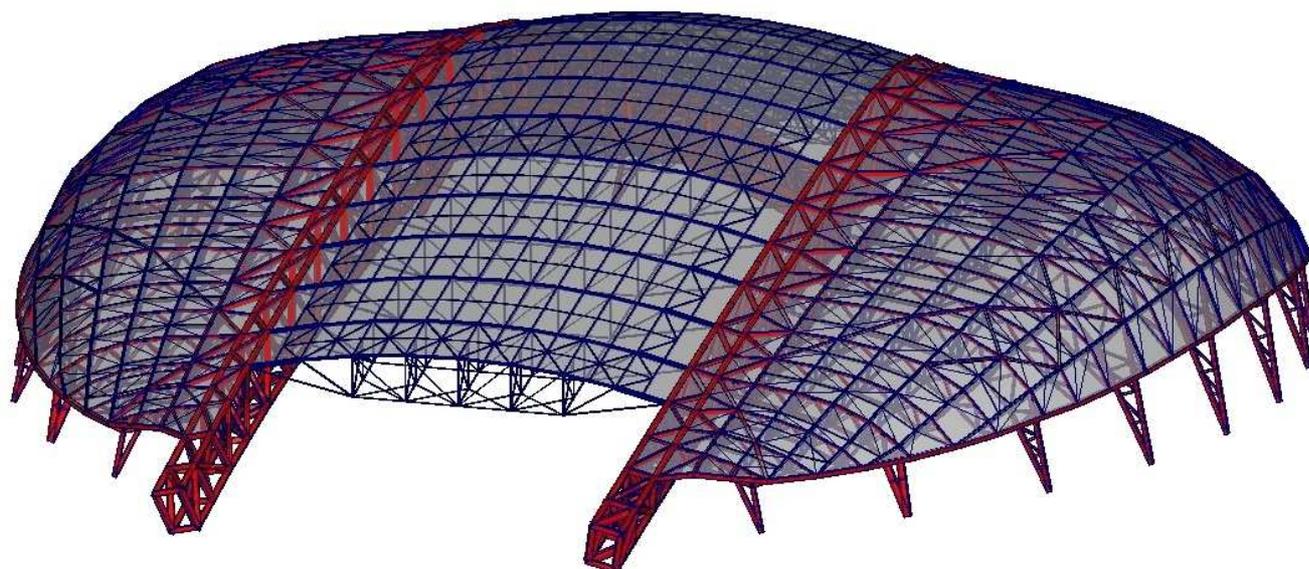


Рисунок 37. Модель стадиона в SCAD

#### 4. Вариантный анализ

Выбор оптимальной высоты конструкции покрытия

Для анализа поставленной задачи было создано 10 моделей несущих конструкций покрытия, отличающихся высотой с шагом 1 м.

Каждая ферма имеет разную высоту в зависимости от пролета. Анализ был проведен для фермы Ф14 пролетом 89 м. В результате было получено оптимальное соотношение между отклонениями от горизонтали для верхнего и нижнего поясов. За первоначальный вариант принимается такое положение нижнего пояса, при котором эти отклонения равны ( $h = 9,4$  м)

На основе полученных данных были выведены зависимости целевых функций от высоты конструкций покрытия (рисунки 38-39).

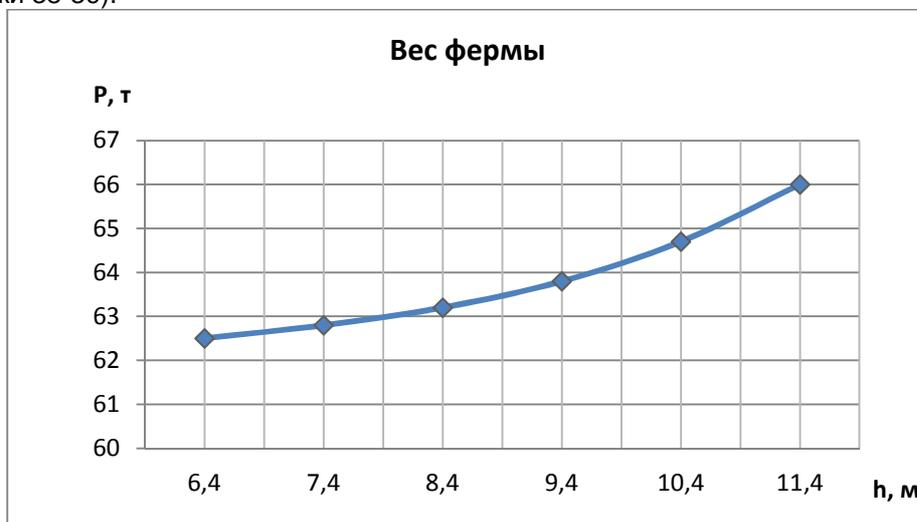


Рисунок 38. Зависимость веса покрытия от высоты конструкций

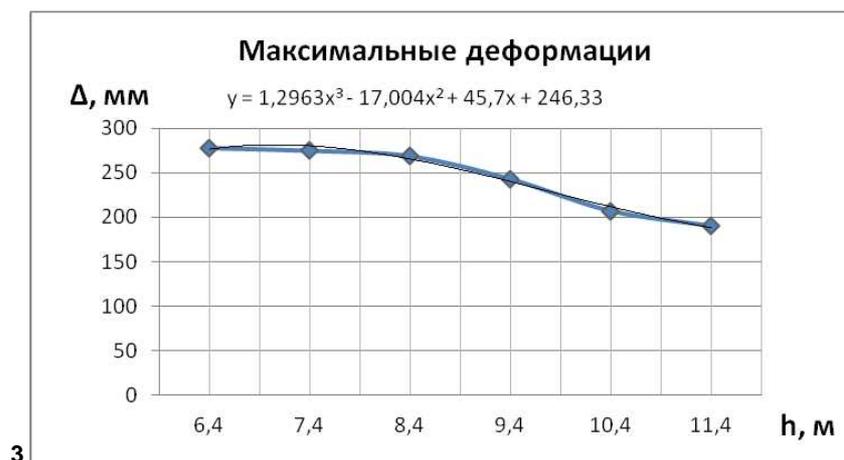


Рисунок 39. Зависимость деформаций от высоты

Анализируя графики, можно отметить, что:

- вес незначительно увеличивается с увеличением высоты фермы;
- усилия в нижнем поясе нелинейно возрастают с увеличением высоты фермы;
- деформации снижаются с увеличением высоты;

Учитывая эти замечания в качестве оптимальной принимается высота фермы равная 9,4 м.

#### 5. Анализ результатов расчета

В процессе подбора сечений был задействован постпроцессор SCAD «Проверка сечений из металлопроката».

В результате расчета были получены следующие характеристики исходного варианта навеса:

- масса: 801 т.
- значения максимальных деформаций (рисунок 40)

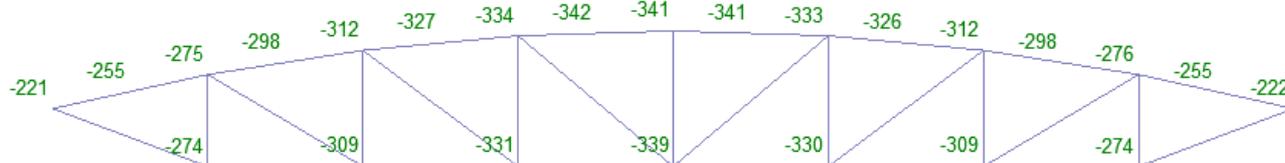


Рисунок 40. Значения деформаций в ферме Ф14

Итоговое значение деформации:  $\Delta = 341,7 - 221,3 = 120,4$  мм.

- Деформированные схемы стадиона приведены на рисунках 41-42

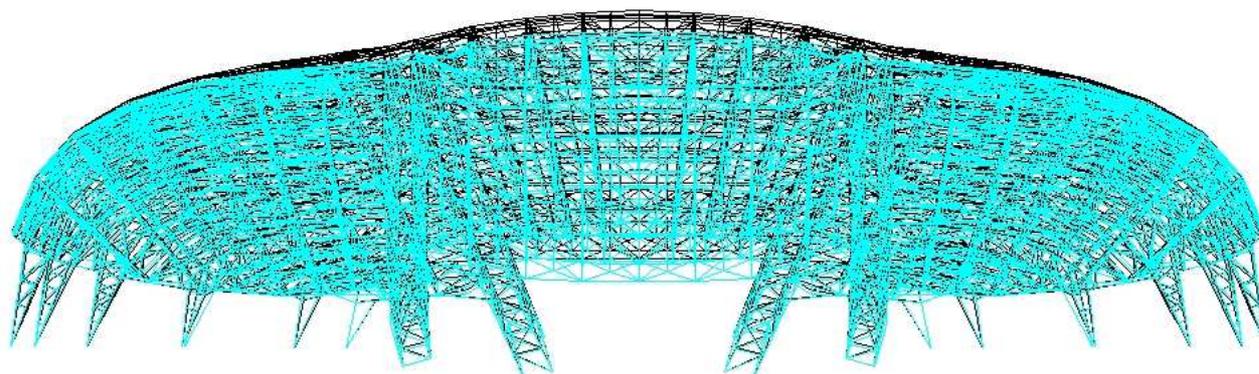


Рисунок 41. Деформированная схема стадиона

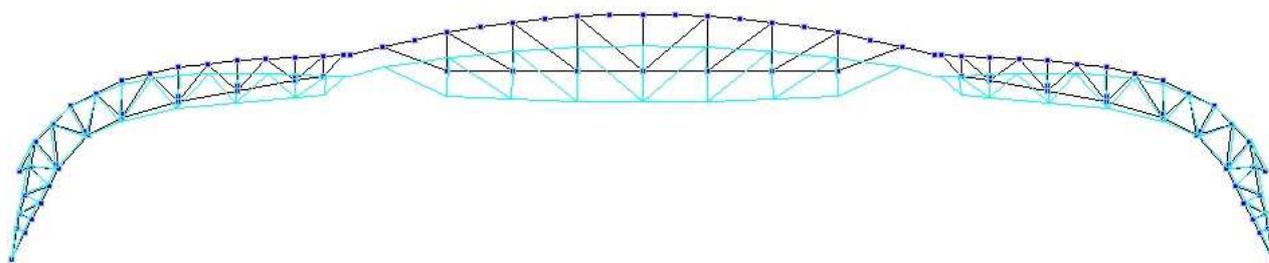


Рисунок 42. Деформированная схема поперечного сечения стадиона

– продольные усилия(кН) в ферме Ф14 приведены на рисунке 43.

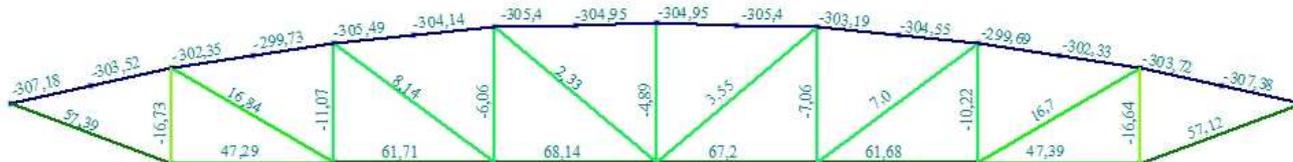


Рисунок 43. Усилия в ферме Ф14

## 9. Сравнение вариантов

В процессе исследовательской части было произведено сравнение металлоемкости покрытий, их деформативности, а также условного параметра «Вес-деформации» (характеристика сравнительной эффективности и работоспособности, позволяющая привести абсолютно разные варианты покрытия к общему параметру жесткости).

Результаты сравнительного анализа приведены на рисунке 44.

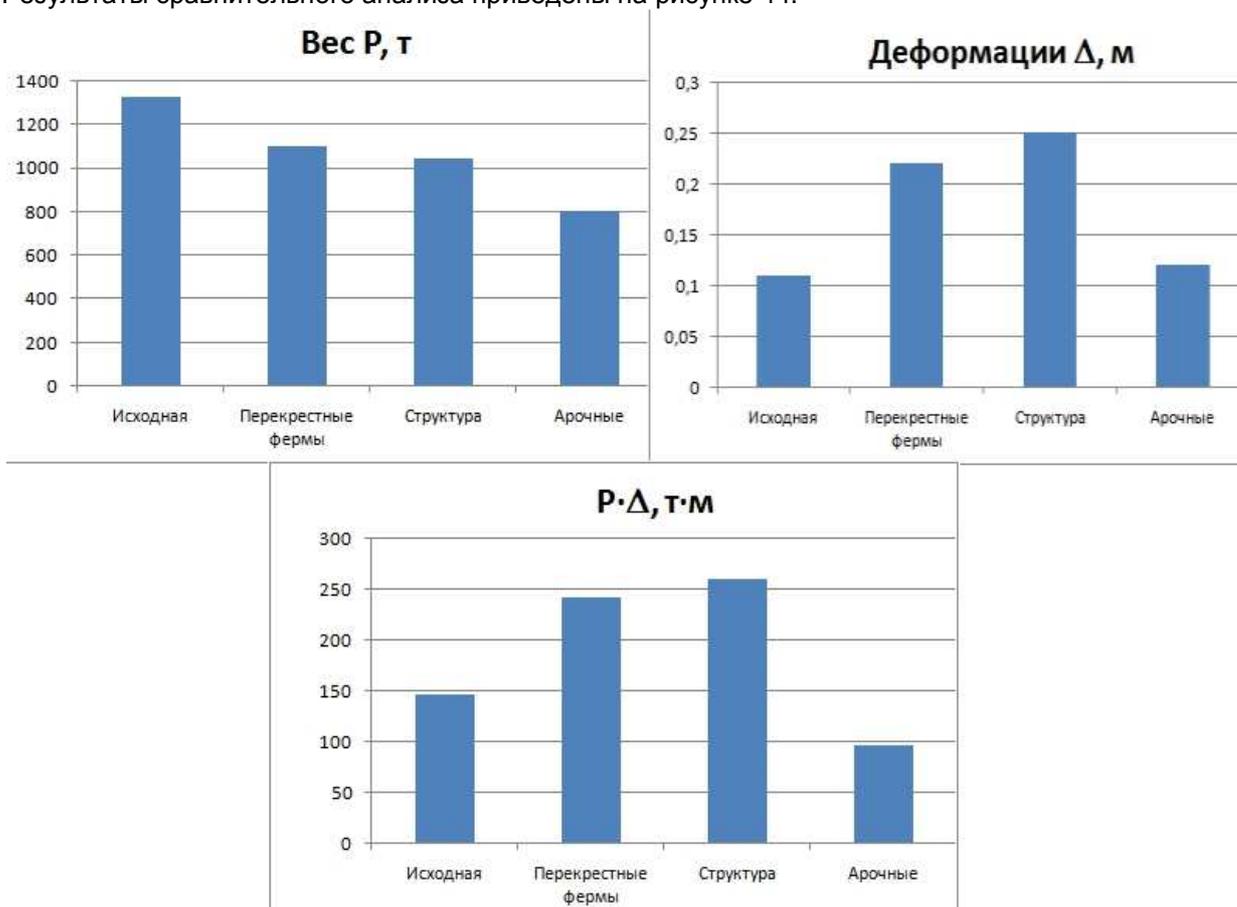


Рисунок 44. Сравнение вариантов покрытия

На основе сравнения и анализа полученных диаграмм можно сделать следующие выводы:

- наименьшей металлоемкостью обладает покрытие из комбинированных ферм за счет малого количества элементов и линзообразной формы;
- максимальные деформации имеет структурное покрытие;
- по условному показателю «вес-деформации» наиболее оптимальным оказалось покрытие из арочных ферм, а наименее рациональным – структурное покрытие.

## **10. Выводы**

1. В рамках данной статьи выполнено создание КЭ модели расчетной схемы несущих металлических конструкций покрытия стадиона ФИШТ с использованием ПК SCAD.
2. Произведен анализ напряженно-деформированного состояния элементов расчетной схемы навеса покрытия на различные нагрузки и воздействия.
3. Выполнено конструирование нескольких вариантов устройства навеса над полем.
4. Определены рациональные параметры для каждого из вариантов навеса.
5. По итогам сравнения вариантов можно сделать вывод, что варианты с переменной в зависимости от пролета высотой навеса более рациональны.

## Литература

- [1]. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85.
- [2]. ТКР EN 1991-1-4-2009 Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-5. Общие воздействия. Ветровые воздействия.
- [3]. Павлов, Л. Л. Специфика формирования архитектурно-планировочных решений крытых стадионов с крупногабаритной ареной: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. архитектуры (18.00.02)/МГУ. - Москва, 1975. - 165 с.
- [4]. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD/ В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер. - М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. - 656 с.
- [5]. SCAD Office. Реализация СНиП в проектирующих программах/ В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, М.А. Микитаренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер, В.Г. Федоровский, В.В. Юрченко - М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. - 432 с.
- [6]. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения/В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, В.А. Пашинский, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин. - М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2009. - 528 с.
- [7]. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа/А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. - М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. - 736 с.
- [8]. Поиск рациональной геометрической схемы пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооружения/М.Р. Гарифуллин, С. А. Семенов, С.В. Беляева, И.А. Порываев, М.Н. Сафиуллин, А.А. Семенов//Строительство уникальных зданий и сооружений.№ 2 (17). 2014. - С. 107-124.
- [9]. Федорцев И.В. Технология возведения конструкций покрытия большепролетных зданий/И.В. Федорцев, Е.А Султанова. Учебное пособие – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2008г. - С. 5-17.
- [10]. Драган В.И. Большепролетная металлическая структурная конструкция системы «БРГТУ» для покрытия спортивного комплекса в г. Гродно, особенности расчета ее живучести/В.И. Драган, Н.Л. Морилова//Вестник Брестского государственного технического университета.№ 1(85). 2014 - С.24-30
- [11]. Горохов Е.В. Теоретическое и экспериментальное исследование конструктивных форм большепролетных покрытий над трибунами стадионов/Е.В. Горохов, В.Ф. Муцанов, В. Р. Касимов, Ю.В. Сивоконь, И.Н. Прядко//Сборник научных работ Украинского научно-исследовательского и проектного института стальных конструкций им. В.М. Шимановского. Том 6. 2010.
- [12]. Теплых А. В. Инженерные технологии построения расчетных моделей и анализа результатов в системе Scad Office: Модели металлокаркасов/А.В. Теплых, С.А. Смирнов, М.А. Горбушко, И.М. Ерофеев, А.С. Сидоров//CADmaster.№ 5. 2006. – С. 82-93.
- [13]. Фурсов В.В. Проектирование и реконструкция спортивных арен различного назначения в г. Харькове/В.В. Фурсов, Н.Д. Кошмай, А.Ю. Васильев//Сборник научных работ Украинского научно-исследовательского и проектного института стальных конструкций им. В.М. Шимановского. Том 5. 2010.
- [14]. Канчели Н. В. Проект покрытия центрального стадиона в Москве//Пространственные конструкции зданий и сооружений. 1996. № 8. - С. 203-212.
- [15]. Микулин В. Б., Фарфель М. И., Ханджи А. В. Покрытие Большой спортивной арены Олимпийского комплекса в Лужниках. // ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. 80 лет. 2007. С. 46-55.
- [16]. Экспертная оценка конструктивных решений Центрального стадиона и Большой ледовой арены для хоккея с шайбой в г. Сочи /Назаров Ю. П., Жук Ю. Н., Симбиркин В. Н., Ананьев А. В., Курнавин В. В. // Актуальные проблемы исследований по теории сооружений. 2009. № 2. - С. 8-16.
- [17]. Кудишин Ю. И. О живучести несущих конструкций покрытия ледового дворца спорта на Ходынском поле в г. Москва/ Ю.И. Кудишин, Н. Я. Михалев// Металлические конструкции. 2007. № 3(13). - С. 131-141.
- [18]. Allen, С. М. The Toronto SkyDome, Canada//Structural Engineering International. Vol. 1. 1991. - Pp. 6-8.
- [19]. Fiel. W. Munich Olympic Stadium 2010//Eckhard Schulze-Fielitz. 2010. - Pp 246-251.
- [20]. Kearsley E. Mathematics, engineering and soccer stadiums//Quest. Vol.6. 2010. - Pp. 3-6.
- [21]. DING J.,ZHANG Zh. Structural system selection and application of roof steel structure in stadiums//Journal of Building Structures. 2011
- [22]. Reid W., Travers J. Wind tunnel testing of sports stadiums//Construction and Building Materials. Vol. 5. 1991. - Pp. 120–122.

- [23]. Stone, T. A stadium for all seasons Nelson Mandela Bay Stadium//IMIESA. Vol. 34. 2009. - Pp. 62-65.
- [24]. Bokelman K., Bastiaanse G., Plessis G. D., Heymann F., Huber U., Koorn H., Wium J. A. South African Football Stadiums for the 2010 FIFA World Cup//Structural Engineering International. Vol. 21. 2011. - Pp. 87-93.
- [25]. Reis A. Stadiums for The 2004 European Football Championship a Variety of Roof Structures//IABSE Symposium Report, IABSE Symposium, Melbourne 2002: Towards a Better Built Environment - Innovation, Sustainability, Information Technology. 2002. - Pp. 70-79.
- [26]. Magalhães, F., Caetano, E., Cunha, Á. Operational modal analysis and finite element model correlation of the Braga Stadium suspended roof // Engineering Structures. 2008. 30 (6). - Pp. 1688-1698
- [27]. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response / Martins N., Caetano E., Diord S., Magalhães F., Cunha Á. // Engineering Structures. 2014. No. 59. pp. 80-94.
- [28]. Analysis of Montreal Olympic Stadium roof under natural loading conditions / Lazzari M., Majowiecki M., Vitaliani R. V., Saetta A. V. Nonlinear F.E. // Engineering Structures. 2009. No. 31 (1), - pp. 16-31.
- [29]. Experimental Study on the Spatial Roof Structure of 80,000-seat Stadium in Shanghai / Zuyan Sh., Yangji Ch., Qingyun L., Xianzhong Zh., Nianliang Y., Yingru Lin. // Advances in Steel Structures (ICASS '96). 1996, - pp. 601-606.
- [30]. Трофимович В. В. Оптимальное проектирование металлических конструкций/В.В. Трофимович, В.А. Пермяков.- Киев: Будивельник, 1981. - 133 с.
- [31]. Kociecki M. Two-phase genetic algorithm for size optimization of free-form steel space-frame roof structures/M. Kociecki, H. Adeli // Journal of Constructional Steel Research. 2013. No. 90. Pp. 283-296.
- [32]. Buhl Th. Shape optimization of cover plates for retractable roof structures/Th. Buhl, F.V. Jensen, S. Pellegrino//Computers & Structures. 2004. No. 82 (15–16). - Pp. 1227-1236.
- [33]. Лихтарников Я. М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций/Я.М. Лихтарников - М.: Стройиздат, 1979. 319 с.
- [34]. Алпатов В. Ю. Оптимизация геометрической формы пространственно-стержневых конструкций/В.Ю.Алпатов, И.С. Холопов//Металлические конструкции. 2009. №1(15). С. 47-57.
- [35]. Холопов И. С. Многокритериальная оптимизация элементов металлических конструкций в условиях САПР/И.С. Холопов, А.Н. Попов// Современные строительные конструкции из металла и древесины. 1999. - С. 226-234.
- [36]. Комплексный расчет несущих конструкций АВК «Внуково–1» / Баглаев Н. Н., Викторов Е. Г., Семенов В. А., Сизов О. П., Ружанский И. Л., Мосягин Д. Л., Голованов В. А. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2008. 4(2). - Pp. 21-24.
- [37]. Рычков С.П. MSC.visual NASTRAN для Windows/С.П. Рычков - М.: НТ Пресс, 2004. - 552с.

## Trial design of the Fisht Olympic Stadium roof in Sochi

A.A Semenov<sup>1</sup>, I.A Porivaev<sup>2\*</sup>, R.R Shigapov<sup>3</sup>, S.V. Belyaeva<sup>4</sup>, A.A Kokoreva<sup>5</sup>

<sup>1,2,4,5</sup> Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov St., Ufa, Russia, 450062

<sup>3</sup> Moscow State Civil Engineering University, 26 Yaroslavskoye av., Moscow, 129337 Russia

---

### ARTICLE INFO

scientific article

doi:

### Article history

Received 18 November 2015

### Keywords

long span structure;  
plane frame work;  
space frame;  
cross shaped frame;  
lenticular frame;  
ration depth;  
comparative analysis;

---

### ABSTRACT

The object of the article is the shed cover of the Fisht Olympic Stadium - the venue of the Opening Ceremony of the Winter Olympics in 2014. The study proposed and investigated several variants of the shed structures - shed of the plane frameworks (which existed in 2012-2015.), the shed of the lenticular frames with variable height; shed of the cross frames and shade of the cross shaped frames. The analysis of the stress-strain behavior of the different variants of the shed was made using a SCAD Office; considering the optimization of geometrical parameters of the proposed new options and a comparative analysis of the developed solutions. During the research the height of a covering was changed. It is found that the variable height structures are more effective.

---

#### Corresponding author:

1. +7(917)7765858, asfugntu@yandex.ru (Aleksandr Aleksandrovich Semenov, Ph.D., Associate Professor)
- 2\* +7(917)4011118, iporivaev@gmail.com (Ilya Arkadievich Porivaev, Senior Lecturer)
3. +7(917)4588368, shigapov.rustam@gmail.com (Rustam Ramilevich Shigapov, Graduate Student)
4. +7(961)3652587, lanawhite75@gmail.com (Svetlana Vladimirovna Belyaeva, Graduate Student)
5. +7(967)7359155, fyrf270992@mail.ru (Anna Andreevna Kokoreva, Graduate Student)

## References

- [1]. SP 20.13330.2011. Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85 [Loads and effects. SNiP 2.01.07-85 updated edition]. (rus)
- [2]. TKP EN 1991-1-4-2009 Yevrokod 1. Vozdeystviya na konstruksii. Chast 1-5. Obshchiye vozdeystviya. Vetrovyye vozdeystviya. [Eurocode 1. Impact on the design. Part 1-5. General actions. Wind actions] (rus).
- [3]. Pavlov, L. L. Specifika formirovaniya arhitekturno-planirovочnykh reshenij krytykh stadionov s krupnogabaritnoy arenoj [The specificity of forming the architectural and planning concepts of covered stadiums with large arena]/MGU. - Moscow, 1975. 165 p. (rus)
- [4]. SCAD Office. SCAD Office. Vychislitelnyy kompleks SCAD. [Computing system SCAD]/ V. P. Karpilovskiy, E. Z. Kriksunov, A. A. Malyarenko, A.V. Perelmuter, M.A. Perelmuter. - Moscow: SCAD SOFT, 2011. 656 p. (rus)
- [5]. SCAD Office. Realizatsiya SNiP v proektirujushhih programmah [SCAD Office. The realization of the SNiP into CAE-programs]/ V.S. Karpilovskij, Je.Z. Kriksunov, A.A. Maljarenko, M.A. Mikitarenko, A.V. Perelmuter, M.A. Perelmuter, V.G. Fedorovskij, V.V. Jurchenko - Moscow: SCAD SOFT, 2011. 432 p. (rus)
- [6]. Nagruzki i vozdeystviya na zdaniya i sooruzheniya [Loads and effects on buildings and structures]/V.N. Gordeev, A.I. Lantuh-Ljashhenko, V.A. Pashinskij, A.V. Perelmuter, S.F. Pichugin. - Moscow:SCAD SOFT, 2009. 528 p.
- [7]. Perelmuter A. V. Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza [Computational models of structures and the possibility of their analysis.]/A.V. Perelmuter, V.I. Slivker - Moscow: SCAD SOFT, 2011. 736 p. (rus)
- [8]. Poisk racionalnoj geometricheskoj shemy prostranstvennoj metallicheskoj konstrukcii pokrytija bolsheproletnogo sportivnogo sooruzhenija [The search of rational shape of spatial metal roof of long-span sport arena]/M.R. Garifullin, S.A. Semenov, S.V. Belyaeva, I.A. Porivaev, M.N. Safiullin, A.A. Semenov//Construction of Unique Buildings and Structures. 2 (17). 2014. Pp. 107-124. (rus)
- [9]. Fedorcev I.V. Tehnologija vozvedeniya konstrukcij pokrytija bolsheproletnykh zdaniy [Long-span building production technology]/I.V. Fedorcev, E.A. Sultanova.– Ufa: UGNTU, 2008. Pp. 5-17. (rus)
- [10]. Dragan V.I. Bol'sheproletnaja metallicheskaja strukturnaja konstrukcija sistemy «BRGTU» dlja pokrytija sportivnogo kompleksa v g. Grodno, osobennosti rascheta ee zhivuchesti [Long-span metal space frame of BRGTU system used for Grodno sport centre and special aspects of its survivability analysis]/V.I. Dragan, N.L. Morilova//Reporter of BRGTU. 1(85). 2014 Pp .24-30(rus)
- [11]. Gorohov E.V. Teoreticheskoe i jeksperimentalnoe issledovanie konstruktivnykh form bolsheproletnykh pokrytij nad tribunami stadionov [Theoretical and experimental research of long-span structures over the grandstand of the stadiums]/E.V. Gorohov, V.F. Mushhanov, V. R. Kasimov, Ju.V. Sivokon, I.N. Prjadjko//Collection of scientific works of the Ukrainian Scientific-Research and Design Institute of Steel Construction him. VM Szymanowski. Tom 6. 2010. (rus)
- [12]. Teplykh A.V. Inzhenernyye tekhnologii postroyeniya raschetnykh modeley i analiza rezultatov v sisteme SCAD Office: Modeli metalokarkasov [Engineering technology to build computational models and analysis system SCAD Office: Models of metal frames]/ A.V. Teplykh, S.A. Smirnov, M.A. Gorbushko, I.M. Erofeev, A.S. Sidorov // CADmaster. 2006. № 5. Pp.82-93. (rus)
- [13]. Fursov V.V. Proektirovanie i rekonstrukcija sportivnykh aren razlichnogo naznacheniya v g. Harkove [Design and reconstruction of sport arenas of various applications]/V.V. Fursov, N.D. Koshmaj, A.Ju. Vasilev//Collection of scientific works of the Ukrainian Scientific-Research and Design Institute of Steel Construction him. VM Szymanowski. Tom 5. 2010. (rus)
- [14]. Kancheli N. V. Proyekt pokrytija tsentralnogo stadiona v Moskve [Project covering Central Stadium in Moscow] // Prostranstvennyye konstruksii zdaniy i sooruzheniy. 1996. №8. Pp. 203-212. (rus)
- [15]. Mikulin V. B., Farfel M. I., Khandzhi A. V. Pokrytiye Bolshoy sportivnoy areny Olimpiyskogo kompleksa v Luzhnikakh [Coverage Grand Sports Arena Luzhniki Olympic Complex] // TsNIISK im. V.A. Kucherenko 80 let. 2007. Pp. 46-55. (rus)
- [16]. Ekspertnaya otsenka konstruktivnykh resheniy Tsentralnogo stadiona i Bolshoy ledovoy areny dlya khokkeya s shayboy v g. Sochi [Central Stadium and the Big Ice Arena for ice hockey in Sochi] / Nazarov Yu. P., Zhuk Yu. N., Simbirkin V. N., Ananyev A. V., Kurnavin V. V.//Aktualnyye problemy issledovaniy po teorii sooruzheniy. 2009. №2. Pp. 8-16. (rus)
- [17]. Kudishyn Yu. I., Mikhalev N.Ya. On survivability of bearing structures of the ice stadium in Hodynskoye pole, Moscow, Russia // Metal Constructions Journal. 2007. №3(13). Pp. 131-141. (rus)
- [18]. Allen, C. M. The Toronto SkyDome, Canada//Structural Engineering International. Vol. 1. 1991. Pp. 6-8.
- [19]. Fiel. W. Munich Olympic Stadium 2010//Eckhard Schulze-Fielitz. 2010. Pp 246-251.
- [20]. Kearsley E. Mathematics, engineering and soccer stadiums//Quest. Vol.6. 2010. Pp. 3-6.
- [21]. DING J.,ZHANG Zh. Structural system selection and application of roof steel structure in stadiums//Journal of Building Structures. 2011
- [22]. Reid W., Travers J. Wind tunnel testing of sports stadiums//Construction and Building Materials. Vol. 5. 1991. Pp. 120–122.
- [23]. Stone, T. A stadium for all seasons Nelson Mandela Bay Stadium//IMIESA. Vol. 34. 2009. Pp. 62-65.
- [24]. Bokelman K., Bastiaanse G., Plessis G. D., Heymann F., Huber U., Koorn H., Wium J. A. South African Football Stadiums for the 2010 FIFA World Cup//Structural Engineering International. Vol. 21. 2011. Pp. 87-93.
- [25]. Reis A. Stadiums for The 2004 European Football Championship a Variety of Roof Structures//IABSE Symposium Report, IABSE Symposium, Melbourne 2002: Towards a Better Built Environment - Innovation, Sustainability, Information Technology. 2002. Pp. 70-79.

- [26]. Magalhães, F., Caetano, E., Cunha, Á. Operational modal analysis and finite element model correlation of the Braga Stadium suspended roof // Engineering Structures. 2008. 30 (6). Pp. 1688-1698
- [27]. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response / Martins N., Caetano E., Diord S., Magalhães F., Cunha Á. // Engineering Structures. 2014. No. 59. pp. 80-94.
- [28]. Analysis of Montreal Olympic Stadium roof under natural loading conditions / Lazzari M., Majowiecki M., Vitaliani R. V., Saetta A. V. Nonlinear F.E. // Engineering Structures. 2009. No. 31 (1). pp. 16-31.
- [29]. Experimental Study on the Spatial Roof Structure of 80,000-seat Stadium in Shanghai / Zuyan Sh., Yangji Ch., Qingyun L., Xianzhong Zh., Nianliang Y., Yingru Lin. // Advances in Steel Structures (ICASS '96). 1996. pp. 601-606.
- [30]. Trofimovich V. V., Optimalnoye proyektirovaniye metallicheskih konstruksiy [Optimal design of metal structures]/ V.V. Trofimovich, V.A. Permyakov. - Kiyev, Budivel'nik, 1981. 136 p. (rus)
- [31]. Kociecki M. Two-phase genetic algorithm for size optimization of free-form steel space-frame roof structures/M. Kociecki, H. Adeli // Journal of Constructional Steel Research. 2013. No. 90. Pp. 283-296.
- [32]. Buhl Th. Shape optimization of cover plates for retractable roof structures/Th. Buhl, F.V. Jensen, S. Pellegrino//Computers & Structures. 2004. No. 82 (15-16). Pp. 1227-1236.
- [33]. Likhtarnikov Ya. M. Variantnoye proyektirovaniye i optimizatsiya stalnykh konstruksiy. [Variant design and optimization of steel structures] Moscow: Stroyizdat, 1979. 319 p. (rus)
- [34]. Alpatov V. Yu. Geometrical form optimization of a spatially-rod structures/V. Yu. Alpatov, I.S. Kholopov // Metal Constructions Journal. 2009. №1 (15). Pp. 47-57. (rus)
- [35]. Kholopov I. P. Mnogokriterialnaya optimizatsiya elementov metallicheskih konstruksiy v usloviyakh SAPR [Multiobjective optimization elements of metal structures under CAD]/I.P. Kholopov, A.N. Popov // Sovremennyye stroitelnyye konstruksii iz metalla i drevesiny. 1999. Pp. 226-234. (rus)
- [36]. Complex analysis of ossature for Moscow airport building "Vnukovo-1" / Baglayev N. N., Viktorov Ye. G., Semenov V. A., Sizov O. P., Ruzhanskiy I. L., Mosyagin D. L., Golovanov V. A. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2008. 4(2). Pp. 21-24. (rus)
- [37]. Rytchkov S.P. MSC.visual NASTRAN for Windows/S.P. Rytchkov - Moscow: NT Press, 2004. 552 p.(rus)

*Порываев И.А., Семенов А.А., Шигапов Р.Р., Беляева С.В., Кокорева А.А, Вариантное проектирование покрытия стадиона "ФИШТ" в городе Сочи // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №6 (45). С. 7-33*

*Porivaev I.A, Semenov A.A, Shigapov R.R, Belyaeva S.V, Kokoreva A.A Trial design of the Fisht Olympic Stadium roof in Sochi. Construction of Unique Buildings and Structures, 2016, 6 (45), Pp. 7-33 (rus)*