

Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: www.unistroy.spb.ru



Анализ работы несущих конструкций покрытия большепролетного спортивного сооружения

А.А. Семенов¹, И.А. Порываев², С.В. Софоян³, Р.А. Гилемханов⁴, С.А. Семенов⁵

^{1,2,4,5}Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450062, Республика Башкортостан, Уфа, Космонавтов ул., 1.

³ООО "СПФ Ремстрой", 453360, ул. Чкалова д. 70в, Ермолаево, РФ.

Информация о статье

УДК 69.04

Научная статья

История

Подана в редакцию 26 февраля 2015
Принята 18 марта 2015

Ключевые слова

пространственные металлические конструкции, большепролетное сооружение, метод конечных элементов, SCAD Office, рациональная геометрическая схема, условная металлоемкость

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены результаты исследований по анализу напряженно-деформированного состояния конструкции покрытия одного из спортивных сооружений Олимпиады 2014 года в г. Сочи (ледовой арены "Большой"). Описан способ моделирования покрытия стадиона методом конечных элементов в ПК SCAD. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния несущей конструкции покрытия. Определен вклад отдельных загрузок и усилий в напряженное состояние сечений наиболее нагруженных элементов. На основе проведенных исследований выбран критерий для оценки рациональности конструктивных решений металлических сооружений. Приведены результаты поиска рациональной геометрической схемы покрытия по критерию условной металлоемкости с использованием ПК SCAD.

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение | 59 |
| Обзор литературы | 59 |
| Постановка задачи | 59 |
| Краткая характеристика объекта | 60 |
| Моделирование покрытия в AutoCAD | 61 |
| Создание КЭ модели покрытия в ПК SCAD | 63 |
| Характеристика нагрузок и расчет | 65 |
| Анализ напряженно-деформированного состояния элементов основной арки покрытия | 66 |
| Выбор целевой функции для решения задач оптимального проектирования | 67 |
| Поиск рациональной геометрической схемы конструкций покрытия | 68 |
| Вариант 1 – Покрытие с радиально расположенными фермами | 68 |
| Вариант 2 – Покрытие с перекрестными фермами | 71 |
| Сравнение вариантов покрытия | 74 |
| Выводы | 75 |

¹ Контактный автор:
+7 (917) 776 5858, asfugntu@yandex.ru (Семенов Александр Александрович, к.т.н., профессор)
² +7 (917) 401 1118, iporivaev@gmail.com (Порываев Илья Аркадьевич, ассистент)
³ +7 (965) 925 4743, Blendering@gmail.com (Софоян Степан Ваганович, инженер)
⁴ +7 (917) 401 1118, iluha8@rambler.ru (Гилемханов Руслан Айдарович, магистрант)
⁵ +7 (987) 596 2474, floods77@yandex.ru (Семенов Сергей Александрович, аспирант)

Введение

В связи с проведением в России целого ряда международных соревнований, таких как Универсиада в Казани в 2013 г., Зимние Олимпийские игры в Сочи в 2014 г., Чемпионат мира по футболу в 2018 г. и др. особое внимание уделяется вопросу проектирования и строительства уникальных большепролетных спортивных сооружений. Каждая вновь построенная спортивная арена демонстрирует последние достижения архитектуры, науки и техники, знания и творческий потенциал проектировщиков.

При создании уникального сооружения основным принципом формообразования, в большинстве случаев, является архитектурная идея [1]. Подобные сооружения требуют комплексного подхода и взаимодействия целого ряда специалистов: архитекторов, конструкторов, технологов, строителей. На всех этапах проектирования объекты претерпевают множество изменений в архитектурном и конструктивном плане и, как следствие, требуют постоянного перерасчета. Кроме того, в связи с ужесточившимися в последние десятилетия требованиями к экономичности сооружений, перед проектировщиками встает задача выбора оптимального решения, которая, применительно к уникальному объекту, может быть решена с использованием вариантного проектирования [2,3]. Для снижения трудоемкости вычислительных работ и сокращения сроков проектирования используют вычислительные комплексы, основанные на численных методах расчета. Одним из основных численных методов для расчета строительных конструкций является метод конечных элементов (МКЭ). Метод имеет обоснованную теоретическую базу. Возможности реализации его в САПР изложены в трудах А. С. Городецкого [4,5], А. В. Перельмутера, В. И. Сливкера [6]. На сегодняшний день на основе МКЭ создано множество универсальных и специализированных вычислительных комплексов одним из наиболее востребованных из которых в России и странах СНГ является "Интегрированная система прочностного анализа и проектирования конструкций Structure CAD Office" (далее ПК SCAD) [7].

Обзор литературы

Исследование конструктивных схем покрытий большепролетных уникальных спортивных сооружений невозможно без использования мирового и отечественного опыта проектирования и строительства подобных объектов.

На сегодняшний день существует множество работ посвященных подобным сооружениям в России и странах СНГ [8-18]. Иностраный опыт по проектированию и анализу работы пространственных покрытий различных сооружений описан в работах [19-32]. Наибольший интерес представляют работы по исследованию покрытий таких объектов, как Большая спортивная арена в Лужниках [8-10], Ледовый дворец спорта на Ходынском поле в г. Москва [11], Большая ледовая арена для хоккея с шайбой в г. Сочи [16], а также зарубежных объектов: футбольный стадион в Браге [19, 20], Олимпийский стадион в Монреале [21], стадионы в Шанхае [22], Пирее [32] и Риме [27].

Значительная часть публикаций посвящена проблемам проектирования, исследованию действительной работы и мониторингу уникальных объектов. В работах приводятся результаты КЭ анализа сооружений. При этом недостаточно внимания уделяется описанию методов построения расчетных моделей, что является актуальной проблемой [33, 34].

Наиболее близки к рассматриваемой тематике работы Назарова Ю. П. [16, 17], расчет покрытия АВК «Внуково-1» [18], а также исследования покрытий стадионов в Браге [19, 20] и Монреале [21]. Некоторые частные случаи оптимизации строительных конструкций освещены в работах зарубежных авторов [35, 36].

Постановка задачи

Цель данной работы — исследовать напряженно-деформированное состояние различных вариантов несущих конструкций покрытия большепролетного сооружения в ПК SCAD, выбрать наиболее рациональное конструктивное решение по показателю материалоемкости.

Из поставленной цели вытекают следующие задачи:

- создать КЭ модели пространственной металлической конструкции покрытия ледового дворца “Большой” в ПК SCAD;
- провести анализ напряженно-деформированного состояния элементов основной несущей конструкции покрытия;

- выбрать и обосновать критерий оптимизации (целевую функцию);
- осуществить сравнение исследуемых вариантов модели по выбранному критерию.

Краткая характеристика объекта

Ледовый дворец “Большой” выполнен в смешанном каркасе, состоит из 8 этажного здания с колоннами, перекрытиями, трибунами, лифтовыми и лестничными шахтами, выполняющими роль диафрагм жесткости, запроектированными в монолитном железобетонном каркасе, и металлического покрытия, состоящего из двух частей: покрытия центральной хоккейной площадки и покрытия вестибюльной части.

Покрытие арены (рисунок 1) представляет собой эллипсоид, образованный конструкциями плоских шпренгельных ферм переменного пролета с треугольной решеткой для центральной части и саблевидных ферм с треугольной решёткой в вестибюльной части. Размеры купола в плане 196x144м, высота – 35м.

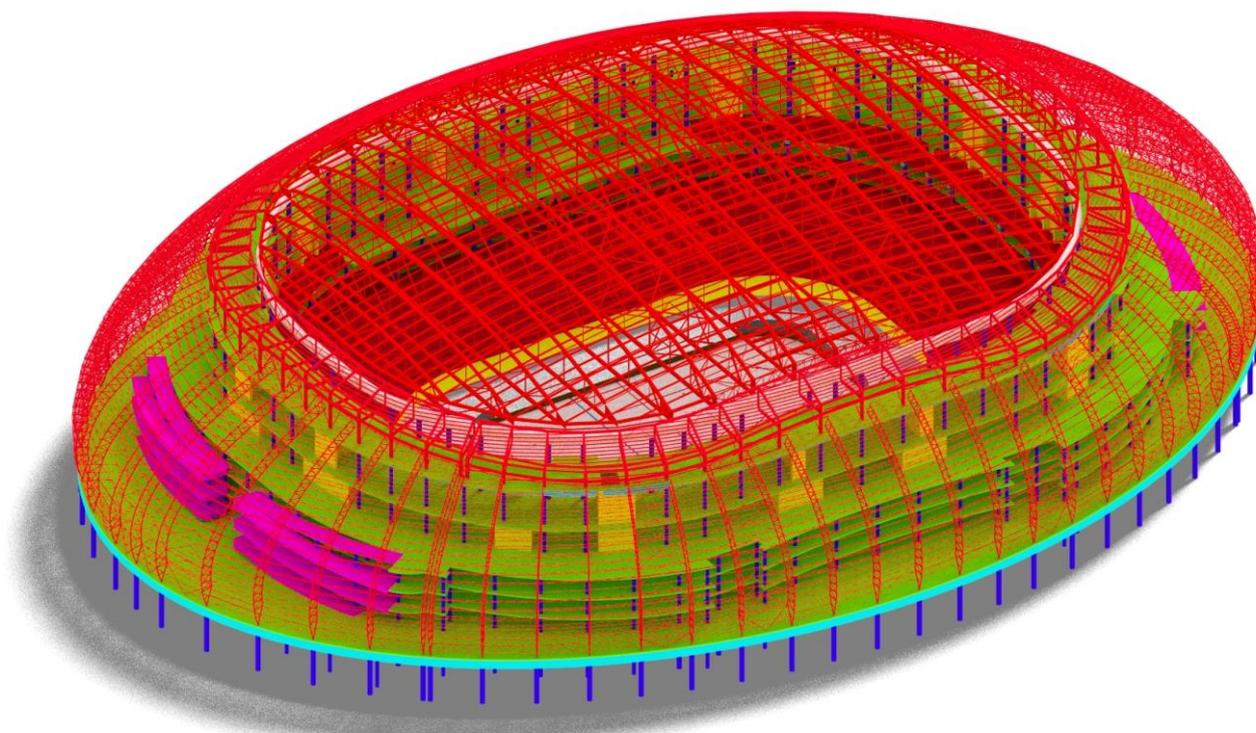


Рисунок 1. Несущий каркас ледового дворца “Большой”

Покрытие центральной хоккейной площадки, состоящее из 18 плоских ферм, 9 типоразмеров с треугольной шпренгельной системой, связанных в пространственную конструкцию опорным кольцом, связями по нижним и верхним поясам, прогонами опирается на железобетонное кольцо. Длина большепролетных ферм от 53,7 до 94,4 м, высота – от 5,5 до 11,74м. Фермы установлены с переменным шагом от 6,5 до 7,5 м.

Верхние и нижние пояса ферм выполнены из сварных двутавров переменного сечения высотой 520 мм и шириной 440мм. Стойки и раскосы выполнены из квадратных и прямоугольных труб. Один конец ферм закреплён шарнирно-неподвижно, а другой линейно-шарнирно-подвижно.

Покрытие вестибюлей и галерей стадиона, образованно 68 стальными фермами - полуарками, длиной от 27,5 до 40 м. Верхний и нижний пояс, треугольная решетка, выполнены из круглой трубы. Нагрузки от кровли передаются на полуарки через систему плоских ферм, расположенных в перпендикулярном направлении к полуаркам на границах панелей ферм. Нижняя часть полуарок опирается на стилобат. Верхняя часть полуарок опирается на перекрытие на отметке +22,100 м, где в совокупности с дополнительными связями образуют диафрагму жесткости. Диафрагма жесткости является связующим звеном между «саблевидными» фермами покрытия вестибюлей и фермами основной части купола.

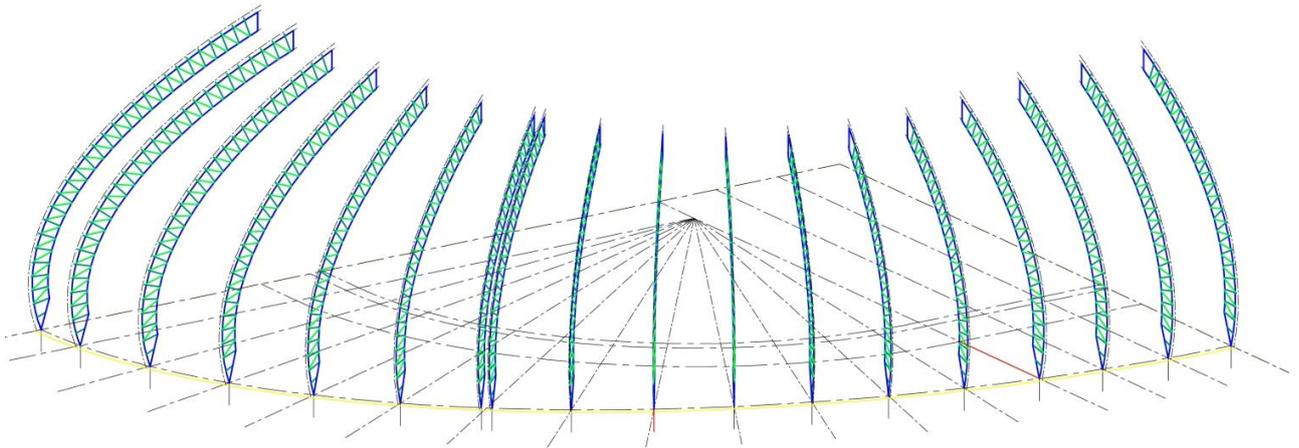


Рисунок 3. Саблевидные фермы

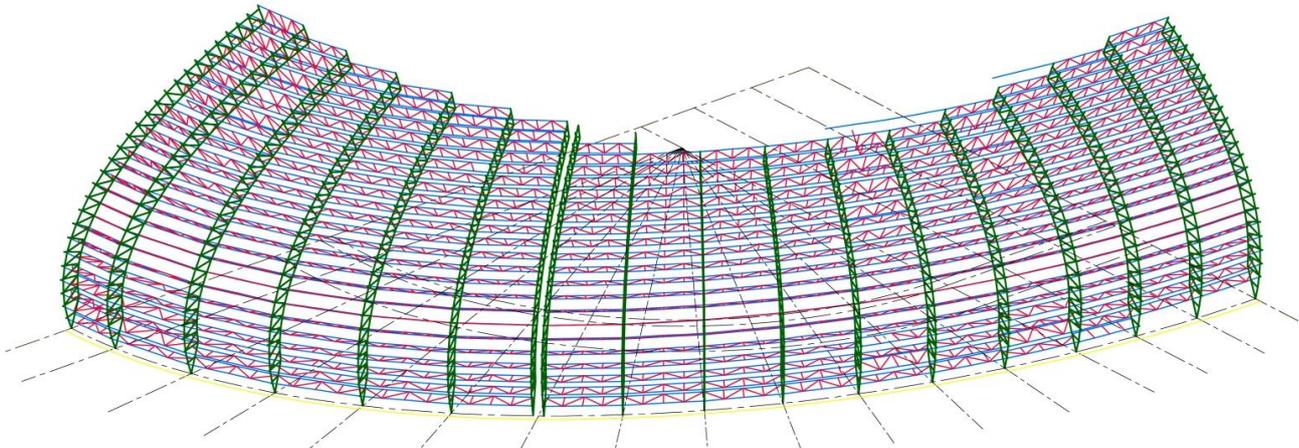


Рисунок 4. Добавление решетчатых прогонов

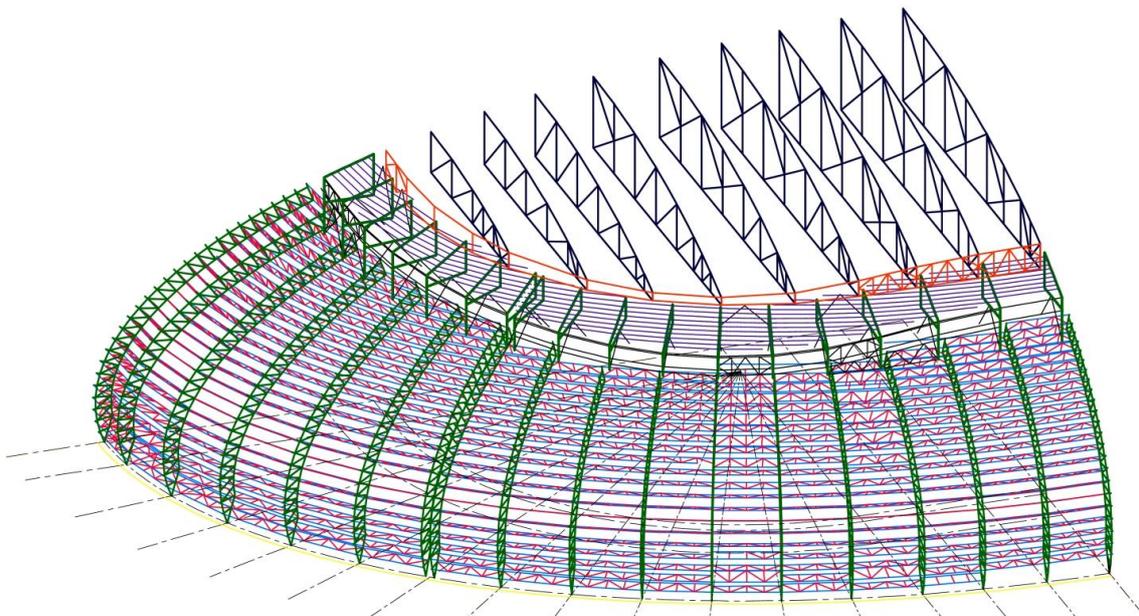


Рисунок 5. Добавление ферм центрального покрытия

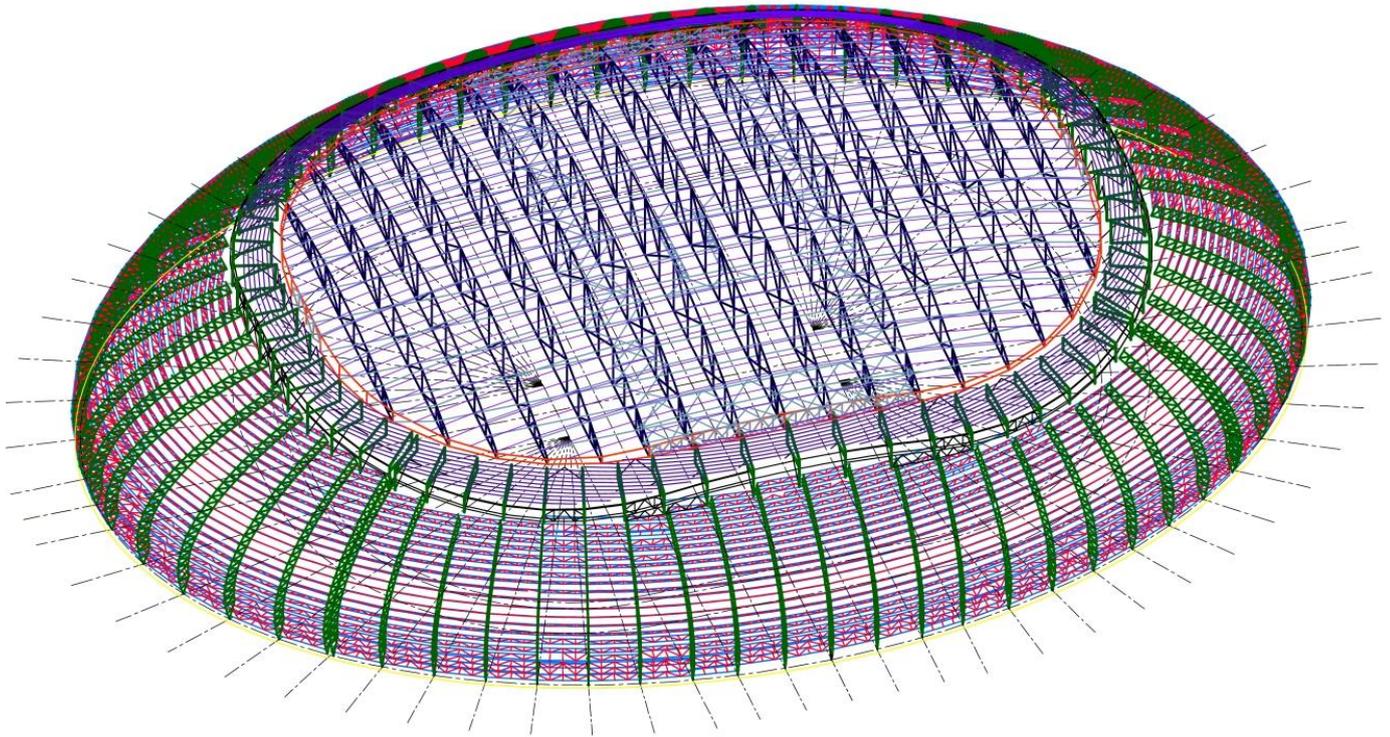


Рисунок 6. Полная расчетная схема в AutoCAD

Создание КЭ модели покрытия в ПК SCAD

Рассматриваемый объект является уникальным сооружением со сложной конструктивной схемой, состоящей из большого числа элементов. Уровень ответственности 1а (коэффициент надежности по ответственности $\gamma_n = 1.2$). Традиционные способы создания расчетных моделей посредством ввода узлов и элементов будут достаточно трудоемки, а также возрастет вероятность появления субъективных ошибок.

Для устранения этих факторов использованы следующие возможности ПК SCAD [7]:

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

Выделены следующие группы элементов конструкции покрытия: фермы центральной части, полуарки, вспомогательные фермы, ограждающие конструкции. Алгоритм создания расчетной модели приведен на рисунке 7.



Рисунок 7. Алгоритм создания расчетной модели

В результате получена модель несущих конструкций покрытия в среде ПК SCAD, показанная на рисунке 8.



Рисунок 8. Конечно-элементная модель расчетной схемы в ПК SCAD

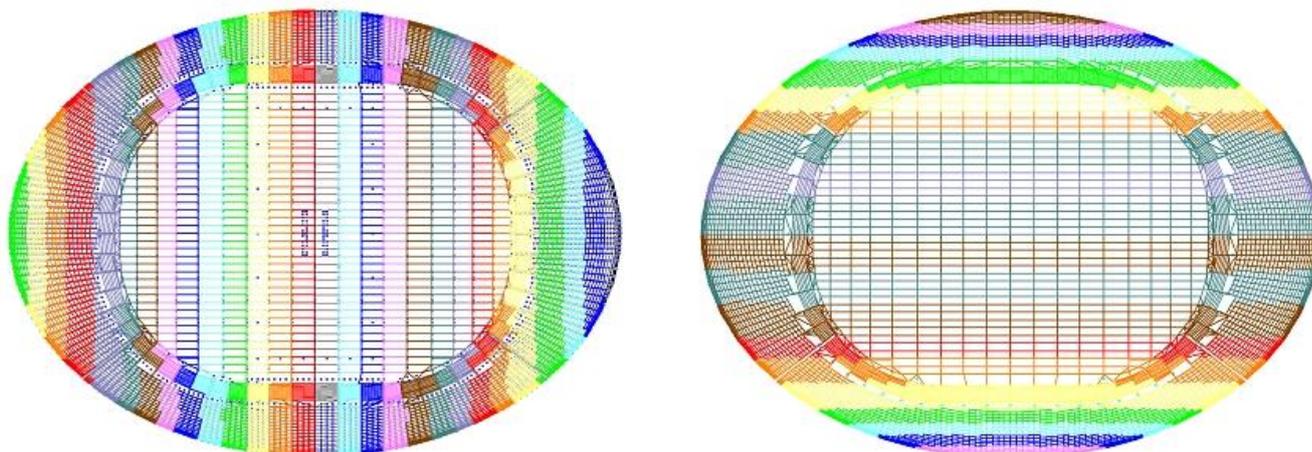


Рисунок 10. Продольное и поперечное разбиение оболочки для ветровых нагрузок в ПК SCAD

Анализ напряженно-деформированного состояния элементов основной арки покрытия

Для анализа напряженно-деформированного состояния покрытия были выбраны наиболее нагруженные элементы верхнего и нижнего пояса, стоек, раскосов. Определен вклад каждой нагрузки для каждой фермы (таблица 1).

Таблица 1. Значения напряжений от различных силовых факторов для элементов ферм, %

| Ферма | Постоянная | Технологическая | Снеговая | Температурная | Ветровая |
|-----------|------------|-----------------|----------|---------------|----------|
| ФС1 | 25,87 | 52,47 | 15,86 | 1,09 | 4,71 |
| ФС2 | 30,05 | 40,68 | 21,84 | 1,20 | 6,24 |
| ФС3 | 31,92 | 35,24 | 23,22 | 3,89 | 5,73 |
| ФС4 | 32,47 | 34,58 | 23,24 | 3,84 | 5,87 |
| ФС5 | 22,44 | 46,78 | 23,48 | 2,52 | 4,77 |
| ФС6 | 26,49 | 43,46 | 23,61 | 2,02 | 4,42 |
| ФС7 | 24,10 | 48,72 | 20,78 | 2,89 | 3,51 |
| ФС8 | 31,23 | 30,15 | 30,18 | 3,83 | 4,60 |
| ФС9 | 34,97 | 12,03 | 35,46 | 12,70 | 4,83 |
| Ср. знач. | 28,84 | 38,23 | 24,19 | 3,78 | 4,96 |

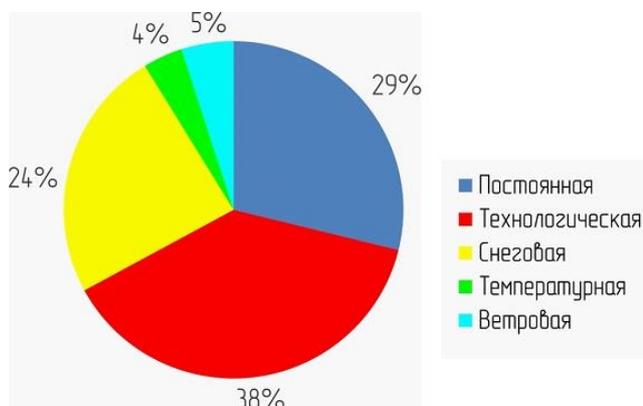


Рисунок 11. Диаграмма соотношения усилий от различных нагрузок

Как видно из рисунка 11 наибольший вклад (38%) в значения нормальных напряжений вносит составляющая от технологических нагрузок.

В указанных фермах проведен анализ распределения продольного усилия в элементах верхнего пояса, возникающего от различных загрузок (таблица 2, рисунок 12).

Таблица 2. Продольное усилие $N(T)$ в элементе верхнего пояса от различных нагрузений

| Ферма | Постоянная | Технологическая | Снеговая | Температурная | Ветровая |
|-------|------------|-----------------|----------|---------------|----------|
| ФС1 | 188,269 | 260,992 | 98,691 | 0,564 | 30,381 |
| ФС2 | 172,469 | 131,038 | 100,994 | 0,748 | 29,957 |
| ФС3 | 172,114 | 134,731 | 107,593 | 2,831 | 27,638 |
| ФС4 | 146,079 | 113,921 | 91,633 | 9,342 | 23,921 |
| ФС5 | 153,789 | 179,51 | 118,38 | 3,322 | 26,1 |
| ФС6 | 149,822 | 182,112 | 116,43 | 2,766 | 22,355 |
| ФС7 | 125,4 | 102,965 | 90,597 | 2,047 | 14,695 |
| ФС8 | 112,967 | 40,937 | 82,99 | 0,228 | 11,738 |
| ФС9 | 75,519 | 13,472 | 57,736 | 10,603 | 7,29 |

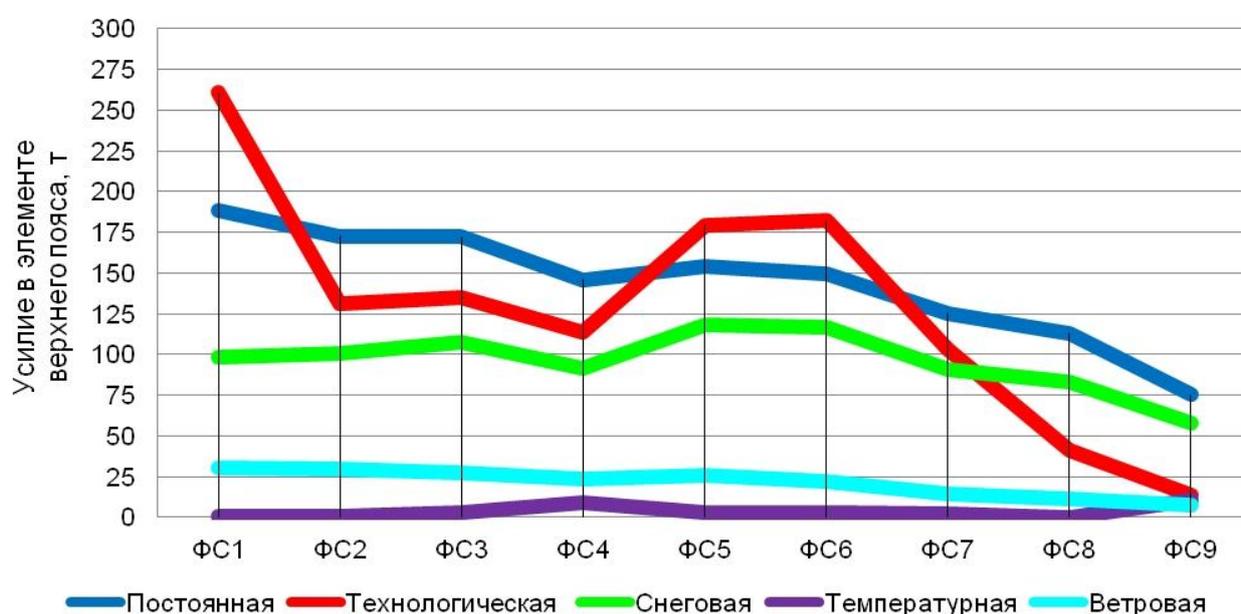


Рисунок 12. График изменения продольного усилия в элементе верхнего пояса

Результаты показывают, что основной вклад в напряженное состояние элементов главной арки принадлежит технологической нагрузке (38%). При этом следует отметить существенную долю собственного веса (29%). Вклад температурной нагрузки (4%) незначителен. Ветровая нагрузка не даёт вклад в расчётное сочетание нагрузок, т.к. вызывает усилия обратного знака.

Выбор целевой функции для решения задач оптимального проектирования

Исходя из особенностей расчета и проектирования, а также учитывая практические вопросы, можно сформулировать одну из основных задач оптимального проектирования металлических конструкций: определить оптимальные геометрические параметры статически неопределимой системы при условии введения в лишние связи начальных усилий.

Проблемы оптимизации металлических конструкций освещены в работах Лихтарникова Я. М. [38], Холопова И. С. [39-41] и ряда других авторов [35, 36]. В общем случае, решение таких задач является весьма сложным, что обуславливается нелинейностью их постановки и определенными трудностями математического описания. Если исходить из тех же критериев и ограничений, которые обычно принимаются при решении задач оптимального проектирования конструкций, то нетрудно убедиться в том, что целевая функция в рассматриваемом случае является нелинейной. Обычно в качестве целевой

функции принимают выражение для объема, массы или стоимости материала конструкции, записанные в зависимости от неизвестных задачи [42].

В процессе исследования оценивалась металлоемкость покрытия центральной хоккейной площадки и всей конструкции покрытия.

Для вычисления фактической металлоемкости расчетных моделей, необходимо было произвести не только расчет, но и подбор сечений в каждой из полученных схем, включающих в себя около 4300-5200 элементов каждая. В связи с огромным объемом необходимых вычислений, для упрощения задачи сравнения были приняты следующие гипотезы:

- соотношение жесткостей от схемы к схеме меняется незначительно. Следовательно, можно считать, что соотношение жесткостей исходной схемы дает достаточно (для вариантного анализа) достоверную картину распределения усилий по элементам.
- все элементы конструкции выполнены из стали с одинаковыми механическими характеристиками.

Произведён подбор сечений (вручную и с использованием постпроцессора ПК SCAD) для двух альтернативных вариантов, также подбор при поиске оптимальной высоты покрытия для каждого из них.

Поиск рациональной геометрической схемы конструкций покрытия

В рамках исследовательской части работы были разработаны две альтернативные конструктивные схемы покрытия над ледовой площадкой. Для каждой из схем была решена задача поиска рациональных геометрических параметров при изменении расстояния между поясами несущих элементов при неизменной геометрии верхнего пояса.

Анализ моделей покрытия производился путем сравнения их металлоемкости и жесткости.

Вариант 1 – Покрытие с радиально расположенными фермами

Покрытие вестибюлей и галерей остается неизменным, в качестве покрытия центральной хоккейной площадки предложена система из 48 радиально расположенных арочных ферм с углом поворота 7.5° (рисунок 13). Система радиальных ферм имеют центральное опорное кольцо по нижнему и верхнему поясу радиусом 11,46 м. Геометрия ферм полностью повторяет эллипсоидальную форму купола. Длина арочных ферм варьируется от 35,74 до 52 м, высота в наружной опорной зоне от 1 до 3,7 м. в центральной части – 11,74 м.

Общая устойчивость конструкции покрытия обеспечивается системой горизонтальных связей по нижнему поясу на границе каждой панели, вертикальных крестовых связей, прогонов, наружным опорным кольцом.

Пояса ферм неразрезные, узлы сопряжения поясов с центральным опорным кольцом – жесткие, узлы сопряжения раскосов, связей с поясами и системой связей принимаем шарнирным.

Опоры центральных ферм выполнены линейно-шарнирно-подвижными. Элементы ферм были унифицированы подобно проектному решению.

Для подбора сечений элементов используем постпроцессор ПК SCAD. Постпроцессор предназначен также для проверки несущей способности (рисунок 13) стержневых элементов стальных конструкций в соответствии с требованиями СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции».

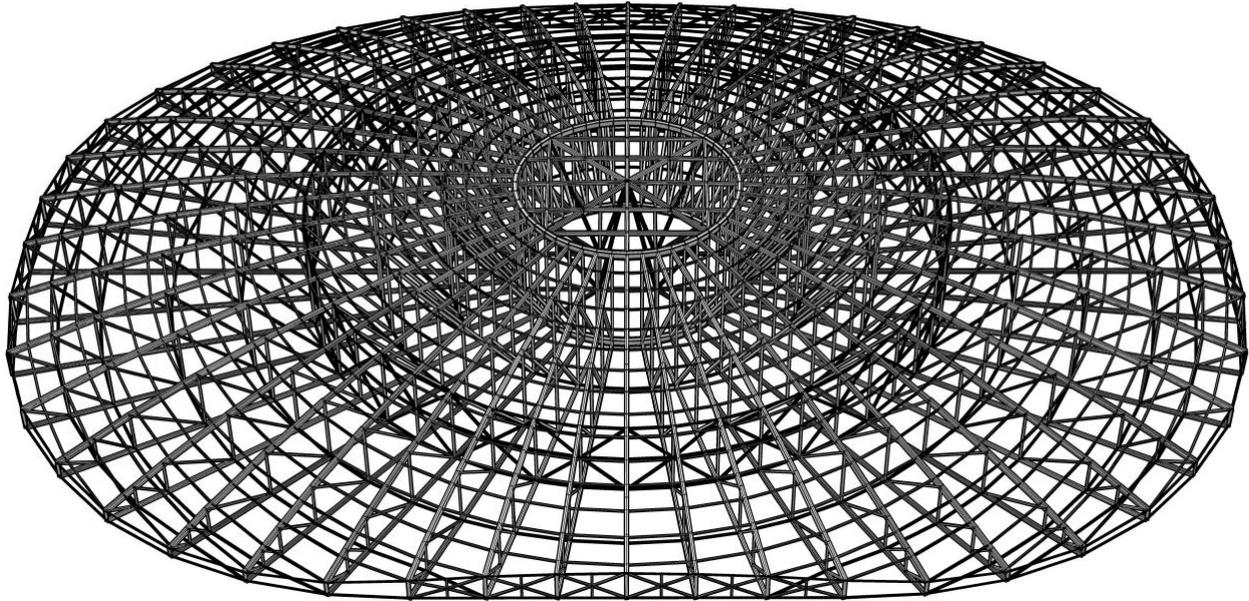


Рисунок 13. Презентационная графика расчетной модели

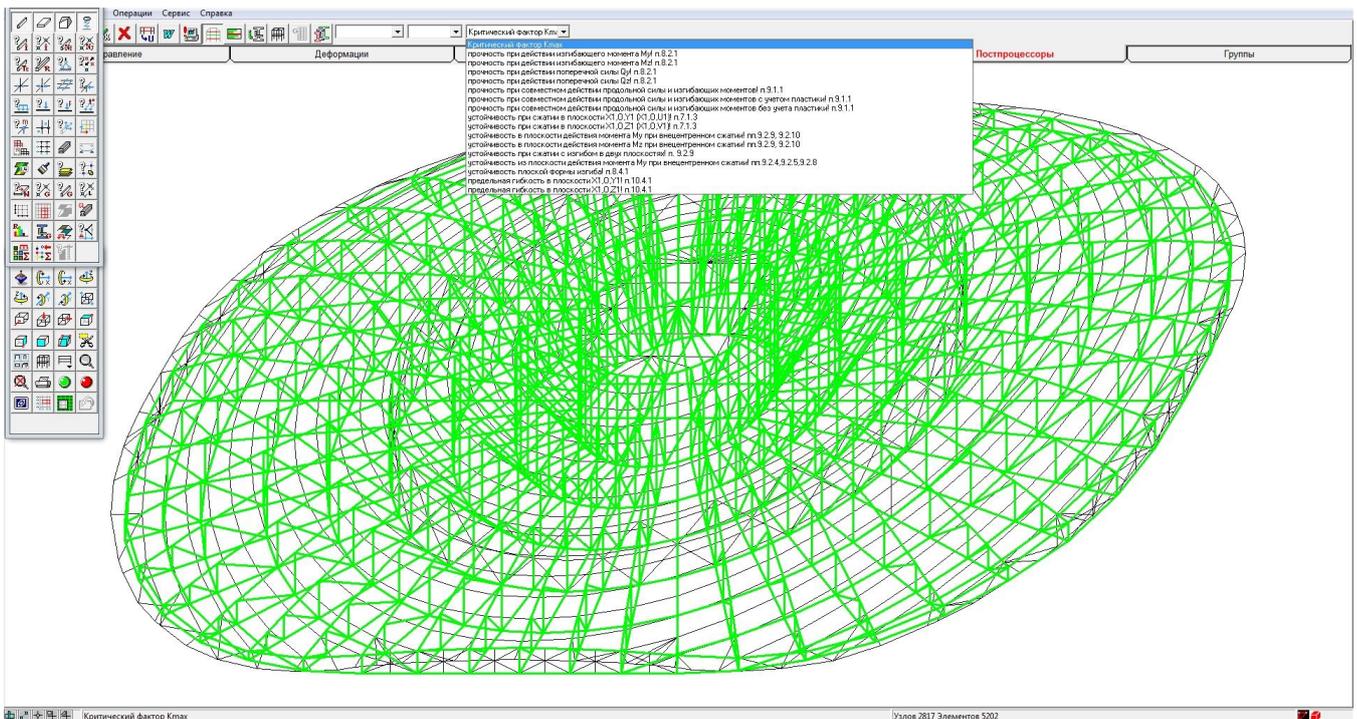


Рисунок 14. Визуализация расчёта постпроцессоров несущей способности

Максимальные значения перемещений находим от нормативных значений собственного веса несущих конструкций и длительных технологических нагрузок (рисунок 15).

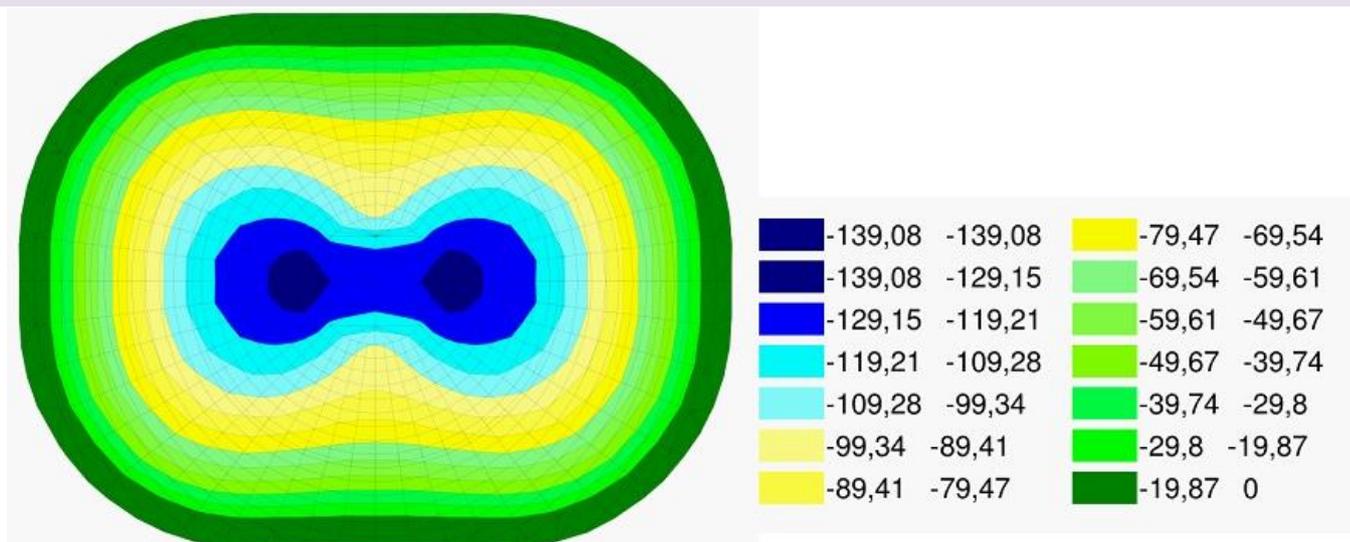


Рисунок 15. Цветовая индикация величины перемещений, мм



Рисунок 16. Массовая доля конструктивных элементов покрытия с радиальными фермами

Созданы модели несущих конструкций покрытия, отличающиеся положением нижнего пояса ферм. Модели были созданы по следующим критериям:

- тип сечения элементов ферм остаётся неизменным;
- положение верхнего пояса ферм остается неизменным.

Для первоначального анализа создавалось 9 моделей. При этом шаг изменения высоты составлял 0,5м.

Для всех полученных моделей были посчитаны значения металлоемкости и прогиба, по которым впоследствии был построен график (рисунок 17). В интервалах появления локальных экстремумов частота шага изменения параметров оптимизации уменьшалась с целью уточнения точки экстремума.

Отдельно рассчитывалось изменение массы каждого конструктивного элемента.

Исходная высота покрытия, равная 11,74 м, является оптимальной высотой по металлоемкости

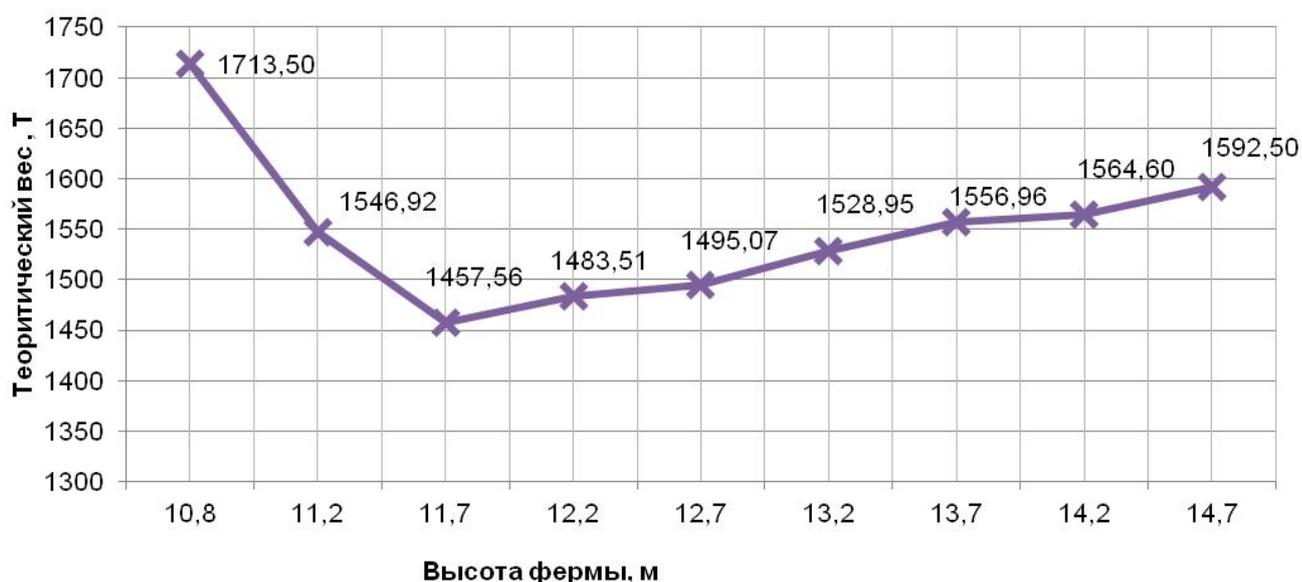


Рисунок 17. График зависимости металлоемкости покрытия радиальных ферм от ее высоты

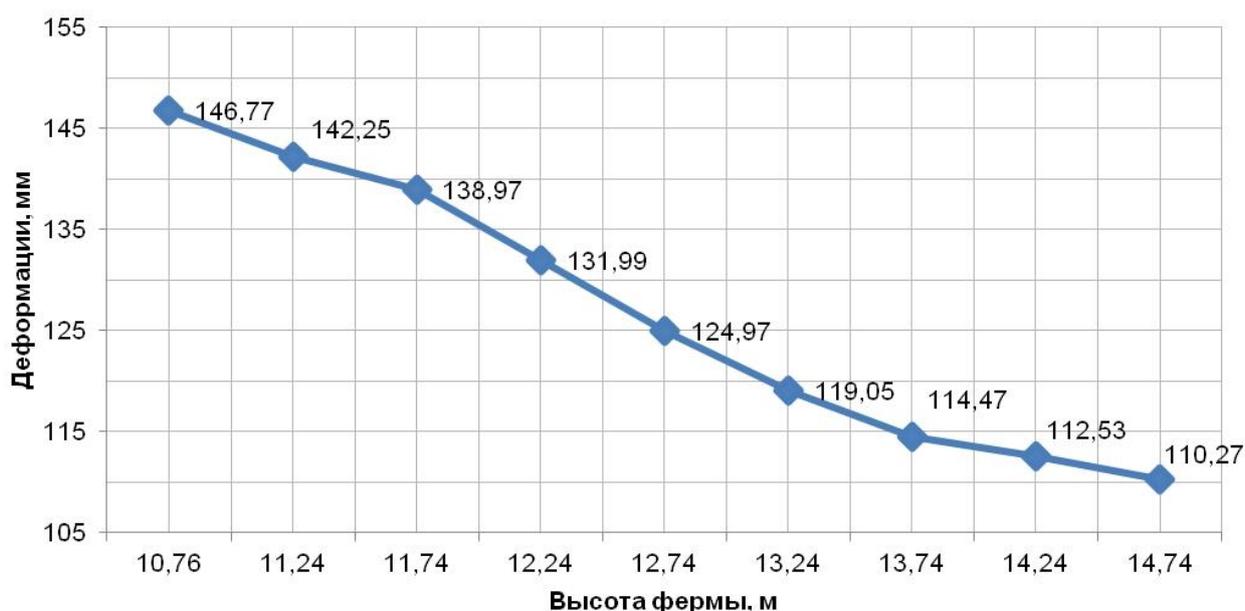


Рисунок 18. График зависимости прогиба покрытия радиальных ферм от ее высоты

Вариант 2 – Покрытие с перекрёстными фермами

Покрытие вестибюлей и галерей остается неизменным, в качестве покрытия центральной хоккейной площадки предложена система из перекрестных 30 ферм повторяющую геометрию эллипсоидального купола. 13 перпендикулярных к основным ферм выполнены с нисходящим раскосом. Шаг этих фермы равен расстоянию между стойками основных ферм.

Длина арочных ферм варьируется от 53,7 до 125,4 м, высота в наружной опорной зоне от 1 до 3,7м. в центральной части – 11,74м.

Пояса исходных фермы неразрезные, пояса перпендикулярных к ним ферм выполнены шарнирно сопряженными с поясами основных ферм. Стойки и раскосы примыкают шарнирно.

Элементы ферм были унифицированы подобно проектному решению.

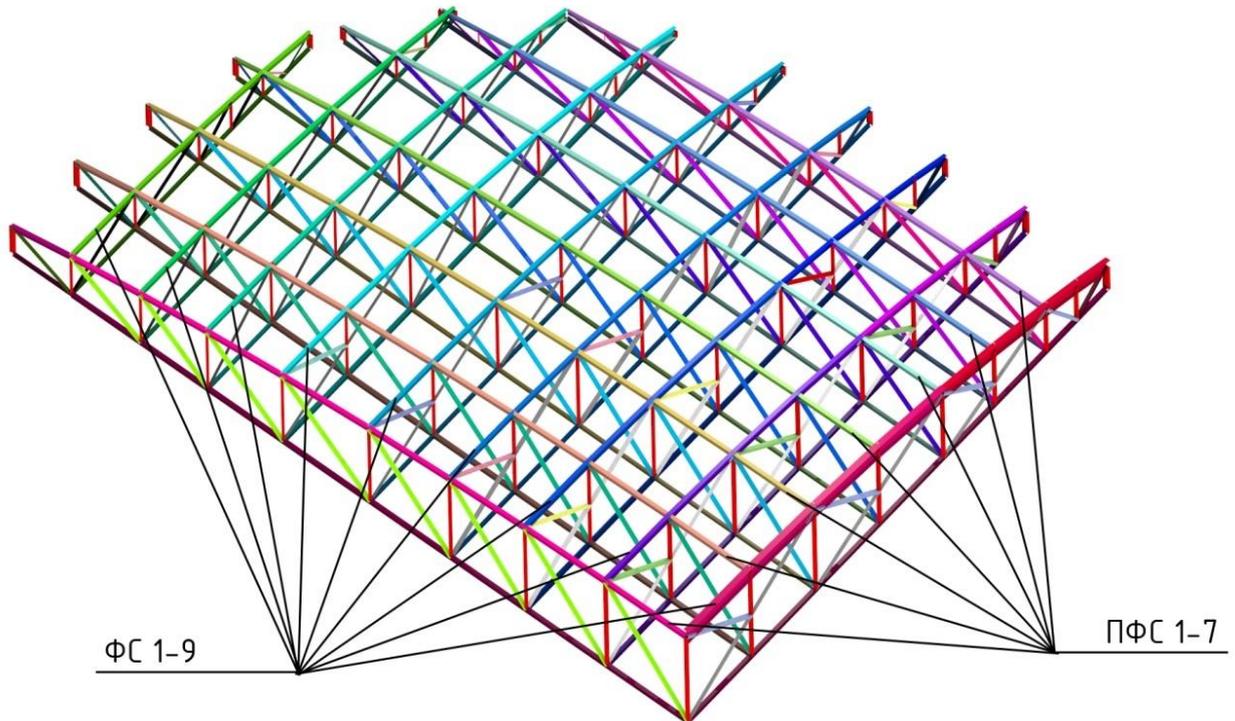


Рисунок 19. Четверть покрытия с цветовой индикацией унифицированных элементов

Для подбора сечений элементов использован постпроцессор ПК SCAD.

Максимальные значения перемещений определялись от нормативных значений собственного веса несущих конструкций и длительных технологических нагрузок (рисунок 20).

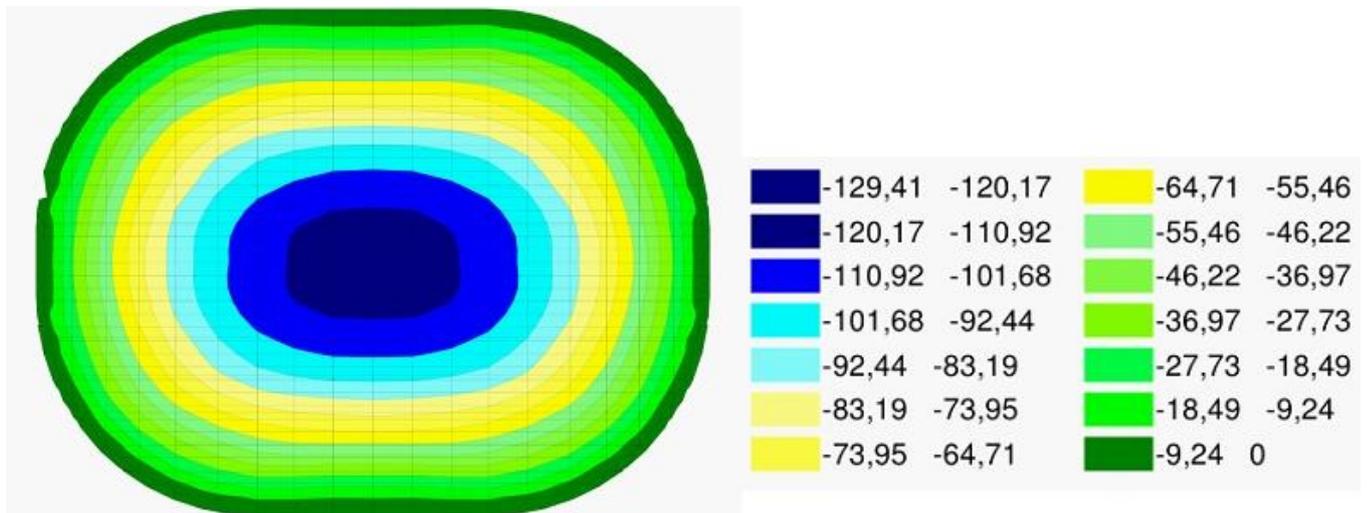


Рисунок 20. Цветовая индикация величины перемещений, мм

Созданы модели несущих конструкций покрытия, отличающиеся положением нижнего пояса ферм. Модели были созданы по следующим критериям:

- тип сечение элементов ферм остаётся неизменным;
- положение верхнего пояса ферм остается неизменным.

Для первоначального анализа создавалось 6 моделей. При этом шаг изменения высоты составлял 0,5м.

Для всех полученных моделей были посчитаны значения металлоемкости и прогиба, по которым впоследствии был построен график (рисунок 21). В интервалах появления локальных экстремумов частота шага изменения параметров оптимизации уменьшалась с целью уточнения точки экстремума.

Отдельно рассчитывалось изменение массы каждого конструктивного элемента.



Рисунок 21. График зависимости металлоемкости покрытия перекрестных ферм от ее высоты



Рисунок 22. График зависимости прогиба покрытия перекрестных ферм от ее высоты

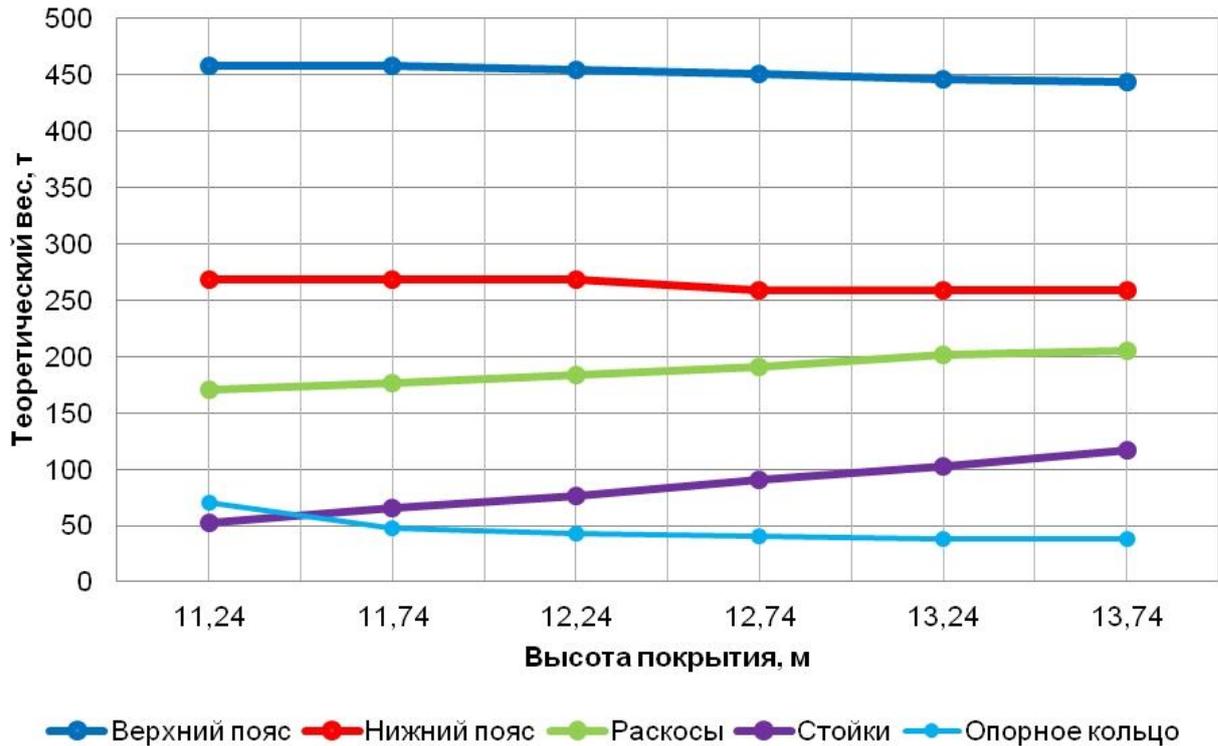


Рисунок 23. График изменения массы элементов покрытия

Исходная высота покрытия, равная 11,74 м, является оптимальной высотой по металлоемкости.

Сравнение вариантов покрытия

В результате подбора сечений различных конструкций покрытия были определены их фактические массы и прогибы. Данные характеристики представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты вариантного проектирования

| Вариант покрытия | Прогиб, мм | Фактическая масса, т |
|--------------------------------|------------|----------------------|
| Исходный вариант покрытия | 136,89 | 1179,16 |
| Покрытие перекрестными фермами | 129,43 | 1217,92 |
| Покрытие с радиальными фермами | 138,97 | 1020,35 |



Рисунок 24. Сравнение вариантов покрытия по металлоемкости и прогибу

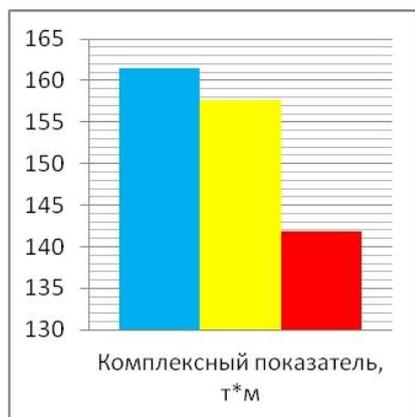


Рисунок 25. Сравнение вариантов покрытия по условному комплексному показателю

проектирования. При исследовании влияния высоты сооружения на его металлоемкость (вторая задача) определено, что наиболее рациональная высота покрытия, для рассмотренных вариантов – 11,74 м (проектная высота).

4. Анализ различных конструктивных схем покрытия, показал, что наиболее оптимальным решением, в условиях принятых допущений, является покрытие с радиально расположенными фермами.

Условный комплексный показатель, полученный перемножением прогиба на соответствующую металлоемкость, показывает, что покрытие с радиальными фермами эффективнее других вариантов покрытия.

Выводы

1. Выполнено создание КЭ модели несущих металлических конструкций покрытия ледового дворца “Большой” с использованием ПК SCAD совместно с другими программными комплексами.

2. Произведен анализ напряженно-деформированного состояния элементов главной арки покрытия на различные нагрузки и воздействия. Структурный анализ состава напряжений в наиболее нагруженных элементах показал, что наибольшие напряжения возникают от технологических нагрузок (38% от максимальных), а основным силовым фактором в стержневых элементах является продольное усилие N.

3. При помощи предложенного алгоритма решены две задачи по поиску рационального решения методом вариантного

Литература

- [1]. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М.: Ин-т компьютерных исслед., 2002. – 856 с.
- [2]. Алахверди А.А. Разработка системы комплексного научно-технического сопровождения проектирования и возведения уникальных сооружений на примере крытого катка в г. Коломна. Автореферат дисс...канд. техн. наук. Москва, 2007. 20 с.
- [3]. Еремеев П.Г. Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений: Монография. – М.: Издательство АСВ, 2009. – 336 с.
- [4]. Городецкий А. С., Шмуклер В. С., Бондарев А. В.. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. 889 с.
- [5]. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели. Киев: Изд-во «Факт», 2007. 394 с.
- [6]. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. 736 с.
- [7]. Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Маляренко А. А., Перельмутер А. В., Перельмутер М. А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD. М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. 656 с.
- [8]. Алешин В. В. Покрытие Большой спортивной арены в Лужниках (проектирование, научные исследования, строительство). М.: Фортэ, 1998. 248 с.
- [9]. Канчели Н. В. Проект покрытия центрального стадиона в Москве // Пространственные конструкции зданий и сооружений. 1996. No.8, с. 203-212.
- [10]. 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.
- [11]. Кудишин Ю. И., Михалев Н.Я. О живучести несущих конструкций покрытия ледового дворца спорта на Ходынском поле в г. Москва // Металлические конструкции. 2007. No.3 (13). с. 131-141.
- [12]. Горохов Е. В., Муцанов В. Ф., Касимов В. Р., Руднева И. Н., Сивоконь Ю. В. Развитие методов расчета и проектирования большепролетных пространственных покрытий спортивных сооружений // Пространственные конструкции зданий и сооружений. 2006. No.10. с. 7-16.
- [13]. Горохов Е. В., Муцанов В. Ф., Кинаш Р. И., Шимановский А. В., Лебедич И. Н. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов. Макеевка: ДонНАСА, 2008. 403 с.
- [14]. Еремеев П. Г. Особенности проектирования уникальных большепролетных зданий и сооружений // Современное промышленное и гражданское строительство. 2006. No.1(2). С 5-15.
- [15]. Пелешко И. Д., Юрченко В. В.. Оптимальное проектирование металлических конструкций на современном этапе (обзор работ) // Металлические конструкции. 2009. 1(15). с. 27-36.
- [16]. Назаров Ю. П., Жук Ю. Н., Симбиркин В. Н., Ананьев А. В., Курнавин В. В. Экспертная оценка конструктивных решений Центрального стадиона и Большой ледовой арены для хоккея с шайбой в г. Сочи // Актуальные проблемы исследований по теории сооружений. 2009. No.2. с. 8-16.
- [17]. Назаров Ю. П., Симбиркин В. Н., Городецкий А. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла конструкций // Актуальные проблемы исследований по теории сооружений. 2009 No.2. с. 204-216.
- [18]. Баглаев Н. Н., Викторов Е. Г., Семенов В. А., Сизов О. П., Ружанский И. Л., Мосягин Д. Л., Голованов В. А. Комплексный расчет несущих конструкций АВК «Внуково-1» // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2008. 4(2). pp. 21-24.
- [19]. 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
- [20]. Martins N., Caetano E., Diord P., Magalhães F., Cunha Á. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response // Engineering Structures. 2014. No. 59. pp. 80-94.
- [21]. Lazzari M., Majowiecki M., Vitaliani R. V., Saetta A. V. Nonlinear F.E. analysis of Montreal Olympic Stadium roof under natural loading conditions // Engineering Structures. 2009. No. 31 (1), pp. 16-31.
- [22]. Zuyan Sh., Yangji Ch., Qingyun L., Xianzhong Zh., Nianliang Y., Yingru Lin. Experimental Study on the Spatial Roof Structure of 80,000-seat Stadium in Shanghai // Advances in Steel Structures (ICASS '96). 1996, pp. 601-606.

- [23].Lozano-Galant J. A., Payá-Zaforteza I. Structural analysis of Eduardo Torroja's Frontón de Recoletos' roof // Engineering Structures. 2011. No. 33 (3), pp. 843-854.
- [24].Cai J., Feng J., Jiang Ch. Development and analysis of a long-span retractable roof structure // Journal of Constructional Steel Research. 2014. No. 92. pp. 175-182.
- [25].Nuñez-Collado G., Garzon-Roca J., Paya-Zaforteza I., Adam J. M. The San Nicolas Church in Gandia (Spain) or how Eduardo Torroja devised a new, innovative and sustainable structural system for long-span roofs // Engineering Structures. 2013. No. 56. pp. 1893-1904.
- [26].Ding Zh., Tamura Y. Contributions of wind-induced overall and local behaviors for internal forces in cladding support components of large-span roof structure // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic. 2013. No. 115. pp. 162-172.
- [27].Borri C., Majowiecki M., Spinelli P. Wind response of a large tensile structure: The new roof of the Olympic stadium in Rome // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic. 1992. 42(1-3). pp. 1435-1446.
- [28].Kinash R., Kopylov O., Walaszczyk J. Research on the influence of stadium's roof shape on its aerodynamic load // Environmental effects on buildings, structures, materials and people. 2007. pp. 97-109.
- [29].Majowiecki M. Snow and wind experimental analysis in the design of long-span sub-horizontal structures // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic. 1998. No. 74-76, pp. 795-807.
- [30].Biagini P., Borri C., Facchini L. Wind response of large roofs of stadiums and arena // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic. No. 95 (9-11). pp. 871-887.
- [31].Borri C., Biagini P. Wind response of large roofs of stadiums and arena // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic. 2007 No. 95 (9-11). pp. 871-887.
- [32].Biagini P., Borri C., Majowiecki M., Orlando M., Procino L. BLWT tests and design loads on the roof of the new Olympic stadium in Piraeus // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic. 2006. No. 94 (5). pp. 293-307.
- [33].Кукушкин И.С. Реализация двусторонней связи между программными комплексами Tekla Structures и SCAD Office 21 // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 9. С. 63-65.
- [34].Теплых А.В. и др. Инженерные технологии построения расчетных моделей и анализа результатов в системе SCAD Office: Модели металлокаркасов // CADmaster. 2006. № 5. С.82-93.
- [35].Kociecki M, Adeli H. Two-phase genetic algorithm for size optimization of free-form steel space-frame roof structures // Journal of Constructional Steel Research. 2013. No. 90. pp. 283-296.
- [36].Buhl Th., Jensen F. V., Pellegrino P. Shape optimization of cover plates for retractable roof structures // Computers & Structures. 2004. No. 82 (15-16). pp. 1227-1236.
- [37].СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85.
- [38].Лихтарников Я. М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. М.: Стройиздат, 1979. 319 с.
- [39].Холопов И. С., Попов А. Н. Многокритериальная оптимизация элементов металлических конструкций в условиях САПР // Современные строительные конструкции из металла и древесины. 1999. с. 226-234.
- [40].Холопов И. С. Оптимизация стержневых систем применительно к САПР. Диссертация на соискание степени доктора технических наук. М., 1992.
- [41].Алпатов В. Ю., Холопов И. С. Оптимизация геометрической формы пространственно-стержневых конструкций // Металлические конструкции. 2009. No.1(15). с. 47-57.
- [42].Трофимович В. В., Пермяков В. А. Оптимальное проектирование металлических конструкций. Киев, Изд-во «Будівельник», 1981. 136 с.

Research of spatial metal roof of long-span sport arena

A.A. Semenov¹, I.A. Porivaev², S.V. Sofoyan³, R.A. Gilemkanov⁴, S.A. Semenov⁴

^{1,2,4,5}Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov St., Ufa, Russia, 450062

³SPF Remstroy, 70v Chkalova st., Ermolaevo, Russia, 453360.

ARTICLE INFO

Original research article

Article history

Received 26 February 2015
Accepted 18 March 2015

Keywords

spatial metal structures,
long span structure,
finite element method,
SCAD Office,
rational shape,
metal consumption

ABSTRACT

A graduation thesis investigation of "Bolshoi" arena in Sochi is presented in this article. A method of F.E. modeling of a dimensional stadium roof model is presented. Stress and strain state of the roof's supporting framework is analyzed. The contribution of individual loadings is rated. The most dangerous loading is shown. A two alternative framework of a roof proposed and analysed using numerical method. The results of the metal consumption optimisation are presented. The most effective structural scheme is shown.

1 Corresponding author:
+7 (917) 776 5858, asfugntu@yandex.ru (Aleksandr Aleksandrovich Semenov, Ph.D., Professor)
2 +7 (917) 401 1118, iporivaev@gmail.com (Ilya Arkadjevich Porivaev, Assistant)
3 +7 (965) 925 4743, Blending@gmail.com (Stepan Vaganovich Sofoyan, Engineer)
4 +7 (917) 401 1118, iluha8@rambler.ru (Ruslan Aydarovich Gilemkanov, Graduate Student)
5 +7 (987) 596 2474, floods77@yandex.ru (Sergey Aleksandrovich Semenov, Post-graduate student)

References

- [1]. Mandelbrot B. *Fraktalnaya geometriya prirody* [Fractal Geometry of Nature] / B. Mandelbrot. – M.: In-t kompyuternykh issled., 2002. – 856 p. (rus)
- [2]. Alakhverdi A.A. *Razrabotka sistemy kompleksnogo nauchno-tehnicheskogo soprovozhdeniya proyektirovaniya i vozvedeniya unikalnykh sooruzheniy na primere krytogo katka v g. Kolomna*. [Development of integrated scientific and technical support for the design and construction of unique structures on the example of an indoor skating rink in Kolomna] *Avtoreferat diss...kand. tekhn. nauk. Moskva*, 2007. 20 p. (rus)
- [3]. Yeremeyev P.G. *Sovremennyye stalnyye konstruksii bolsheproletnykh pokrytiy unikalnykh zdaniy i sooruzheniy* [Modern large-span steel structure covered with unique buildings and structures]: *Monografiya*. – M.: Izdatelstvo ASV, 2009. – 336 p. (rus)
- [4]. Gorodetskiy A. S., Shmukler V. S., Bondarev A. V. *Informatsionnyye tekhnologii rascheta i proyektirovaniya stroitelnykh konstruksiy* [Information technology calculation and design of building structures]. Kharkov: NTU «KhPI», 2003. 889 p. (rus)
- [5]. Gorodetskiy A. S., Yevzerov I. D. *Kompyuternyye modeli* [Computer models]. Kiyev: Izd-vo «Fakt», 2007. 394 p. (rus)
- [6]. Perelmuter A. V., Slivker V. I. *Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Computational models of structures and the possibility of their analysis]. M.: Izd-vo SKAD SOFT, 2011. 736 p. (rus)
- [7]. Karpilovskiy V. S., Kriksunov E. Z., Malyarenko A. A., Perelmuter A. V., Perelmuter M. A. *SCAD Office. Vychislitelnyy kompleks SCAD* [SCAD Office. Computing system SCAD]. M.: Izd-vo SKAD SOFT, 2011. 656 p. (rus)
- [8]. Aleshin V. V. *Pokrytiye Bolshoy sportivnoy areny v Luzhnikakh (proyektirovaniye, nauchnyye issledovaniya, stroitelstvo)* [Covering the Grand Sports Arena in Luzhniki (design, research, construction)]. M.: Forte, 1998. 248 p. (rus)
- [9]. Kancheli N. V. *Proyekt pokrytiya tsentralnogo stadiona v Moskve* [The project covering the central stadium in Moscow] // *Prostranstvennyye konstruksii zdaniy i sooruzheniy*. 1996. No.8, Pp. 203-212. (rus)
- [10]. Mikulin V. B., Farfel M. I., Khandzhi A. V. *Pokrytiye Bolshoy sportivnoy areny Olimpiyskogo kompleksa v Luzhnikakh* [Covering the Grand Sports Arena Luzhniki Olympic Complex]. // *TsNIISK im. V.A. Kucherenko*. 80 let. 2007. Pp. 46-55. (rus)
- [11]. Kudishin Yu. I., Mikhalev N.Ya. *O zhivuchesti nesushchikh konstruksiy pokrytiya ledovogo dvortsya sporta na Khodynskom pole v g. Moskva* [About survivability bearing structures covering the Ice Palace at Khodynka in Moscow] // *Metallicheskiye konstruksii*. 2007. No.3 (13). Pp. 131-141. (rus)
- [12]. Gorokhov Ye. V., Mushchanov V. F., Kasimov V. R., Rudneva I. N., Sivokon Yu. V. *Razvitiye metodov rascheta i proyektirovaniya bolsheproletnykh prostranstvennykh pokrytiy sportivnykh sooruzheniy* [Development of methods of calculation and design of large-span spatial covering sports facilities] // *Prostranstvennyye konstruksii zdaniy i sooruzheniy*. 2006. No.10. Pp. 7-16. (rus)
- [13]. Gorokhov Ye. V., Mushchanov V. F., Kinash R. I., Shimanovskiy A. V., Lebedich I. N. *Konstruksii statsionarnykh pokrytiy nad tribunami stadionov* [Stationary design coatings on the stands]. Makeyevka: DonNASA, 2008. 403 p. (rus)
- [14]. Yeremeyev P. G. *Osobennosti proyektirovaniya unikalnykh bolsheproletnykh zdaniy i sooruzheniy* [Design features a unique large-span buildings and structures] // *Sovremennoye promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. 2006. No.1(2). Pp 5-15. (rus)
- [15]. Peleshko I. D., Yurchenko V. V. *Optimalnoye proyektirovaniye metallicheskikh konstruksiy na sovremennom etape (obzor rabot)* [Optimal design of metal structures at the present stage (overview)] // *Metallicheskiye konstruksii*. 2009. 1(15). Pp. 27-36. (rus)
- [16]. Nazarov Yu. P., Zhuk Yu. N., Simbirkin V. N., Ananyev A. V., Kurnavin V. V. *Ekspertnaya otsenka konstruktivnykh resheniy Tsentralnogo stadiona i Bolshoy ledovoy areny dlya khokkeya s shayboy v g. Sochi* [Expert evaluation of design solutions of the Central Stadium and the Grand Ice Arena for ice hockey in Sochi] // *Aktualnyye problemy issledovaniy po teorii sooruzheniy*. 2009. No.2. Pp. 8-16. (rus)
- [17]. Nazarov Yu. P., Simbirkin V. N., Gorodetskiy A. S. *Kompyuternoye modelirovaniye protsessov zhiznennogo tsikla konstruksiy* [Computer simulation of the life cycle of structures] // *Aktualnyye problemy issledovaniy po teorii sooruzheniy*. 2009 No.2. Pp. 204-216. (rus)
- [18]. Baglayev N. N., Viktorov Ye. G., Semenov V. A., Sizov O. P., Ruzhanskiy I. L., Mosyagin D. L., Golovanov V. A. *Kompleksnyy raschet nesushchikh konstruksiy AVK «Vnukovo-1»* [Complex calculations supporting structures

- AVK "Vnukovo-1" // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2008. 4(2). Pp. 21-24. (rus)
- [19]. 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
- [20]. Martins N., Caetano E., Diord P., Magalhães F., Cunha Á. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response // *Engineering Structures*. 2014. No. 59. pp. 80-94.
- [21]. Lazzari M., Majowiecki M., Vitaliani R. V., Saetta A. V. Nonlinear F.E. analysis of Montreal Olympic Stadium roof under natural loading conditions // *Engineering Structures*. 2009. No. 31 (1), pp. 16-31.
- [22]. Zuyan Sh., Yangji Ch., Qingyun L., Xianzhong Zh., Nianliang Y., Yingru Lin. Experimental Study on the Spatial Roof Structure of 80,000-seat Stadium in Shanghai // *Advances in Steel Structures (ICASS '96)*. 1996, pp. 601-606.
- [23]. Lozano-Galant J. A., Payá-Zaforteza I. Structural analysis of Eduardo Torroja's Frontón de Recoletos' roof // *Engineering Structures*. 2011. No. 33 (3), pp. 843-854.
- [24]. Cai J., Feng J., Jiang Ch. Development and analysis of a long-span retractable roof structure // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. No. 92. pp. 175-182.
- [25]. Nuñez-Collado G., Garzon-Roca J., Paya-Zaforteza I., Adam J. M. The San Nicolas Church in Gandia (Spain) or how Eduardo Torroja devised a new, innovative and sustainable structural system for long-span roofs // *Engineering Structures*. 2013. No. 56. pp. 1893-1904.
- [26]. Ding Zh., Tamura Y. Contributions of wind-induced overall and local behaviors for internal forces in cladding support components of large-span roof structure // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*. 2013. No. 115. pp. 162-172.
- [27]. Borri C., Majowiecki M., Spinelli P. Wind response of a large tensile structure: The new roof of the Olympic stadium in Rome // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*. 1992. 42(1-3). pp. 1435-1446.
- [28]. Kinash R., Kopylov O., Walaszczyk J. Research on the influence of stadium's roof shape on its aerodynamic load // *Environmental effects on buildings, structures, materials and people*. 2007. pp. 97-109.
- [29]. Majowiecki M. Snow and wind experimental analysis in the design of long-span sub-horizontal structures // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*. 1998. No. 74-76, pp. 795-807.
- [30]. Biagini P., Borri C., Facchini L. Wind response of large roofs of stadiums and arena // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*. No. 95 (9-11). pp. 871-887.
- [31]. Borri C., Biagini P. Wind response of large roofs of stadiums and arena // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*. 2007 No. 95 (9-11). pp. 871-887.
- [32]. Biagini P., Borri C., Majowiecki M., Orlando M., Procino L. BLWT tests and design loads on the roof of the new Olympic stadium in Piraeus // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*. 2006. No. 94 (5). pp. 293-307.
- [33]. Kukushkin I.S. *Realizatsiya dvustoronney svyazi mezhdu programmnyimi kompleksami Tekla Structures i SCAD Office 21* [The implementation of two-way communication between software applications Tekla Structures and SCAD Office 21] // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. 2014. № 9. Pp. 63-65. (rus)
- [34]. Teplykh A.V. i dr. *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] // *CADmaster*. 2006. № 5. Pp.82-93. (rus)
- [35]. Kociecki M, Adeli H. Two-phase genetic algorithm for size optimization of free-form steel space-frame roof structures // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. No. 90. pp. 283-296.
- [36]. Buhl Th., Jensen F. V., Pellegrino P. Shape optimization of cover plates for retractable roof structures // *Computers & Structures*. 2004. No. 82 (15-16). pp. 1227-1236.
- [37]. SP 20.13330.2011 *Nagruzki i vozdeystviya* [Loads and actions]. *Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85*. (rus)
- [38]. Likhtarnikov Ya. M. *Variantnoye proyektirovaniye i optimizatsiya stalnykh konstruksiy* [Variant design and optimization of steel structures]. M.: *Stroyizdat*, 1979. 319 p. (rus)
- [39]. Kholopov I. S., Popov A. N. *Mnogokriterialnaya optimizatsiya elementov metallicheskiy konstruksiy v usloviyakh SAPR* [Multi-criteria optimization of the elements of metal structures in a CAD] // *Sovremennyye stroitelnyye konstruksii iz metalla i drevesy*. 1999. Pp. 226-234. (rus)

- [40]. Kholopov I. S. *Optimizatsiya sterzhnevykh sistem primenitelno k SAPR* [Optimization rod systems as applied to CAD]. *Dissertatsiya na soiskaniye stepeni doktora tekhnicheskikh nauk*. M., 1992. (rus)
- [41]. Alpatov V. Yu., Kholopov I. S. *Optimizatsiya geometricheskoy formy prostranstvenno-sterzhnevykh konstruksiy* [Optimization of the geometrical shape of space-bar structures] // *Metallicheskiye konstruksii*. 2009. No.1(15). Pp. 47-57. (rus)
- [42]. Trofimovich V. V., Permyakov V. A. *Optimalnoye proyektirovaniye metallicheskih konstruksiy* [Optimal design of metal structures]. *Kiyev, Izd-vo «Budivelnik»*, 1981. 136 p. (rus).

Семенов А.А., Порываев И.А., Софоян С.В., Гилемханов Р.А., Семенов С.А. Анализ работы несущих конструкций покрытия большепролетного спортивного сооружения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №4(31). С. 58-81.

Semenov A.A., Porivaev I.A., Sofoyan S.V., Gilemkhanov R.A., Semenov S.A. Research of spatial metal roof of long-span sport arena. Construction of Unique Buildings and Structures, 2015, 4(31), Pp. 58-81. (rus)