Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Инженерно-строительный институт
Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства

Работа допущена к защите

Директор ВШПГиДС

_____ Ю.Г. Лазарев

«___»_____2021 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Магистерская диссертация

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ КУПОЛОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

по направлению 08.04.01 «Строительство»
по образовательной программе
08.04.01_25 «Цифровое строительство зданий и сооружений»

Выполнил:
студент гр. 3140801/92501 А.Х. Наджмудинов

Руководитель:
к.т.н., доцент
ВШПГиДС Ф.С. Школяр

Консультант:
ст. преподаватель
ВШПГиДС С.С. Зимин

Консультант
по нормоконтролю:
ст. преподаватель
ВШПГиДС ИСИ О.С. Гамаюнова

Санкт-Петербург

2021

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
Инженерно-строительный институт
Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства

УТВЕРЖДАЮ

Директор ВШПГиДС

_____ Ю.Г.Лазарев

« » 20 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Наджмудинову Амирджону Холмуродовичу, гр. 3140801/92501

фамилия, имя, отчество (при наличии), номер группы

1. **Тема работы**: Напряженно-деформированное состояние геодезических куполов в условиях Крайнего Севера.

2. **Срок сдачи студентом законченной работы**: 20 мая 2021.

3. **Исходные данные по работе**: учебная литература; периодические издания; Интернет-ресурсы; официальные проекты, использованные в проектировании;

4. **Содержание работы** (перечень подлежащих разработке вопросов):
   - Изучение литературы и анализ предмета исследования
   - Анализ существующих методов и программных комплексов
   - Исследование и результаты

5. **Перечень графического материала** (с указанием обязательных чертежей): рисунки, таблицы, графики, демонстрирующие результаты научно-исследовательской работы.

6. **Консультанты по работе**: старший преподаватель ВШПГиДС Зимин С.С.

7. **Дата выдачи задания**: 15.10.2019

Руководитель ВКР _____ Ф.С. Школяр
(подпись) (инициалы, фамилия)

Задание принял к исполнению _____
(дата)

Студент _____ А.Х. Наджмудинов
(подпись) (инициалы, фамилия)

Календарный план подготовки магистерской диссертации

№	Содержание планируемой работы	Сроки выполнения		Отметка научного руководителя о выполнении
		начало	конец	
1	Введение	15.10.2019	28.12.2019	
2	Глава 1. Изучение литературы и анализ предмета исследования	28.12.2019	31.05.2020	
3	1.1. Общие сведения о геодезических куполах	28.12.2019	31.05.2020	
4	1.2. Обзор источников по теме	28.12.2019	31.05.2020	
5	1.2.1. Обзор отечественных статей	28.12.2019	31.05.2020	
6	1.2.2. Обзор кандидатских и докторских диссертаций	28.12.2019	31.05.2020	
7	1.2.3. Обзор иностранных статей	28.12.2019	31.05.2020	
8	1.2.4. Краткие сведения о строительстве в условиях Крайнего Севера	28.12.2019	31.05.2020	
9	1.3. Выводы по первой главе	28.12.2019	31.05.2020	
10	Глава 2. Анализ существующих методов и программных комплексов	31.05.2020	27.12.2020	
11	2.1 Геодезические купола. Особенности применения и расчёта	31.05.2020	27.12.2020	
12	2.2 Существующие методы расчета НДС сетчатых геодезических куполов	31.05.2020	27.12.2020	
13	2.3 Существующие программные комплексы, основанные на МКЭ	31.05.2020	27.12.2020	
14	2.4 Выводы по второй главе	31.05.2020	27.12.2020	
15	Глава 3. Исследование и результаты	27.12.2020	28.04.2021	
16	3.1 Описание объекта	27.12.2020	28.04.2021	
17	3.2 Сбор нагрузок на геодезический купол	27.12.2020	28.04.2021	
18	3.2.1 Снеговая нагрузка	27.12.2020	28.04.2021	
19	3.2.2 Ветровая нагрузка	27.12.2020	28.04.2021	
20	3.2.3 Температурно-климатические нагрузки	27.12.2020	28.04.2021	
21	3.3 Моделирование геодезического купола	27.12.2020	28.04.2021	
22	3.4 Результаты расчета	27.12.2020	28.04.2021	
23	3.4.1 Результаты расчета стального геодезического купола	27.12.2020	28.04.2021	
24	3.4.2 Результаты расчета алюминиевого геодезического купола	27.12.2020	28.04.2021	
25	3.4.3 Результаты расчета деревянного геодезического купола	27.12.2020	28.04.2021	
26	3.5 Расчет стоимости элементов геодезического купола	27.12.2020	28.04.2021	
27	3.6 Выводы по третьей главе	27.12.2020	28.04.2021	
28	Заключение	27.12.2020	28.04.2021	

Руководитель ВКР _____ Ф.С. Школяр
(подпись) (инициалы, фамилия)

Студент _____ А.Х. Наджмудинов
(подпись) (инициалы, фамилия)

РЕФЕРАТ

На 107 с., 80 рисунка, 11 таблиц, 1 приложение.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ КУПОЛ, СЕТЧАТЫЙ КУПОЛ, СТАЛЬ, АЛЮМИНИЙ, ДРЕВЕСИНА, ТЕМПЕРАТУРНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, УСЛОВИЯ КРАЙНЕГО СЕВЕРА.

Тема выпускной квалификационной работы: «Напряженно-деформированное состояние геодезических куполов в условиях Крайнего Севера». Работа посвящена оценке расчетными методами влияния температурно-климатических, снеговых и ветровых воздействий, а также собственного веса и веса от покрытия на характеристики НДС элементов сетчатых геодезических куполов и технико-экономическая обоснования применения этих куполов в условиях Крайнего Севера.

Задачи, которые решались в ходе исследования:

1. Выполнение обзор и анализ литературы, посвященной вопросам сетчатых геодезических куполов.
2. Проведение анализ существующих программных комплексов, позволяющих провести расчет и моделирование.
3. Выполнение моделирование и расчет.
4. Определение влияния температурно-климатических воздействий на НДС купола в условиях Крайнего Севера.
5. Определение влияния снеговых и ветровых воздействий, а также собственного веса и веса от покрытия на НДС купола в условиях Крайнего Севера.
6. Выбор сечения элементов и определено стоимости сетчатых геодезических куполов из разных материалов таких как: сталь, алюминий, древесина.
7. Сделать вывод о целесообразности применения полученных результатов в практике проектирования сетчатых геодезических куполов.

В ходе исследований определялись влияние силовых и температурно-климатических воздействий на напряженно-деформированное состояние геодезических куполов в условиях Крайнего Севера. А также были определены общая стоимость элементов конструкций купола из разных материалов, такие как сталь, алюминий и древесина.

Помимо расчетов были сконструированы узлы соединение элементов геодезического купола.

ABSTRACT

107 pages, 80 figures, 11 tables, 1 appendix.

KEYWORDS: GEODESIC DOME, MESH DOME, STEEL, ALUMINUM, WOOD, TEMPERATURE AND CLIMATE EFFECTS, STRESS-STRAIN STATE, HARD NORTH CONDITIONS.

The subject of the graduate qualification work is “Stress-strain state of geodesic domes in the Hard North conditions”. The work is devoted to the assessment by calculation methods of the influence of temperature-climatic, snow and wind effects, as well as its own weight and weight from the coating on the characteristics of the SSS of elements of mesh geodesic domes and a feasibility study for the use of these domes in the Hard North conditions.

The research set the following goals:

1. Performing review and analysis of literature on mesh geodesic domes.
2. Carrying out an analysis of existing software systems that allow for calculation and modeling.
3. Implementation of modeling and calculation.
4. Determination of the influence of temperature and climatic influences on the SSS of the dome in the conditions of the Hard North conditions.
5. Determination of the influence of snow and wind influences, as well as its own weight and weight from the coating on the SSS of the dome in the Hard North conditions.
6. The choice of the cross-section of the elements and the cost of mesh geodesic domes from different materials such as steel, aluminum, wood is determined.

7. Make a conclusion about the feasibility of applying the results obtained in the practice of designing mesh geodesic domes.

In the course of the research, the influence of force and temperature-climatic effects on the stress-strain state of geodesic domes in the Far North was determined. Also, the total cost of structural elements of the dome from different materials, such as steel, aluminum and wood, was determined.

In addition to calculations, nodes were designed to connect the elements of the geodesic dome.

Оглавление

Введение ... 9
Глава 1. Изучение литературы и анализ предмета исследования ... 13
1.1. Общие сведения о геодезических куполах ... 13
1.2. Обзор источников по теме ... 14
1.2.1. Обзор отечественных статей ... 14
1.2.2. Обзор кандидатских и докторских диссертаций ... 20
1.2.3. Обзор иностранных статей ... 23
1.3. Краткие сведения о строительстве в условиях Крайнего Севера ... 26
Выводы по первой главе ... 28
Глава 2. Анализ существующих методов и программных комплексов ... 29
2.1. Геодезические купола. Особенности применения и расчёта ... 29
2.2. Существующие методы расчета НДС сетчатых геодезических куполов 33
2.3. Существующие программные комплексы, основанные на МКЭ ... 35
Выводы по второй главе ... 46
Глава 3. Исследование и результаты ... 48
3.1. Описание объекта ... 48
3.2. Сбор нагрузок на геодезический купол ... 49
3.2.1. Снеговая нагрузка ... 49
3.2.2. Ветровая нагрузка ... 52
3.2.3. Температурно-климатические нагрузки ... 56
3.3. Моделирование геодезического купола ... 58
3.4. Результаты расчета ... 64
3.4.1. Результаты расчета стального геодезического купола ... 65
3.4.2. Результаты расчета алюминиевого геодезического купола ... 71
3.4.3. Результаты расчета деревянного геодезического купола ... 77
3.5. Расчет стоимости элементов геодезического купола ... 82
Выводы по третьей главе ... 84
Заключение ... 86

Список использованных источников 87
Приложение А. План, разрез, узлы соединения..... 95

Введение

В настоящее время технология возведения геодезических систем эффективно применяется в строительстве жилых домов, гостиниц, выставочных комплексов, ботанических садов, бассейнов, кафе, ресторанов, павильонов, спорткомплексов, планетариев, производственных и складских помещений, защитных оболочек для зданий. Эту конструкцию рассматривают и в роли обитаемых станций на Луне и Марсе. Возведение таких зданий вызвано, как правило, необходимостью в больших площадях и объемах воздуха. Купола-геосоты выгодно строить в зонах с повышенной сейсмической активностью, при невозможности возведения крупных фундаментов. Данная конструкция обладает значительной прочностью, а экономическая выгода от ее применения возрастает при увеличении размеров купола [1].

Геодезические купола, по сравнению с другими видами купольных конструкций, имеют значительное преимущество в виде легкости конструкции и простоты монтажа, что было доказано еще в прошлом веке Б. Фуллером [2, 3].

Геодезические купола получили большое развитие во второй половине XX века, и до сих пор являются одним из лучших решений в покрытии большепролетных зданий разной направленности. В наши дни, благодаря появлению расчетных программ и росту мощностей компьютеров геодезические купола получили второе дыхание.

Российский опыт создания и применения купольных систем имеет ряд проблем. Во-первых, отсутствуют эффективные методы расчета сетчатых куполов, учитывающие особенности работы используемых материалов. Во-вторых, в нормативной литературе расчет влияния на элементы ведётся без совместного учета всех нелинейных факторов (физических, конструктивных, геометрических). Кроме того, многогранные поверхности куполов, образованных на основе икосаэдра, в большинстве случаев имеют значительное число типоразмеров сборных элементов. Отсутствуют рекомендации по назначению оптимальных геометрических параметров несущих элементов, а известные

конструктивные решения узлов отличаются повышенной трудоемкостью при проектировании и изготовлении и нуждаются в оптимизации. Перечисленные проблемы снижают качество проектирования и замедляют темпы применения геодезических строительных систем. Такое положение объясняется недостаточным количеством экспериментально-теоретических исследований. [4]

Состав таких куполов достаточно прост: стержни, узлы соединения между элементами, опорные узлы, покрытие.

В качестве материала для каркаса геодезического купола можно использовать:

- дерево (универсально в использовании);
- металл (обычно используется для тентовых, декоративных и полностью застекляемых куполов, можно и гипсокартонные профиля пристроить для небольшого купола);
- пластик (можно использовать для небольших куполов и сфер со сравнительно малой нагрузкой);
- композитные материалы.

Степень разработанности темы исследования. На текущий момент написано множество работ по устойчивости стержневых систем, и данная тема весьма проработана [2, 3, 5, 6, 7], однако относительно применимости теории к геодезическим куполам существует значительно меньшее количество работ [1, 5, 11-16, 18-20, 22, 27-30]. Данные исследования составляют основную информационную базу диссертации.

Научная новизна данной работы:

– заключается в получении и анализе новых данных о влиянии температурно-климатических, снеговых и ветровых воздействий, а также собственного веса и веса от покрытия на элементах сетчатых геодезических куполов в условиях Крайнего Севера.

Значение диссертации для теории:

Формирование напряженно-деформированное состояние геодезических куполов, выполненных из различных материалов.

Значение диссертации для практики:

В разработке методики расчета геодезических куполов, выполненных из различных материалов.

Целью данной работы является оценка расчетными методами влияния температурно-климатических, снеговых и ветровых воздействий, а также собственного веса и веса от покрытия на характеристики НДС элементов сетчатых геодезических куполов и технико-экономическая обоснования применения этих куполов в условиях Крайнего Севера.

В данной работе стоят следующие задачи:

1. Выполнить обзор и анализ литературы, посвященной вопросам сетчатых геодезических куполов.
2. Провести анализ существующих программных комплексов, позволяющих провести расчет и моделирование.
3. Выполнить моделирование и расчет.
4. Определение влияния температурно-климатических воздействий на НДС купола в условиях Крайнего Севера.
5. Определение влияния снеговых и ветровых воздействий, а также собственного веса и веса от покрытия на НДС купола в условиях Крайнего Севера.
6. Выбор сечения элементов и определение стоимости сетчатых геодезических куполов из разных материалов таких как: сталь, алюминий, древесина.
7. Сделать вывод о целесообразности применения полученных результатов в практике проектирования сетчатых геодезических куполов.

Объект исследования – сетчатый геодезический купол.

Предмет исследования – оценка особенностей напряженно-деформированного состояния стальных, алюминиевых и деревянных сетчатых геодезических куполов в зависимости от механических и физических характеристик материала, геометрических параметров, внешних нагрузок и температурно-климатических воздействий.

Метод исследования. В ходе работы применялась следующий метод: численное исследование напряженно-деформированного состояния геодезического купола велось с применением вычислительного комплекса (ЛИРА-САПР 2016 R5), основанного на методе конечных элементов.

Апробация результатов исследований. Основное содержание и результат исследований магистерской диссертации обобщен и изложены в материалах научной конференции, в том числе:

1) Наджмудинов А.Х. Напряженно-деформированное состояние геодезических куполов в условиях Крайнего Севера / А.Х. Наджмудинов, С.С. Зимин // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, Инженерно-строительный институт. В 3 ч., Санкт-Петербург, 26–30 апреля 2021 года / отв. ред. Н. Д. Беляев, В. В. Елистратов. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2021. – С. 3-5.

Результаты исследования доложена на следующая научно-практическая конференция:

1) «Неделя науки ИСИ» г. Санкт-Петербург, 2021 г.

Глава 1. Изучение литературы и анализ предмета исследования

1.1. Общие сведения о геодезических куполах

Развитие в практике современного строительства, а именно покрытия зданий больших пролетов, получили сетчатые купола. Выигрыш данных конструкций у пространственных рамных жестких схем заключается в значительной экономии материала по отношению к площади покрытия. Большую эффективность эти конструкции приобретают при перекрытии пролетов от 200 м. Также сетчатые купола имеют большую архитектурную выразительность, что позволяет придать индивидуальный образ зданию или сооружению.

За прошедший период (с середины XX столетия) в разработке геометрических основ геодезических оболочек участвовали многочисленные исследователи. Первые публикации о параметрах геодезических сетей принадлежат профессору Московского архитектурного института М.С. Туполеву (1951 г.) и американскому инженеру Б. Фуллеру (1952 г.).

В двадцатом веке значительный вклад в развитие купольных конструкций внесли: Отто К.В., Райт Ф.Л., Фуллер Р. Б., Туполев М. С., Липницкий М. Е., Савельев В. А. [2, 3, 6, 7, 9]. В изучение устойчивости стержневых конструкций необходимо отметить Тимошенко С. П., Фридриха Блейха [8, 10].

Если взять классические типы куполов, такие как ребристый и ребристо-кольцевой и увеличивать степень связности системы, то получится сетчатый купол (рис. 1.1), в котором стержни преимущественно работают на осевые силы, что существенно уменьшает вес, однако увеличивается количество самих стержней и узлов их соединения.

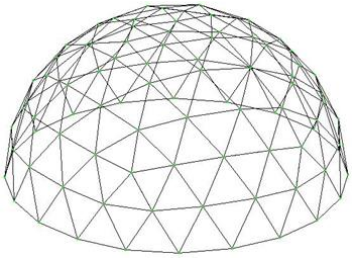


Рисунок 1.1 – Расчетная схема сетчатого купола системы Фуллера (геодезический купол)

1.2. Обзор источников по теме

1.2.1. Обзор отечественных статей

Современные тенденции в области строительства диктуют все новые требования к конструкциям, они обязывают архитекторов с особым вниманием относиться к прочности, устойчивости и жизнеспособности сооружений. К сооружениям, которые одновременно надежны, композиционно сочетаемы со многими формами и неприхотливы в эксплуатации, а также энергоэффективны, можно отнести такие системы, как «купольная», или «геосота». Пространственные решетчатые системы обладает своеобразной эстетикой, которую называют «машинной», подходящей для объектов с большими объемами, такими как выставочные залы, промышленные здания, спортивные сооружения. В настоящее время геодезические системы и другие сетчатые купола привлекают строителей и архитекторов немалыми архитектурными достоинствами, создающими геометрическую композицию на фасаде и интерьере здания. Исследование геодезических систем связано с возросшим интересом учёных, архитекторов и строителей к выполнению проектов различного функционального назначения «купольной» системы. В сообщении [1] рассматривается концепция происхождения данных систем, особенности форм, актуальность купольных строений в настоящее время, область их применения, физические параметры, геометрические особенности, достоинства и недостатки.

Масса сетчатого покрытия это одно из его преимуществ перед другими типами покрытий, поэтому при проектировании геодезических или других типов сетчатых куполов нужно особенно внимание уделять массе как стержней, так и узлов их соединения. В работе [5] был проведен анализ существующих конструкций и на основе полученных данных было представлено решение задачи оптимизации пространственно-стержневой системы.

Компьютерное моделирование очень мощный инструмент в руках исследователей, при настоящей цифровой модели результаты вычислений коррелируют с натурными результатами экспериментов. В статье [11]

описываются исследования напряженно-деформированных состояний пары типов узлов – МАРХИ и узла, созданного авторами – на фасонках. Был проведен анализ конструкции в нескольких расчетных комплексах структурного анализа. А именно: LIRA, CosmosWorks, DesignSpase, SCAD. С помощью итерационного метода были получены оптимальные модели узлов с рациональным распределением материала.

В статье [12] представлена информация об истории развития и строительства геодезических куполов в условиях Крайнего Севера. Выполнен анализ плюсов и минусов таких конструкций. Авторами статьи предложен новый вид соединений стержней в геодезическом куполе, приведены плюсы такого соединения от существующих.

В статье [13] рассматриваются результаты экспериментов узловых соединений и технология возведения на их основе купольных стержневых строительных систем. Рассматриваются геодезические купола, не только с точки зрения сетчатых сооружений, аналогичных, например, оболочкам В. Г. Шухова, но в первую очередь в качестве строительных систем зданий различного назначения, возводимых в арктических условиях строительства и эксплуатации и предназначенных для арктических войск в качестве комплексного здания.

Конструирование и испытание нового соединительного узла выполнено непосредственно Д.А. Животовым, а в теоретическом анализе гипотез функционально-технологических решений участвует Ю.И. Тилинин.

При проектировании куполов необходим комплексный учет температурных и силовых воздействий. Ограждающие конструкции зданий и сооружений, эксплуатирующиеся в районах Крайнего Севера, испытывают влияние температурных перепадов, связанных с изменением суточных и сезонных температур, односторонней солнечной радиации, влажности воздуха, скорости ветра и др. В статье, являющейся часть диссертационного исследования [14] рассматривается напряженно-деформированное состояние элементов сетчатого геодезического купола при температурно-климатических, снеговых, ветровых воздействий, а также собственного веса и веса от покрытия.

В данной статье [15] охарактеризован выбор материалов куполов. Рассмотрены различные виды материалов, их особенности, экономический анализ их экономичности.

В работе [16], посвященной исследованию зависимости напряженно-деформированного состояния сетчатого купола от податливости узлов, рассматривается простая стержневая система, заданная в программном комплексе Лира, в которой податливость узлов моделировалась несколькими вариантами. Первый, это метод О.Ю. Дериглазова и И.С. Инжутова [17]. Второй, установка на концы стержней упругих элементов, податливость которых равна податливости коннекторов (коннектор - это соединитель который используют для соединения элементов купола). Третий, замена в расчетной схеме купола элемента узлового соединения цилиндрической формы, шестью прямыми стержнями соответствующей длины, жестко соединенными друг с другом и вписанными в круг с радиусом, равным радиусу элемента цилиндрической формы.

По результатам данного исследования были сделаны следующие выводы о влиянии податливости узловых соединений купола на его НДС:

Учет податливости приводит к уменьшению усилий в стержнях купола. Деформативность при этом значительно увеличивается. На практике применение данные методы расчета не имеют существенной экономической выгоды, и использование прежних идет только в запас прочности. Однако при расчете по схеме без учета податливости необходимо принимать во внимание повышенную деформативность конструкции при выборе кровли купола.

Проектирование сетчатых куполов занятие очень трудоемкое, и зачастую, чтобы найти оптимальную систему разрезки, стрелу подъема и форму купола необходимо задать несколько расчетных схем. Особенностью задания таких схем является отсутствие взаимозаменяемости, на каждую новую схему нужно заново выводить геометрические характеристики, производить сбор нагрузок и подбирать новые сечения. Для решения данной проблемы разрабатываются автоматизированные системы проектирования сетчатых куполов, как в работе автора Тур А.В. [18], где с помощью программы Microsoft Excel был создан файл,

который может быть импортирован в программный комплекс «Лира», в формате «.txt». Данная программа позволяет учитывать не только снеговую нагрузку для схемы с любыми заданными геометрическими характеристиками, но и задавать ветровую нагрузку, а также предоставляет выбор типа конечного элемента.

Сетчатый купол - это система, состоящая из большого количества стержневых и узловых элементов, которые объединены между собой. Представляет ли опасность отказ хотя бы одного из них, или конструкция устоит и продолжить нормально функционировать? Данным вопросом задались авторы статьи [19] про внезапное исключение из работы одного узлового элемента. Проведенное исследование напряженно-деформированного состояние такого купола показало, что выключение из работы даже одного элемента системы может существенно повлиять на всю работу конструкции и привести к прогрессирующему разрушению, а соответственно аварии.

В своем цикле работ [20] Тур В.И и Тур А.В. продолжают рассматривать узлы сетчатых стальных куполов. Описывается особенности конструкции нового разработанного узла. Приводится модель из конечных элементов данного узлового соединения выполненная в ПК Nastran. Был произведен эксперимент с коннектором в испытательной установке. Итоги данного исследования говорят о корректности заданной модели, так как результаты сходятся с экспериментальными, также говорится о влиянии самих крепежных элементов на стержни, и проведен анализ работы этих элементов, характер их разрушения при критической нагрузке.

Вопрос работы не купола, а самих узлов по отдельности не менее важен, так как может привести к выведению из строя элемента системы, что может привести к затруднению или невозможности дальнейшей эксплуатации конструкции, и рассматривается в работе [21] И.С. Холопова. Узел, состоящий из стального цилиндра и пластин для прикрепления стержней, был смоделирован в программном комплексе Nastran. Дальнейший расчет и анализ показали напряженно-деформируемое состояние узла. Чтобы повысить несущую способность были выдвинуты решения по укреплению несколькими стальными

кольцами, что привели к значительному увеличению несущей способности и небольшому приросту общей массы элемента.

В статье [22], посвященной расчету геодезических куполов с использованием ПК ЛИРА-САПР, представлены вопросы прочностного расчета геодезического купола, базирующегося на методе конечных элементов. Изучена работа данной конструкции при нагрузках, возникающих на стадии эксплуатации. Анализ напряжённо-деформированного состояния геодезического купола проведён с использованием ПК ЛИРА-САПР 2013. Предложены методы оптимизации конструкции с учетом всех силовых факторов.

Пространственное состояние техногенных объектов не остается постоянным. Их состояние изменяется в зависимости от влияния внешних факторов или внутренних процессов. Изменение пространственного состояния проявляется в деформациях объекта, что влечет за собой, порой, необратимые последствия - от разрушения конструкций до человеческих жертв, данный вопрос рассматривается в статье [23]. В связи с этим, одной из важнейших задач геодезического мониторинга является определение изменения пространственного состояния техногенных объектов. В статье приведен пример определения деформации техногенного объекта по результатам лазерного сканирования Модели, полученные по данным лазерного сканирования, являются статическими. Имея статическую 3D модель пространственного состояния объекта, соответствующую фиксированному моменту времени t, определение деформации поверхности возможно путем ее совмещения с проектной поверхностью. Отклонение реальной модели от проектной на величину большую допустимой свидетельствует о деформации этой поверхности.

В статье [24], представлен сравнительный анализ работы сетчатых звездчатых куполов среднего диаметра различной высоты от различных видов загружений в соответствии с действующими нормами. Затронуты вопросы оптимизации куполов, дано сравнение их по металлоемкости.

В статье [25], представлен метод определения жёсткости пологих сетчатых куполов, состоящих из рёбер, прогонов, настила, опорного кольца. Изложенный

метод основан на равенстве потенциальных энергий внешних сил. Полученные данные позволяют численно определить степень включения настила в работу конструкции. Значения получены для трёх видов нагрузок: симметричной, несимметричной, сосредоточенной. Достоверность данных обеспечена использованием ПК ЛИРА-САПР.

В статье [26], приведено описание программного обеспечения для конвертации результатов конечно-элементных расчетов во внешний 3D формат для визуализации результатов конечно-элементных расчетов в стереорежиме с возможностью отображения сеточной геометрии и напряжений Мизеса в виде цветной заливки. Разработан стерео просмотрщик 3D моделей с реализацией метода анаглифов с использованием шейдеров. Проведены исследования влияния параметров сцены на наличие стереоэффекта на проекторе.

В статье [27] приведены отличительные особенности геометрических и физических характеристик геодезических куполов, изложены особенности их построения, а также преимущества и недостатки по сравнению с другими конструкциями покрытия. Рассмотрены актуальные вопросы и особенности расчёта куполов Фуллера.

В статье [28] рассматривается рациональность применения геодезических куполов в архитектуре. Описаны главные достоинства и недостатки, а также варианты материалов, используемых для каркаса сферического сооружения.

Мировой опыт строительства с древних времен показывает, что одной из эффективных форм пространственных конструкций являются купола. Они обладают рядом преимуществ, которые делают их уникальными архитектурными сооружениями: большой несущей способностью, и чем больше купол, тем они выше. В статье [29] рассмотрены некоторые примеры купольного строительства, их особенности, а также предпосылки их строительства.

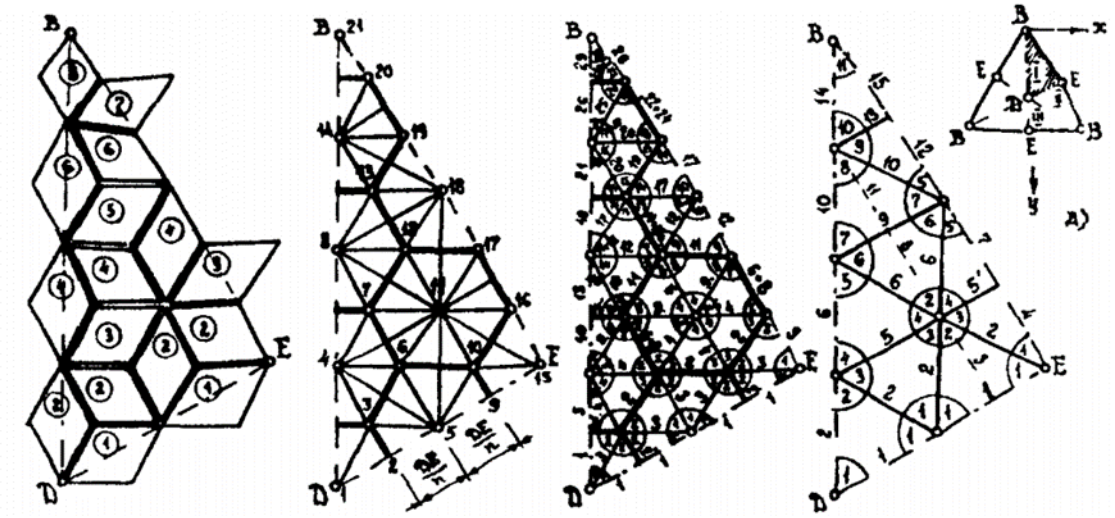
В статье [30] излагается методика решения задачи условной оптимизации сетчатых деревянных куполов по критерию стоимости. Получены оптимальные параметры купола с ребрами из древесины. Рассмотрено применение оптимизированной конструкции в качестве купольного покрытия кафе.

1.2.2. Обзор кандидатских и докторских диссертаций

Аварии строительных сооружений последних лет обязывают архитекторов и строителей обращать особое внимание на обеспечение достаточной прочности, устойчивости и живучести проектируемых объектов. Одним из путей достижения этой цели является применение достаточно изученных и апробированных в строительной практике конструкционных элементов. К таким элементам из класса покрытий оболочечного типа следует отнести сферические, в частности геодезические, купола и оболочки.

Диссертационная работа [32] является первым системным обобщением всего предшествующего опыта архитектурного проектирования геодезических куполов и оболочек. Наряду с обобщением работ предшественников, вошедших в классификационные системы «С», «Р» и «И», автором разработаны и исследованы две новые системы сетевых разбивок- «П» и «ПР». Все задачи, входящие в исследование, впервые решены в общем виде, они дают возможность эффективно использовать персональные компьютеры на всех стадиях разработки архитектурных проектов зданий с покрытиями в виде оболочек Результаты исследования позволяют получать виртуальные модели оболочек и включать их в виде библиотечных элементов в существующие системы автоматизированного архитектурно-строительного проектирования.

Например, сетевые разбивки системы «С». Алгоритм разбивки исходит из разбивки линии DE на равное число отрезков. На рисунке 1.2 приведен пример построения обобщённой расчётной схемы сетевой разбивки системы «С» при делении DE на 4 части.



а) б) в) г)

Рисунок 1.2 – Обобщенная расчетная схема сетевых разбивок системы «С»: а - расположение ромбовидных элементов купола в пределах треугольника Шварца; б - основная расчётная схема сети с нумерацией узловых точек; в - маркировка параметров сети подсистемы «С1»; г - маркировка параметров сети подсистемы «С2»; д - номера треугольников Шварца в пределах треугольника Мёбиуса.

Результаты исследования, доведённые до компьютерных программ, устраняют ряд существенных факторов, препятствующих практическому использованию куполов и оболочек в архитектурном проектировании. При этом предоставляется возможность не только получать геометрические параметры сетей для любого вида геодезической оболочки, но и проектировать здания и сооружения с покрытиями оболочечного типа средствами современных систем САПР.

В работе [33] на основании теоретических и численных исследований была разработана методика, позволяющая определить расход материала на все элементы каркаса сетчатых куполов, в ее основе лежат зависимости показателей массы от параметров проектирования, а также от силовых воздействий. Также были определены оптимальные геометрические и весовые характеристики для куполов различного диаметра и системы разбивки на основе аналитических зависимостей. Полученные результаты использовались в строительстве по всей

стране, например, Республиканским проектно-технологическим трестом по механизации животноводческих ферм "Росагропроморгмехмонтаж" (Краснодарский Филиал) проекта производства работ на монтаж универсального склада башенного типа диаметром 18 м С 1987 г, при организации строительства опытных и серийных круглых зданий сельскохозяйственного назначения Ставропольской СПМК, Саратовской СПМК, Нижегородской СПМК, Мордовской СПМК, Костромской СПМК, Гулькевичской СПМК, Нижнекамской СПМК треста "Центр элеватор спец монтаж" (всего построено более 3000 круглых зданий диаметром 18 м, 5 зданий диаметром 24 м и 2 здания диаметром 36 м, при этом, подтвержденный актами экономический эффект в ценах 1984 г составил 3 млн. 269 тыс. рублей.

В своей работе Тур А.В. [34] приводит исследование в области изучения работы узлов сетчатых куполов, и узла, разработанного им самим. При аналитическом подходе и компьютерном моделировании были получены данные, которые подтверждены экспериментом со металлическим узлом реальной величины. Эксперименты показали, что узел имеет некоторую податливость, которая существенно влияет на работу всей системы в целом, а также были рассмотрены несколько типов крепежных элементов, которые в свою очередь оказывают влияние на работу стержней, это доказывает гипотезу о том, что используемая сейчас методика расчета, никак не принимающая во внимание податливость узлов отчасти некорректна, хоть и дает результаты с запасом по несущей способности. Также была разработана методика оптимизации геометрических характеристик купола и экономически выгодного распределения материалов в конструкции.

Работа [35] проведена в соответствии с перспективными направлениями развития науки: «Приоритетные направления развития Национального исследовательского университета «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (ПНР-1) – «Энергосбережение и новые материалы» на 2010-2019 г.г.; программой партии Единая Россия «Развитие парков малых городов России».

На основе разработанных алгоритмов написана и отлажена комплексная методика для ПЭВМ по расчету параметров стальных и деревянных куполов-оболочек из каркасных плоских или пирамидальных панелей; однослойных и двухслойных куполов-оболочек из укрупненных монтажных панелей с неполным каркасом; сборных сферических оболочек из укрупненных пирамидальных блоков составных структурных покрытий.

На основе проведенных исследований разработаны рекомендации по расчету и конструированию сферических куполов из панелей. Результаты научных исследований нашли применение при проектировании двух экспериментальных купольных покрытий в г. Саранске, результаты исследований используются также в проектировании объектов в проектных институтах г. Саранска и г. Москвы, а также в учебном процессе архитектурно-строительного факультета МГУ им. Н.П. Огарева.

1.2.3. Обзор иностранных статей

В работе [36] предложена модель, которая на начальном этапе проектирования позволяет определить не только стоимость конструкции, но и ее экологичность, и это благодаря учету характеристик полужестких узловых соединений. В данном исследовании дан сравнительный анализ рам с разными типами закреплений. Использование полужестких узлов и верный их учет в проекте позволяет значительно снизит стоимость всего объекта строительства.

Вопросом определения выгоды использования полужестких узлов задались Jaakko Haapio и Markku Heinisuo. В их исследовании [36, 37] говорится, что практическая экономия металлоемкости может достигать для болтовых соединений 14% и 30% по сравнению с жесткими и шарнирными узлами соответственно. Такая экономия достигается за счет действительного восприятия момента. В плане экономии сварные полужесткие соединения имеют огромный потенциал и могут, в отличие от болтовых, максимально приблизиться к экономии в 33% и 100%, это в теории, по сравнению с жесткими и шарнирными

узлами. Так получается из-за ограниченности форм-фактора сортамента болтов, когда сортамент пластин с их толщинами имеет огромную базу.

В работе [38] применялся анализ конечных элементов для изучения устойчивости сферических, толстостенных куполов, в которых наблюдаются большие деформации. Были обозначены три энергетических состояния - моностабильное, бистабильное и псевдо-бистабильное, которые однозначно характеризуют поведение купола во время деформации. Разработано эмпирическое соотношение с помощью метода конечных элементов, соединяющее устойчивость купола с соответствующими геометрическими параметрами: такими как высота, длина и толщина, достоверность полученных результатов проверялась экспериментально. Используя это соотношение, подобные купола могут быть запроектированы на с учетом характеристик стабильности.

В то время как сетчатые купола (то есть купола, состоящие из стержней) в целом очень эффективны с точки зрения материалов, геодезический купол, как утверждает его патентообладатель Ричард Бакминстер Фуллер, является лучшим. Недавние исследования оптимальной конструкции сетчатых куполов не позволяют проводить прямое сравнение между геодезическим куполом и другими типами куполов, поскольку тестовые примеры не подвергаются одинаковым нагрузкам. Цель данной статьи [39] - определить, какой тип сетчатого купола лучше с точки зрения эффективности использования материала, путем сравнения минимального веса куполов различных типов с учетом напряжений и ограничений продольного изгиба. В исследование включены полусферические купола Шведлера, Кевитта и геодезические купола диаметром 16 м и гравитационной нагрузкой 2 кНм−2. Полное перечисление используется для оптимизации дискретных переменных (количество колец, подразделений вдоль каждого кольца, …), в то время как алгоритм на основе градиента используется для непрерывных переменных (разделы-члены). Результаты показывают, что утверждение о равномерном напряжении в геодезическом куполе правомерно: если всем элементам назначен одинаковый размер, геодезический купол, как

правило, более равномерно нагружен и на 28% легче, чем другие типы куполов аналогичного размера. Однако, если размеры всех элементов индивидуальны, купол Шведлера будет самым легким.

Метод дискретных элементов в работе [39] (MDEM- модифицированный метод дискретных элементов) используется для исследования статических и динамических характеристик рамы с полужесткими узлами. В MDEM структуры дискредитируются в набор конечных жестких частиц. MDEM способен естественным образом справляться с структурной геометрической нелинейностью и разрушением. В то же время вычислительная структура статического анализа согласуется с вычислительной структурой динамического анализа. Мнимый пружинный элемент с двумя частицами, но без фактического массы и его длина используются для моделирования механического поведения полужестких узлов. Четырехпараметрическая модель и независимая модель упрочнения дополнительно введены соответственно для точного учета характеристик нелинейности и гистерезиса полужестких соединений. Сравнение статических и динамических ответов, полученных с использованием модифицированного MDEM и исследования, показывают, что модифицированный MDEM может имитировать механическое поведение полужестких соединений и напрямую и может эффективно показывать линейное и нелинейное поведение полужестких связей при статическом и динамическом нагружении. Некоторые результаты, как и ожидалось, показывают, что несущая способность конструкции при статической нагрузке будет завышена при игнорировании полужестких соединений; когда частота динамических нагрузок близка к основной частоте, гистерезисное затухание нелинейных полужестких соединений может вызывать диссипацию энергии по сравнению с жесткими и линейными полужесткими соединениями, избегая возникновения резонанса. В итоге можно сказать, что рамы с податливыми соединениями менее подвержены разрушению, нежели аналогичные с жесткими узлами.

В статье [40], сообщается о попытке оценить влияние уточнения геодезической купольной сетки на критическую несущую способность

конструкции. Начальной поверхностью геодезических куполов является сфера, разделенная на сферические треугольники. Последовательное деление сферических треугольников решает уточнение сетки геодезических куполов. Были рассмотрены две вычислительные модели 3V и 4V (V-это частота триангуляции купола т.е. высота купола разбивается на 3 или 4 ряда). Для купола 4V были рассмотрены два типа конструкции, а именно: ферменная и каркасная. Для системы с рамой 4V значения критической несущей способности были определены для трех длин перегиба стержней μ (μ-коэффициент привидения длины стержня): 0,5, 0,7 и 1,0.

В статье [41] охарактеризовано поведение стального геодезического купольного узла, оптимизированного с точки зрения его сборки. Это соединение внахлест с одним болтом, где трубчатые элементы сплющиваются и дополнительно изгибаются для получения необходимой конфигурации купола. Результаты, полученные с помощью оригинальных лабораторных испытаний и численного анализа, сравниваются с аналитическими значениями, определенными с помощью упрощенных выражений для расчета сопротивления поперечного сечения, то есть для определения режима отказа. Рекомендуется конструктивное решение, чтобы улучшить поведение соединения купола и оптимизировать конструкцию в целом.

1.3. Краткие сведения о строительстве в условиях Крайнего Севера

Строительство городов в условиях Крайнего Севера является сложной работой. Холодным и северным, непригодным для жилья регионом Земли является Арктика с территорией более 30 млн кв. км.

С участием России, в настоящее время в этом регионе, работает большое количество международных экспедиций, а также полярные станции и радиометцентры. Многие государства проявляют готовность участвовать в освоении Арктики, из-за возможности использования природных ископаемых на огромной территории. В этой связи создание компактного комфортного жилья на этих территориях является одной из сложных и приоритетных задач [12].

На Крайнем Севере есть несколько городов, а население живет в общинах, поэтому он является самым малонаселенным регионом. Для того чтобы жители чувствовали перспективы экономического развития, необходимо осуществлять строительство как жилых, так социальных, культурных и административных объектов.

Для Арктической зоны характерны экстремальные климатические условия: отрицательная среднегодовая температура, полярные ночи, сильные ветры и метели [12]. Конструкция здания должна быть без температурных мостиков, через которые тепло мгновенно выходит из помещения.

Одним из решений выше обозначенных проблем в жилищном строительстве является геодезический купол (рисунок 1.3), который имеет ряд преимуществ:

- купол является наиболее эффективной формой здания при ветровых и снеговых нагрузках, что было доказано во время смерчей и ураганов;
- купол имеет наибольший объём при наименьшей площади поверхности;
- минимальны материалоемкость, трудоемкость и сроки возведения купола;
- меньше тепла поглощается летом, соответственно, снижаются (до 40%) расходы на обогрев и кондиционирование. А также через маленькую площадь поверхности проникает меньше звуков, что делает жизнь под куполом комфортнее;
- купольные конструкции намного легче, чем обычные прямоугольные здания, поэтому для них не нужен сложный фундамент.

Но на ровне с плюсами геодезических куполов также имеются и минусы данных построек:

- сложность расчетов. Геодезический купол нельзя рассчитывать только в двух плоскостях. Необходимо иметь познания в программах 3D-графики;
- это достаточно новый способ возведения зданий, поэтому нюансы и тонкости сооружения купольных конструкций не описаны в классической литературе по строительству и с ними не сталкиваются опытные строители в повседневной практике.

Рисунок 1.3 – Купол над домом

Выводы по первой главе

В данной главе были изучены история и литературы по проектированию и расчету сетчатых геодезических куполов.

В ходе анализа отечественной и зарубежной литературы по теме напряженно-деформированное состояние геодезических куполов и их применения при проектировании и новом строительстве в настоящее время выявлено, что в последние годы тема геодезических куполов изучена и раскрыта, однако расчет, проектирования и применения таких куполов в условиях Крайнего Севера а также влияние разных нагрузок (например, температурно-климатические нагрузки) на конструкции купола не проработана и исследована, что открывает много путей для научной работы.

Сведения о сетчатых геодезических куполах имеются в работах В.В. Горев, Г.Н. Павлов, И.В. Молев, А.В. Тур, И.В. ТУР, В.А. Савельев, А.С. Дзюба, М.Ю. Клименко, Д.А. Животов, А.А. Фалилеева, А.Е. Чернявская, А.Н. Романович, А.А. Есипов, И.В. Кашина, Б.В. Миряев и др.

Результаты исследований указанных авторов, а также сравнительно небольшой опыт практического проектирования и расчет геодезических куполов, являются исходной базой данного исследования.

Глава 2. Анализ существующих методов и программных комплексов

2.1. Геодезические купола. Особенности применения и расчёта

До середины XX века во всём мире широкое распространение имели ребристо-кольцевые купола. В таких конструкциях, как известно, с увеличением пролёта перекрываемого пространства возрастает число типов составляющих элементов, что является очевидным недостатком. По этой причине, а также вследствие поиска инновационных архитектурных форм и решений, была предложена новая модель несущей пространственной конструкции покрытия – геодезический купол.

В отличие от привычных куполов, запроектированных путём меридиально-кольцевого членения осесимметричных поверхностей, построение сферической оболочки геодезического купола основано на векторном разбиении пространства, т. е. разбивка на элементы производится по геодезическим линиям - радиусам [42]. Преимуществом такого способа является значительное уменьшение количества типов элементов конструкции. Кроме того, геодезические сети визуально сохраняют свойство равногранности исходных многогранников, что улучшает эстетические характеристики куполов и вносит разнообразие в стилистику покрытий.

Геодезический купол, также известный как купол Фуллера, является сферической конструкцией. Как известно, прочность сферы обеспечена равномерным распределением нагрузок на все точки поверхности. По этой причине геодезические купола хорошо воспринимают несимметричные нагрузки, в особенности снеговые и ветровые, обладают высокой аэродинамикой, обладают повышенной жесткостью и устойчивостью. Стоит отметить, что чем больше диаметр сферы, тем больше его несущая способность, а прочность такого купола мало зависит от используемых строительных материалов.

К преимуществам купола Фуллера стоит также отнести сравнительную лёгкость конструкции. Это обеспечивается тем, что сфера имеет наибольший объём при наименьшей площади поверхности.

В настоящее время геодезические купола находят широкое применение в частном домостроении. Вызвано это не только описанными выше преимуществами, но и высокой энергоэффективностью таких зданий. Ведь при одинаковой с прямоугольным в плане зданием полезной площади, купол имеет меньший внутренний объём, что минимизирует затраты на отопление.

Так почему же, имея такие неоспоримые преимущества, проектирование и строительство геодезических куполов не получило широкое распространение в РФ? Дело в том, что геодезические купола представляют собой пространные фермы с большим общим числом элементов конструкции, что соответственно влечёт за собой трудоёмкие математические расчёты. По этой причине данный вид конструкций получил распространение только в странах с развитой базой специализированных программ, а также с высоким уровнем строительных технологий. Данное обстоятельство, несомненно, сдерживало применение в строительстве большепролетных оболочек с геодезической разбивкой [27].

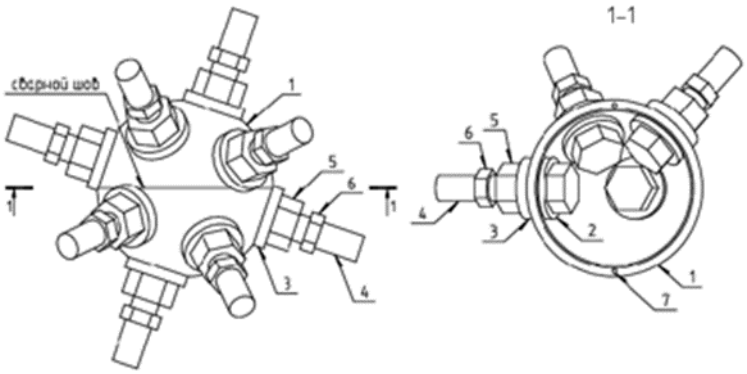
В настоящее время ситуация изменилась – развитие САПР позволяет запроектировать и произвести расчёт всех элементов геодезических куполов. В РФ для их проектирования и расчёта используются такие эффективные программные комплексы, как: ArchiCAD, AutoCAD, 3D MAX, Компас, ALPLAN, Лира, SCAD, ANSYS, Sofistik, Rotate, SolidWorks, САПФИР 3D и другие.

На данный момент существует несколько основных типов расчёта на прочность куполов Фуллера: приближённый аналитический расчёт, численный расчёт на универсальных программах прочностного расчёта, а также численный расчет на специализированных компьютерных программах, ориентированных на определение напряженно-деформированного состояния геодезических оболочек [43]. При расчёте сферической оболочки следует обратить внимание на то, что необходимо иметь полную совокупность данных о геометрии разбивок по всем видам сетей в диапазоне практически приемлемых типов.

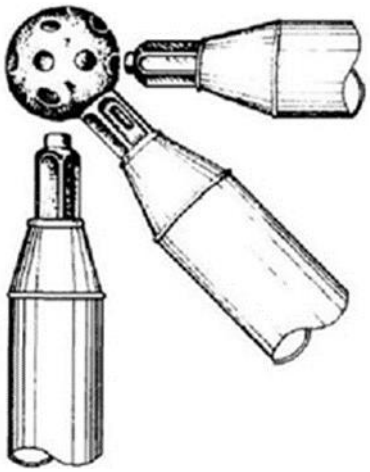
При проектировании и строительстве геодезических куполов может возникнуть ряд сложностей. Так, например, тонкости и нюансы расчёта и монтажа геодезических оболочек не описаны в классической строительной

литературе, что, бесспорно, затрудняет работу над проектом. К тому же строительство здания с геодезическим покрытием требует применения нестандартных, специально изготовленных элементов - окон, дверей, пожарных лестниц, что приводит к удорожанию проекта.

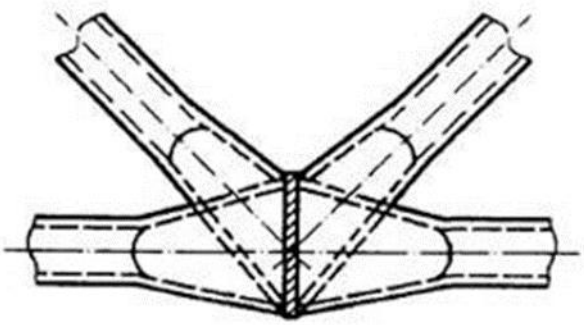
Узлы сетчатых геодезических куполов имеют разные формы заделки от жестких до шарнирных. Несколько вариантов узловых соединений приведены на рисунках 2.1, 2.2 и 2.3).



а)



б)



в)

Рисунок 2.1 – Типы узлов соединения сетчатых куполов: а - тип «БрГТУ»; б – тип «Меро»; в – тип ЦНИИПСК.

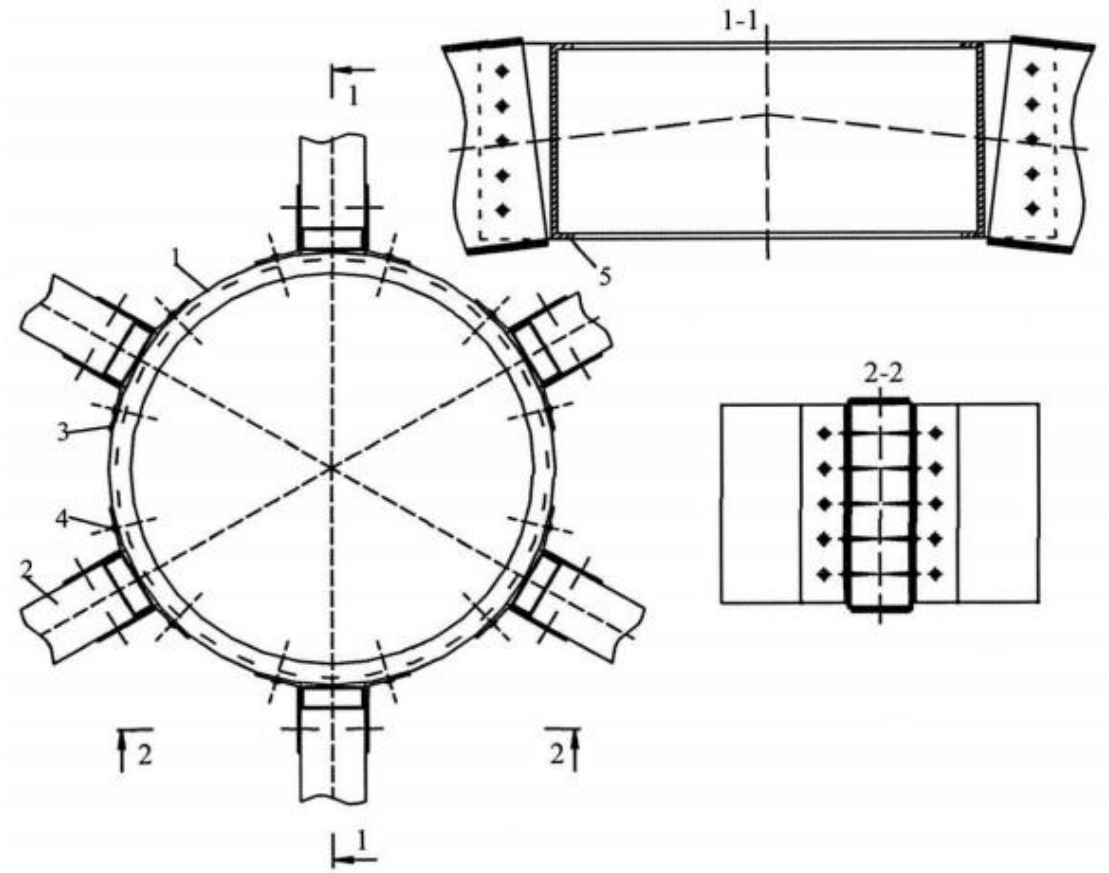


Рисунок 2.2 – Узловое соединение сетчатого купола:

1 - стальной цилиндр; 2 - стержневые элементы; 3 - развальцованные уголки;

4 - крепежные элементы; 5 - ребра жесткости

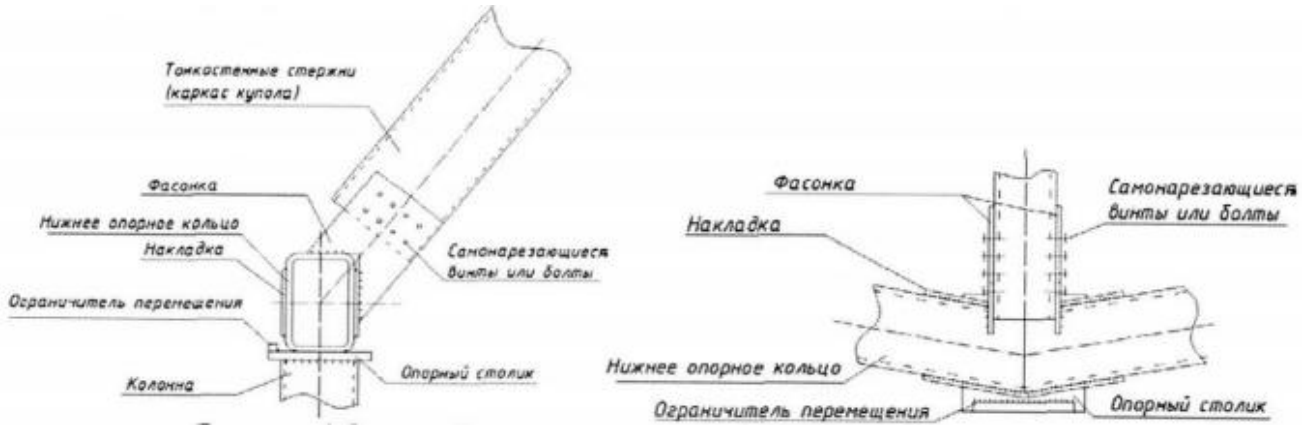


Рисунок 2.3 – Опорный узел купола, слева-вид сбоку, справа-вид сверху

Следует отметить, что геодезические купола имеют большое количество преимуществ перед другими видами несущих конструкций покрытия. В то время как описанные выше недостатки свойственны всем инновационным проектам, и изменить эту ситуацию возможно только приобретая опыт конструирования куполов Фуллера.

2.2. Существующие методы расчета НДС сетчатых геодезических куполов

Расчет таких конструкций непростая задача, поэтому с прошлого века создаются программы и автоматизированные алгоритмы расчета, которые облегчают проектирование. Известны два подхода к расчету сетчатых куполов:

1. Сетчатый купол рассматривают как дискретную стержневую систему и рассчитывают известными методами строительной механики пространственных стержневых систем. Этот подход реализуют с помощью ПЭВМ (персональная электронно-вычислительная машина) и использованием программ статического расчета пространственных систем, таких как «ЛИРА-САПР», «SCAD Office» и др. [31].

2. Сетчатый купол рассматривают, как сплошную осесимметричную оболочку, поскольку он имеет сходство со сплошной оболочкой. На основании этого заменяют сетчатую конструкцию сплошной оболочкой, проводят расчет по безмоментной теории затем осуществляют обратный переход к усилиям в дискретной системе. При этом определяют жесткостные свойства эквивалентной сплошной оболочки, имеющей ту же прочность на растяжение, изгиб и кручение, что и заданная сетчатая система. Перемещения точек сплошной оболочки совпадают с перемещениями ее узлов. Переход от полученных напряжений в сплошной оболочке к усилиям в стержневой сетчатой системе основывается на условиях статического равновесия [44].

В истории внедрения в проектирование геодезических куполов средств автоматизации расчётов можно выделить три характерных стадии.

В ранний период применения геодезических куполов расчёт геометрических параметров сетевых разбивок вёлся ручным способом, координаты узловых точек сети наносились вручную на ватман и построенные точки соединялись отрезками прямых. Получившийся каркасный чертёж сетевой разбивки оценивался архитектором с его профессиональной точки зрения и после принятия им решения изготавливалась точная модель в некотором масштабе. Архитектурное решение

отрабатывалось с помощью моделей. В этот период проектировались и возводились только малопролётные купола.

После появления компьютеров стало возможным автоматизировать геометрический расчёт параметров купола. Эту стадию можно назвать первой ступенью автоматизации проектирования геодезических куполов. Параметры сетей (координаты узловых точек и размеры ячеек) вычислялись на компьютерах, но чертежи их по-прежнему вычерчивались вручную на миллиметровой бумаге или ватмане, и также по-прежнему архитектурно-композиционные вопросы решались путём изготовления трудоёмких натурных моделей оболочек.

Вторая ступень автоматизации началась с появления программ расчёта для ЭВМ и с выводом графической информации на плоттерах, когда стало возможным автоматизировать наиболее трудоёмкую стадию в проектировании оболочек. При этом архитекторы могли получать машинные чертежи сетевых разбивок и параметры сетей с любым числом ячеек. У них впервые появились условия для проектирования большепролетных куполов.

Какова стала методика работы архитектора на второй ступени автоматизации при поиске архитектурного образа купола? Получив машинный чертёж сетевой разбивки в виде каркасного рисунка, проектировщик выдели необходимую часть чертежа и искал приемлемую композицию купольного здания, применяя те же традиционные операции, что и раньше - пририсовывая вручную архитектурные детали - входные узлы, козырьки, оконные и дверные проёмы, фонарные надстройки и пр. Такая технология проектирования оболочек при создании проектов зданий (рисунок 2.4) являлась основной вплоть до недавнего времени.

Рисунок 2.4 – Примеры разработка эскизных вариантов куполов с помощью машинных чертежей

В настоящее время мы находимся на пороге третьей ступени автоматизации проектирования оболочек - получения не только каркасных чертежей сетевых разбивок, но и получения визуализированных видов сетевых разбивок в составе проектируемого сооружения.

Визуализированная сетевая разбивка - это не каркасный рисунок, а почти фотоизображение нужного архитектору фрагмента оболочки, созданное с учётом её материала и цвета, с учётом условий освещения её в заданном климатическом районе и в нужном ракурсе (рисунок 2.5).

Рисунок 2.5 – Визуализированные изображения геодезических оболочек

2.3. Существующие программные комплексы, основанные на МКЭ

Метод конечных элементов (МКЭ) – это метод приближённого численного решения физических задач. В его основе лежат две главные идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций [45, 46].

Быстрому росту популярности МКЭ и становлению его ведущим методом численного решения физических задач способствовал ряд преимуществ конечно-элементного анализа перед многими другими численными методами.

Основная идея МКЭ – аппроксимация сплошной среды с бесконечным числом точек и степеней свободы совокупностью элементов, конечно, малого размера, связанных между собой в узлах [45, 46, 47, 48] (рисунок 2.6).

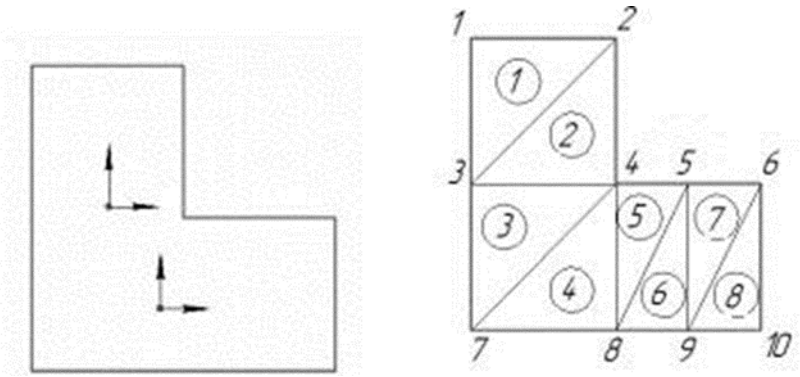


Рисунок 2.6 – Тело до и после разбивки на конечные элементы

Расчет конструкции на прочность при помощи МКЭ включает следующие этапы:

1. Построение геометрической модели и ее формирование сетки конечных элементов (КЭ). Определение действующих нагрузок и граничных условий. Формирование конечно-элементной модели.
2. Расчет для каждого КЭ матрицы жесткости и вектора внешней нагрузки, которая приведена к узлам.
3. Составление разрешающей системы линейных уравнений.
4. Получение решения данной системы, определение перемещений, деформаций и напряжений.
5. Анализ полученных результатов, выводы, рекомендации.

Быстрое развитие программного обеспечения даёт возможность людям создавать компьютерные модели всё более сложных конструкций. За счет применения новых технологий в проектировании зданий и сооружений увеличивается область применения теоретических исследований конструкционных материалов, которые проводились российскими и советскими учеными в конце прошлого века. Большое количество современных программных комплексов используют математические методы моделирования и анализа состояния конструкций. Одним из самых популярных является метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет значительно уменьшить время на расчет модели любого уровня сложности, в сравнении с традиционным счетом [49]. Сейчас вычислительная мощность среднего компьютера может быть достаточной

для проведения анализа модели зданий или сооружения, что упрощает процесс обучения и непосредственно самого проектирования. Однако, при моделировании анизотропия и нелинейные свойства материалов редко учитываются, поэтому анализ в основном проводится с использованием упрощенных физических моделей. Возникает потребность в учете всех свойств конструкции или материала, чтобы максимально приблизить условия компьютерного моделирования к реальным условиям работы. В наше время создается большое количество программных комплексов, предлагающих свои мощности для решения данной проблемы учёта всех свойств объекта исследования. Можно выделить наиболее известные и востребованные как зарубежных, так и отечественных разработчиков: ANSYS, Sofistik, SCAD Office, «ЛИРА-САПР», Robot и т. д. Для этого исследования было принято решение по применению именно комплекса «ЛИРА-САПР».

ЛИРА-САПР – программный комплекс, предназначенный для численного исследования прочности и устойчивости конструкций, а также их автоматизированного проектирования. Его разработка и дальнейшее совершенствование ведется с учетом интеграции в технологическую линию проектирования с учетом BIM-технологий.

Программа ЛИРА-САПР - это уникальный продукт в сфере проектирования строительных объектов и конструкций, в сфере компьютерного моделирования жизненного цикла строительных объектов, в сфере численного исследования конструкций. Самая первая версия программы была выпущена в далеком 1963-м году. Уже тогда для ее реализации были отобраны наиболее актуальные теоретические и расчетные методы. В процессе развития расчетная программа ЛИРА-САПР впитала в себя все самые передовые идеи в области информатики, теории сооружений и проектирования, которые прошли проверку временем. ПК семейства Лира-софт для профессионалов: за прошедшие годы на разных версиях ПК выросло не одно поколение инженеров-исследователей и проектировщиков. За истекшее время с помощью ПК ЛИРА-САПР было создано множество значимых сооружений и объектов.

Программные комплексы семейства ЛИРА имеют более чем 40-летнюю историю создания, развития и применения в научных исследованиях и практике проектирования конструкций. Программные комплексы семейства ЛИРА непрерывно совершенствуются и приспосабливаются к новым операционным системам и графическим средам. Новейшим представителем семейства ЛИРА является ПК ЛИРА-САПР 2016.

Кроме общего расчета модели объекта на все возможные виды статических нагрузок, температурных, деформационных и динамических воздействий (ветер с учетом пульсации, сейсмические воздействия и т.п.) ПК ЛИРА-САПР 2016 автоматизирует ряд процессов проектирования: определение расчетных сочетаний нагрузок и усилий, назначение конструктивных элементов, подбор и проверка сечений стальных и железобетонных конструкций с формированием эскизов рабочих чертежей колонн и балок.

ПК ЛИРА-САПР 2016 позволяет исследовать общую устойчивость рассчитываемой модели, проверить прочность сечений элементов по различным теориям разрушений. ПК ЛИРА-САПР 2016 предоставляет возможность производить расчеты объектов с учетом физической и геометрической нелинейностей, моделировать процесс возведения сооружения с учетом монтажа и демонтажа элементов.

ПК ЛИРА-САПР 2016 поддерживает информационную связь с такими системами как AutoCAD, ArchiCAD, Allplan, HyperSteeel, а также ПК МОНОМАХ-САПР, ФОК-ПК [50].

Ниже на рисунке 2.7 приведена расчетная схема геодезического купола построенного в среде ПК ЛИРА-САПР.

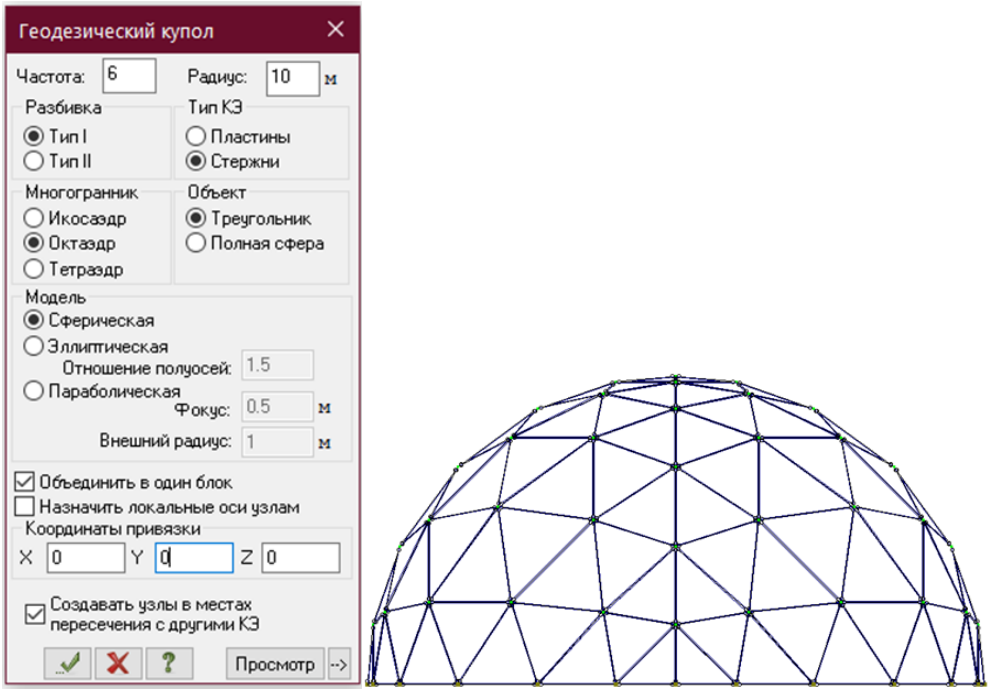


Рисунок 2.7 – Расчетная схема геодезического купола в среде ПК ЛИРА-САПР

Вычислительный комплекс SCAD реализован как интегрированная система прочностного анализа и проектирования конструкций на основе метода конечных элементов.

Единая графическая среда синтеза расчетной схемы и анализа результатов обеспечивает неограниченные возможности моделирования расчетных схем от самых простых до самых сложных конструкций, удовлетворяя потребностям опытных профессионалов и оставаясь при этом доступной для начинающих [51].

Высокопроизводительный процессор позволяет решать задачи большой размерности (сотни тысяч степеней свободы при статических и динамических воздействиях).

SCAD включает развитую библиотеку конечных элементов для моделирования стержневых, пластинчатых, твердотельных и комбинированных конструкций, модули анализа устойчивости, формирования расчетных сочетаний усилий, проверки напряженного состояния элементов конструкций по различным теориям прочности, определения усилий взаимодействия фрагмента с остальной конструкцией, вычисления усилий и перемещений от комбинаций загружений. В состав комплекса включены программы подбора арматуры в элементах

железобетонных конструкций и проверки сечений элементов металлоконструкций.

Система постоянно развивается, совершенствуются интерфейс пользователя и вычислительные возможности, включаются новые проектирующие компоненты.

Соответствие СНиП подтверждено сертификатом Госстроя России.

Вычислительные возможности:

- высокая скорость расчета;
- развитая библиотека конечных элементов;
- эффективные методы оптимизации матрицы жесткости.

Моделирование конструкций:

- развитые графические средства формирования и корректировки геометрии расчетных схем, описания физико-механических свойств материалов, задания условий опирания и примыкания, а также нагрузок;
- большой набор параметрических прототипов конструкций, включающий рамы, фермы, балочные ростверки, оболочки, поверхности вращения, аналитически заданные поверхности;
- автоматическая генерация произвольной сетки конечных элементов на плоскости;
- возможность формирования сложных расчетных моделей путем сборки из различных схем;
- широкий выбор средств графического контроля всех характеристик расчетной схемы;
- возможность работы на сетке разбивочных (координационных) осей;
- развитый механизм работы с группами узлов и элементов;
- формирование расчетной модели путем копирования всей схемы или ее фрагментов;
- импорт геометрии из систем ArchiCAD, HyperSteel, чтение данных в форматах DXF, DWG.

Проектирование:

– подбор арматуры в сечениях элементов железобетонных конструкций для стержневых и пластинчатых элементов по предельным состояниям первой и второй группы;
– проверка несущей способности и подбор сечений элементов стальных конструкций из прокатных профилей.

Обмен данными с другими программами:

SCAD обеспечивает обмен данными с другими программами используя:

– универсальные форматы (IFC, CIS/2, DXF, DWG);
– форматы данных программ Advance Steel (версии 2014, 2015, 2016), ANSYS, STAAD, Abacus, Femap, GMSH, NetGen;
– плагины для программ Revit (версии 2013, 2014,2015, 2016, 2017, 2018), ArchiCAD (версии 16,17,18, 19, 20), Tekla (версии 18 19 20 21, 2016, 2017).

В работе [53, 54] расчетные схемы сетчатого геодезического купола в ПК SCAD было решено приблизить к реальным конструкциям введением податливых вставок, которые будут выступать двойниками наиболее податливых элементов данного узла – высокопрочных болтов. Составлено 3 типа схем, в которых условия закрепления свободных концов (концов, противоположных тем, что сходятся в узле) одинаковы – шарнирно-неподвижные опоры, и 3 типа схем, где узел находится в системе – геодезическом куполе.

Ниже на рисунке 2.8 приведен один из этих типов схем. Схема с 5 стержнями, разбитыми на стержневые КЭ. Степень разбиения – 20 одинаковых по размеру КЭ составляют 1 стержень-трубу. В месте сопряжения стержней-труб имеется 4 шарнира на концах последних. Шарниры не ограничивают угол поворота в какой-либо плоскости, тем самым являются сферическими шарнирами.

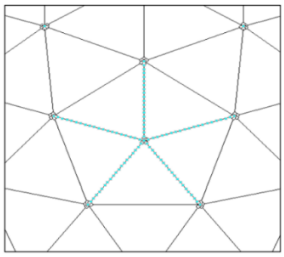


Рисунок 2.8 – Схема с 5 стержнями, разбитыми на стержневые КЭ в среде ПК SCAD.

Программа ANSYS является средством, с помощью которого создается компьютерная модель или обрабатывается CAD-модель конструкции, изделия или его составной части; прикладываются действующие усилия или другие проектные воздействия; исследуется отклики системы различной физической природы в виде распределений напряжений и температур, электромагнитных полей. Программа используется для оптимизации проектных разработок на ранних стадиях, что снижает стоимость продукции [52].

Одной из основных проблем конечно-элементного анализа является обоснование адекватности размера расчетной сетки. Программа ANSYS имеет в своем распоряжении средство оценки расчетной погрешности, обусловленной сеточной дискретизацией. Адаптивное построение сетки состоит в том, что после создания твердотельной модели и задания граничных условий система генерирует конечно-элементную сетку, выполняет расчет, оценивает ошибку за счет сеточной дискретизации и меняет размер сетки от решения к решению до тех пор, пока расчетная погрешность не станет меньше некоторой наперед заданной величины (или пока не будет достигнуто установленное число итераций).

Все функции, выполняемые программой ANSYS, объединены в группы, которые называются процессорами. Программа имеет один препроцессор, один процессор решения, два постпроцессора и несколько вспомогательных процессоров, включая оптимизатор. Препроцессор используется для создания конечно-элементной модели и выбора опций для выполнения процесса решения. Процессор решения используется для приложения нагрузок и граничных условий, а затем для определения отклика модели. С помощью постпроцессора пользователь обращается к результатам решения для оценки поведения расчетной модели, а также для проведения дополнительных вычислений, представляющих интерес. Таким образом, анализ, который проводится с помощью программы ANSYS, состоит из трех стадий: препроцессорная подготовка, получение решения и пост-процессорная обработка [49].

Ниже на рисунках 2.9, 2.10 и 2.11 приведены моделирование узла типа "БрГТУ". Геометрическое моделирование данного узла было выполнено в программе AutoCAD 2019.

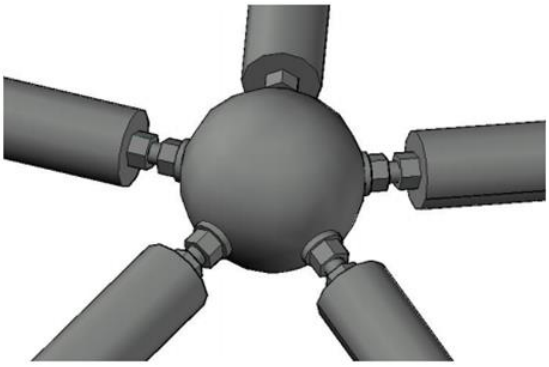


Рисунок 2.9 – 3D модель в среде AutoCAD 2019

Затем полученная модель узла импортируется в собственную среду Ansys для подготовки моделей – SpaceClaim (рисунок 2.10).

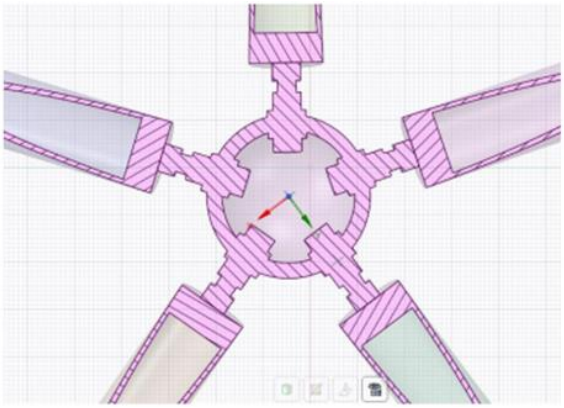


Рисунок 2.10 – Горизонтальный разрез 3D модели в среде SpaceClaim

После выполнения всех проверок модель готова к переводу в следующую среду разработки Ansys – Mechanical. Задавался материалы для элементов. Трубы и их составные детали из стали 09Г2С, высокопрочные болты из стали 40Х, а толстостенная сфера из стали С345. После этого все тела разбивался на сетку конечных элементов, подбирался оптимальный размер конечных элементов и их количество. Для рационального разбиения было определено области, в которых размер КЭ задавался индивидуально. Сфера и болты – размер КЭ = 7 мм, трубы и их составляющие – 18 мм, также сетка была сгущена в местах контакта – торцах труб 8 мм (рисунок 2.11).

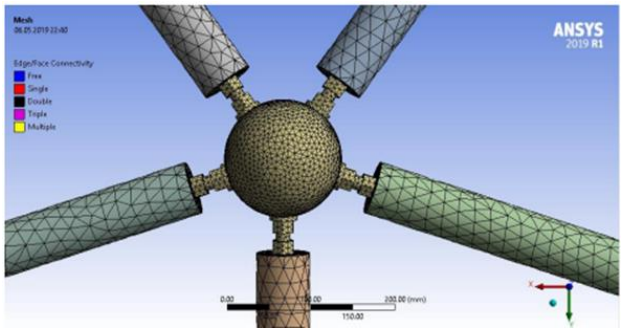


Рисунок 2.11 – Модель, разбитая на сетку конечных элементов в среде ANSYS

Autodesk Robot Structural Analysis Professional (далее - Robot) представляет собой комплексную программу для моделирования, расчета и проектирования различных видов строительных конструкций. Программа позволяет создавать модель конструкции, выполнять статический расчет конструкции, проверять полученные результаты, осуществлять расчеты элементов конструкций по нормам, а также готовить документацию по результатам расчета и проектирования конструкции [55].

Основные возможности программного продукта Robot:

- расчеты конструкций: линейные, нелинейные и динамические (модальный, спектральный, сейсмический, интегрирование уравнений движения, расчет предельного равновесия (push-over), расчет P-Delta, пластический, деформации изгиба);
- работа в многоязычной среде (независимый набор из 15 языков пользовательского интерфейса, региональных настроек и отчетов по результатам расчетов);
- работа в многонациональной среде - проектирование в соответствии с требованиями более 50 стандартов;
- рамы, пластины и оболочки, а также эффективное моделирование и генерация сеток конечных элементов (КЭ) на основе пользовательского графического интерфейса, который позволяет создать конструкцию любой формы и параметров и провести расчет с учетом реальной геометрии конструкции;

– высокое качество двусторонней связи с Autodesk Revit (Autodesk Revit Structure), AutoCAD Structural Detailing и использование форматов IFC, CIS2 и т.д.;
– API, позволяющий пользователю создавать свои собственные приложения, которые взаимодействуют с моделированием конструкций, процессом расчетов и получением результатов.

Ниже на рисунке 2.12 приведен общий вид конструкций купола построенного в среде Autodesk Robot.

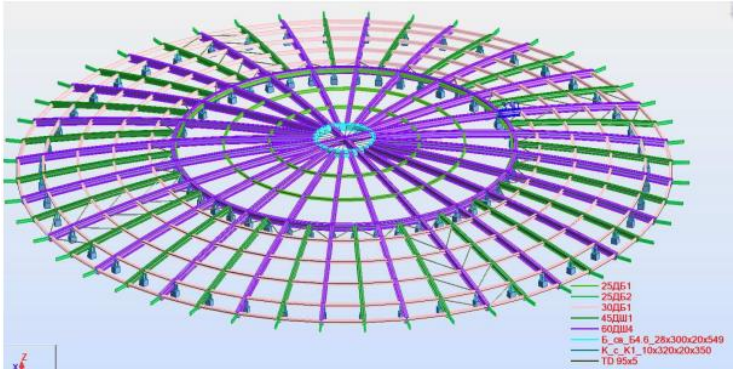


Рисунок 2.12 – Общий вид конструкций купола в среде Autodesk Robot

SOFiSTiK - это многофункциональный рабочий инструмент, предназначенный для МКЭ-анализа строительных конструкций и обеспечивающий возможность выполнения полного перечня задач в строительном проектировании. Функционал этого ПК дает возможность высчитывать НДС компонентов конструкций проектируемых сооружений, определять подходящий вид армирования, оптимизировать сечения элементов из металла, проводить геотехнический анализ, CFD-анализ динамических воздействий ветра, расчеты теплотехнических показателей и т. д.

Особое внимание специалистов обращаем на то, что ПК SOFiSTiK сертифицирован на соответствие строительным нормам РФ, имеет интерфейс и документацию на русском языке. Благодаря 100% совместимости ПК SOFiSTiK с моделями конструкций в формате Revit, все данные о топологии конструкции, сечениях элементов, нагрузках, граничных условиях передаются в КЭ-модели SOFiSTiK [56].

Универсальный комплекс SOFiSTiK обладает следующими функциональными возможностями:

- Проектирование зданий. Программа обладает различными инструментами анализа всевозможных конструкций, моделируя статическую и динамическую нагрузку. Также производится расчет модели «грунт-сооружение»;
- Проектирование тоннелей и геотехнический анализ: создание трехмерных моделей, моделирование нагрузки и управление стадиями проектирования;
- Расчет стальных конструкций. Кроме линейного анализа, данные инструменты работают с физической и геометрической нелинейностью в моделях конструкций;
- Проектирование мостовых конструкций, комплексный анализ мостов любого типа, изготовленных из разных материалов;
- Сейсмический анализ;
- Ветровая нагрузка с расчетом давления на любые поверхности;
- Проектирование свайных фундаментов, работа как с плоскими, так и с объемными моделями.

Выводы по второй главе

В данной работе рассмотрим первый подход расчета сетчатых куполов. Расчет будем выполнять с помощью проектно – вычислительного комплекса «ЛИРА-САПР 2016 R5». Потому что возможности Лиры позволяют нам справится с поставленными задачами исследования. Комплекс реализует конечно – элементное моделирование статических и динамических расчетных схем, проверку устойчивости, выбор невыгодных сочетаний усилий, проверку несущей способности конструкций.

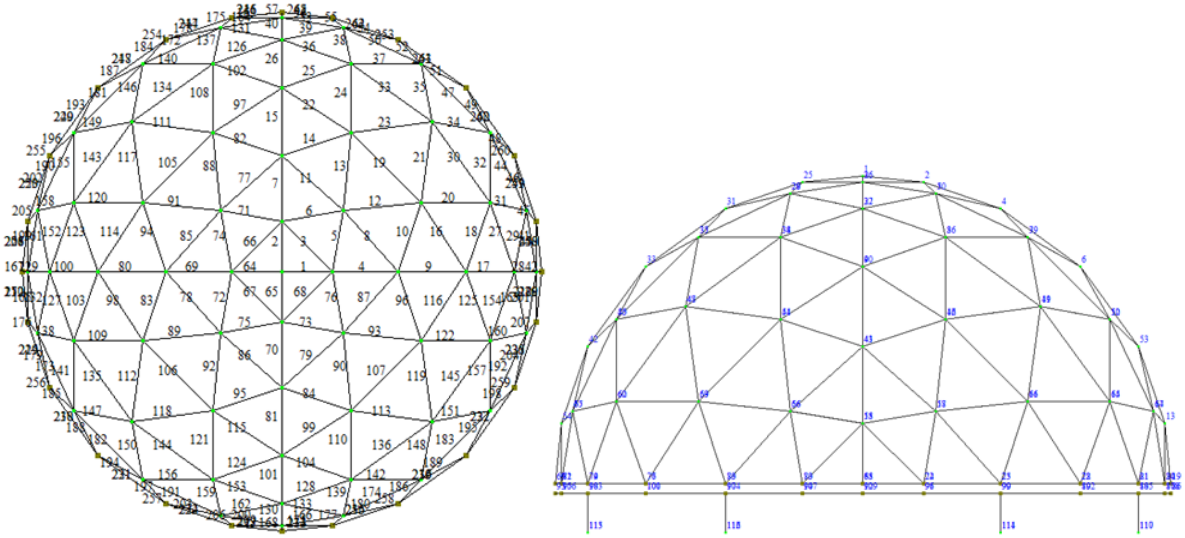
В основе расчета положен метод конечных элементов с использованием в качестве основных неизвестных перемещений и поворотов узлов расчетной схемы. В связи с этим идеализация конструкции выполнена в форме,

приспособленной к использованию этого метода, а именно: система представлена в виде набор тел стандартного типа (стержней, пластин, оболочек и т.д.), называемых конечными элементами и присоединения к узлам.

Глава 3. Исследование и результаты

3.1. Описание объекта

В работе в качестве расчетной модели рассматривался пространственная стержневая модель с шарнирным соединением элементов. Купол – сетчатый геодезический, с частотой разбивки 6V (V-это частота триангуляции купола т.е. высота купола разбивается на 6 рядов), диаметр – 20 м, стрела подъема – 10 м. Разбивку сетки, основанную на фигуре – икосаэдр (рисунок 3.1, 3.2).



а) б)

Рисунок 3.1 – Виды купола покрытия: а - вид сверху; б - вид сбоку

Рисунок 3.2 – Дом под куполом

3.2. Сбор нагрузок на геодезический купол

Нагрузки и воздействия представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Нагрузки и воздействия

№п/п	Наименование	Нормативная нагрузка кН/м^2 и °С	Коэф. надеж. по нагрузке	Расчетная нагрузка кН/м^2 и °С
1	2	3	4	5
	А. Постоянное			
1	Стеклопакет t=12мм ρ=2500 кг/м3	0.3	1.2	0.36
	Б. Временное			
2	Снеговая нагрузка S_o на 1 м^2 горизонтальной проекции	0.85	1.4	1.19
3	Ветровая с наветренной стороны	0.22	1.4	0.31
4	Ветровая с подветренной стороны	-0.14	1.4	-0.20
5	Ветровая с верхней стороны	-0.36	1.4	-0.50
	В. Температурно-климатические воздействия			
6	Средняя температура Δt_w в теплое время года	26	1.1	28.6
7	Средняя температура Δt_c в холодное время года	-45	1.1	-49.5
8	Перепад температур в теплое ϑ_w время года	7.5	1.1	8.3
9	Перепад температур в холодное ϑ_c время года	-54	1.1	-59.4

3.2.1. Снеговая нагрузка

Нормативное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия следует определять по формуле СП 20.13330.2016 <<Нагрузки и воздействия>>:

$$S_0 = c_e\, c_t\, \mu\, S_g \tag{3.1}$$

где Се- коэффициент, учитывающий снос снега с покрытий зданий под действием ветра или иных факторов, принимаемый в соответствии с 10.5-10.9 [67];

Ct - термический коэффициент, принимаемый в соответствии с 10.10 [67];

μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие, принимаемый в соответствии с 10.4 [67];

Sg - нормативное значение веса снегового покрова на 1 м2 горизонтальной поверхности земли, принимаемое в соответствии с 10.2 [67] ;

Нормативное значение веса снегового покрова Sg на 1 м2 горизонтальной поверхности земли принимается в зависимости от снегового района для территории Российской Федерации по данным таблицы 10.1 [67];

Схемы распределения снеговой нагрузки и назначения коэффициента μ для покрытий следует принимать в соответствии с приложением Б [67] (см. рис. 3.3).

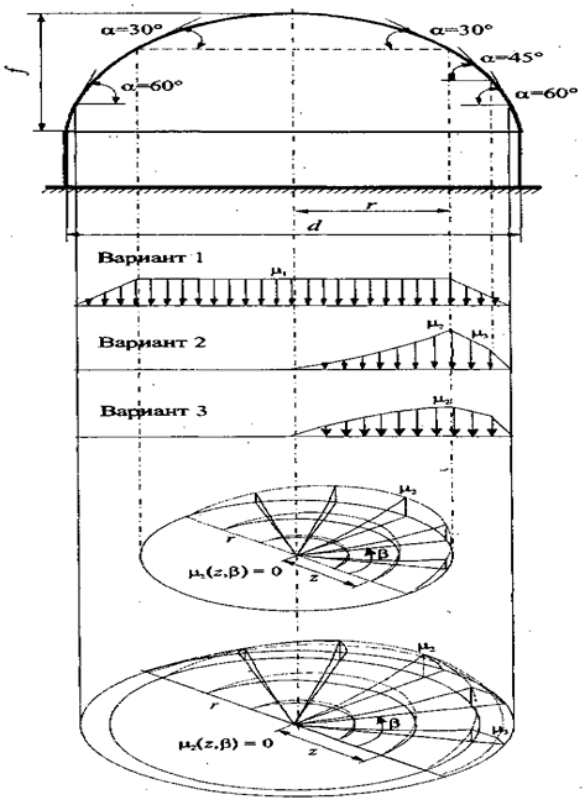


Рисунок 3.3 – Вариантов распределение снеговой нагрузки

Для зданий с купольными круговыми и близкими к ним по очертанию покрытиями (рисунок 3.3) коэффициент μ_1 определяется по таблице Б.2 [67]. Промежуточные значения определяются линейной интерполяцией.

Для куполов с отношением $f/d \leq 0{,}05$ следует учитывать только вариант 1.

Для куполов с отношением $f/d > 0{,}05$ следует учитывать варианты 1, 2 и 3 при уклонах $\alpha < 60°$.

Для варианта 2 на рисунке 3.3 следует принимать при $z \le r_1$ $\mu_2 = C_{r1}\,(z/r_1)^2 \sin\beta$, где $C_{r1} = 2{,}55 - \exp(0{,}8\text{-}14\,f/d)$; при $z > r_1$ $\mu_3 = 1{,}5 \sin\beta$, при $\alpha = 45°$; $\mu_3 = 0$, при $\alpha > 60°$.

Промежуточные значения определяются линейной интерполяцией.

Для варианта 3 следует принимать:

$$\mu_2 = 3\sqrt{\frac{2f}{d}\sin 3\alpha}\,\sin\beta. \qquad (3.2)$$

Вариант 3 следует учитывать для куполов с $f/d > 0{,}05$ при сильно шероховатой поверхности покрытия, наличии на нем возвышающихся надстроек, фонарей или снегозадерживающих преград, а также для покрытий, защищенных от ветра соседними более высокими зданиями или объектами окружающей застройки.

Для купольных сферических и конических покрытий зданий на круглом плане, регламентируемых схемами Б.13, Б.14 приложения Б, при задании равномерно распределенной снеговой нагрузки значения коэффициента c_e следует устанавливать в зависимости от диаметра d основания купола:

c_e =0,85 при $d \le 60$ м;

c_e =1,0 при d >100 м;

c_e =0,85+0,00375 (d - 60) - в промежуточных случаях.

При определении снеговых нагрузок для неутепленных покрытий зданий с повышенными тепловыделениями, приводящими к таянию снега, при уклонах кровли свыше 3 % и обеспечении надлежащего отвода талой воды следует вводить термический коэффициент $c_t = 0{,}8$. В остальных случаях $c_t = 1{,}0$.

Коэффициент надежности по нагрузке γ_f для снеговой нагрузки следует принимать равным 1,4. Исходные данные представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Исходные данные

Наименование		Количество	Единица измерения
Место строительства – г. Якутск	-	-	-
Высота купола	f	10	м
Диаметр купола	d	20	м
Радиус до касательной к куполу с углом в 30° к горизонту	r	5.25	м

Снеговой район г. Якутск по карте 1 – II-й, по таблице 10.1 – S_g = 1,0 кПа.

Установим коэффициент сноса снега, принимаемый по п.10.8 [67].

Т.к. в нашем случае $d=20м \leq 60$ м, то

Принимаем c_e = 0,85.

Принимаем термический коэффициент c_t = 1,0.

По таблице Б2 [67] – коэффициент μ_1 = 1,0 при 1-м варианте.

Т.к. f/d =10/20=0,5> 0,05 следует учитывать варианты 1, 2 и 3 при уклонах $\alpha < 60°$.

Промежуточные значения определяются линейной интерполяцией.

при $z \leq r_1$ $\mu_2 = C_{r1}\,(z/r_1)^2\,sin\beta$=2,54· (5,25/5,25) · sin45=1,79

где C_{r1} = 2,55 - exp(0,8-14 f/d)=0,8 – exp(0,8-14·10/20)=2,54

при $z > r_1$ μ_3 = 1,5 $sin\beta$=1,5· sin45=1,06 при $\alpha = 45°$; μ_3 = 0, при $\alpha > 60°$.

Промежуточные значения определяются линейной интерполяцией.

Определим нормативные значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия:

Вариант 1

$S_{01} = c_e\, c_t\, \mu_1\, S_g$ = 0,85 · 1,0 · 1,0 · 1,0 = 0,85 кПа

Вариант 2

$S_{02} = c_e\, c_t\, \mu_2\, S_g$ = 0,85 · 1,0 · 1,79 · 1,0 = 1,52 кПа

$S_{03} = c_e\, c_t\, \mu_3\, S_g$ = 0,85 · 1,0 · 1,06 · 1,0 = 0,90 кПа

3.2.2. Ветровая нагрузка

Во всех случаях нормативное значение основной ветровой нагрузки w следует определять, как сумму средней w_m и пульсационной w_p составляющих

$$w = w_m + w_p \tag{3.3}$$

Нормативное значение средней составляющей основной ветровой нагрузки w_m в зависимости от эквивалентной высоты z_e над поверхностью земли следует определять по формуле

$$w_m = w_0 k(z_e) c \tag{3.4}$$

где w_0 – нормативное значение ветрового давления (см. п.11.1.4) [67];

$k(z_e)$ – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты (см. п.11.1.5 и 11.1.6) [67];

c – аэродинамический коэффициент (см. п.11.1.7) [67].

Нормативное значение ветрового давления принимается в зависимости от ветрового района по таблице 11.1 [67].

Эквивалентная высота z_e определяется следующим образом.

Коэффициент для высот $z_e \leq 300$ м определяется по таблице 11.2 [67] или по формуле (11.4), в которых принимаются следующие типы местности:

В – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10м;

Значения параметров k_{10} и α для различных типов местностей приведены в таблице 11.3 [67].

Значения аэродинамических коэффициентов, указаны в п.В.1 приложения В [67], допускается уточнять на основе данных модельных аэродинамических испытаний сооружений.

Нормативное значение пульсационной составляющей основной ветровой нагрузки w_p на эквивалентной высоте z_e следует определять следующим образом:

$$w_p = w_m \zeta(z_e) \nu \tag{3.5}$$

где w_m – определяется в соответствии с п.11.1.3 [67];

$\zeta(z_e)$ – коэффициент пульсации давления ветра, принимаемый по таблице 11.4 или формуле (11.6) для эквивалентной высоты z_e (см. п.11.1.5) [67].

ν – коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра (см. п.11.1.11) [67].

Значения коэффициентов c_e в точках A и C, а также в сечении ВВ приведены на рисунке 3.4. Для промежуточных сечений коэффициенты c_e определяются линейной интерполяцией.

При определении эквивалентной высоты **(**11.1.5**)** и коэффициента v в соответствии с 11.1.1: $h = h_1 + 0,7f$.

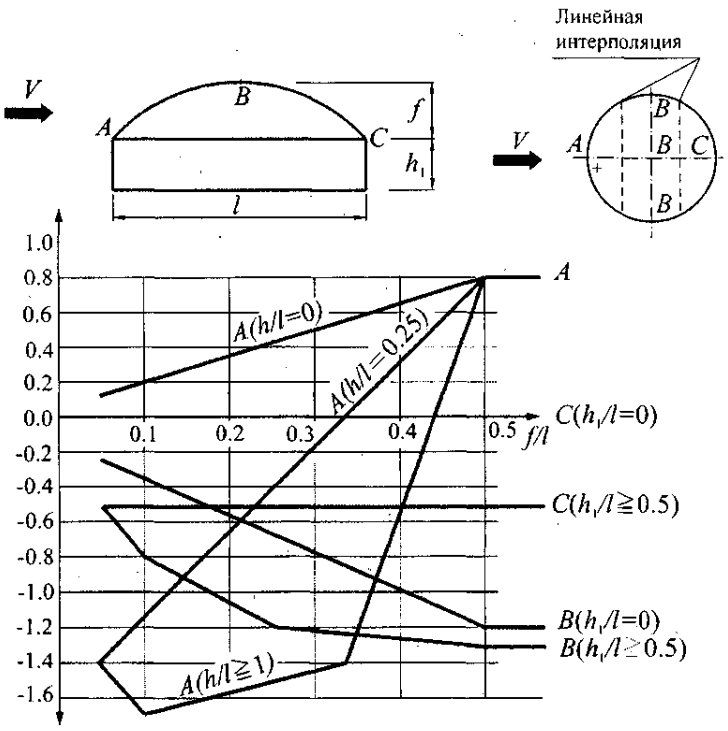


Рисунок 3.4 – Значения коэффициентов c_e

Коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ν следует определять для расчетной поверхности сооружения или отдельной конструкции, для которой учитывается корреляция пульсаций.

Если расчетная поверхность близка к прямоугольнику, ориентированному так, что его стороны параллельны основным осям, то коэффициент ν следует определять по таблице 11.6 [67] в зависимости от параметров ρ и χ, принимаемых по таблице 11.7 [67].

При расчете сооружений в целом размеры расчетной поверхности следует определять с учетом указаний п.В.1 приложения В [67], при этом для решетчатых сооружений в качестве расчетной поверхности необходимо принимать размеры поверхности по его внешнему контуру.

Исходные данные представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Исходные данные

Наименование		Количество	Единица измерения
Высота купола	f	10	м
Диаметр купола	l	20	м
Высота вертикальных стен	h_1	8,2	м
Приведенная высота сооружения (h1+0.7f)	h	7	м

Для определения коэффициента c_e определим приведенную высоту сооружение:

$h=(h_1+0,7f)=(0+0,7*10)=8,2$ м;

Определим следующие отношения:

$h_1/l=1,2/20=0,06$;

$h/l=8,2/20=0,41$;

$f/l=10/20=0,5$;

Далее по графику определяем коэффициенты ветрового давления;

$C^a_e=0,8$;

$C^b_e=-1,3$;

$C^c_e=-0,5$;

Определение нагрузки на купол с наветренной стороны.

Ветровой район г. Якутск по карте 3 [67]-I- й по таблице 11.1 – $w_{0=}0,23$ кПа.

$z_e = z=11,2$м.

$C^a_e=0.8$ (активное давление).

Значения k по таблице 11.2 [67] для типа местности В: $k_{10}=0,65$; $k_{20}=0,85$; по интерполяции получим $k_{11,2}=0,674$.

Найдём нормативное значения средней средней составляющей ветровой нагрузки на отметке +11,2 м на наветренной стороне.

$$w_{m11,2}=w_0 \cdot k_{11,2} \cdot c=0,23 \cdot 0,674 \cdot 0,8=0,124 \text{ кН/м}^2$$

Определим нормативное значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки на тот же высоте:

$$w_{p11,2}= w_{m11,2} \cdot \zeta_{11,2} \cdot v=0,124 \cdot 1,043 \cdot 0,750=0,100 \text{ кН/м}^2 .$$

Здесь $\zeta_{11,2=}1,043$ по таблице 11.4 [67] для типа местности В путем интерполяции между значениями $\zeta_{10 =}1,06$ и $\zeta_{20=}0,92$.

v- коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра по таблице 11.6 в зависимости от параметров ρ и χ, применяемых по таблице11.7.

$\rho=l=20,0$ м; $\chi=h=11,2$ м; $v=0,750$.

Нормативная значения ветровая нагрузка на тот же высоте:

$$W_{11,2}= w_{m11,2}+ w_{p11,2}=0,124+0,100=0,224 \text{ кН/м}^2.$$

Определение нагрузки на купол с подветренной стороны.

Аэродинамический коэффициент c_e равно:

C^c_e= - 0,5.

Найдём нормативное значения средней составляющей ветровой нагрузки на отметке +11,2м на подветренной стороне.

$$w_{m11,2}=w_0 \cdot k_5 \cdot c=0{,}23 \cdot 0{,}674 \cdot (-0{,}5) = -\ 0{,}078 \text{ кН/м}^2 .$$

Определим нормативное значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки на тот же высоте:

$$w_{p11,2}= w_{m11,2} \cdot \zeta_{11,2} \cdot \nu=-0{,}078 \cdot 1{,}043 \cdot 0{,}750 = -0{,}061 \text{ кН/м}^2 .$$

Нормативная значения ветровая нагрузка на тот же высоте:

$$W_{11,2}= w_{m11,2}+ w_{p11,2} = -0{,}078-0{,}061 = -0{,}139 \text{ кН/м}^2.$$

Определение нагрузки на купол с верхней стороны.

Аэродинамический коэффициент c_e равно:

C^b_e=-1,3.

Найдём нормативное значения средней составляющей ветровой нагрузки на отметке +11,2 м на верхней стороне.

$$w_{m11,2}=w_0 \cdot k_5 \cdot c=0{,}23 \cdot 0{,}674 \cdot (-1{,}3) = -0{,}202 \text{ кН/м}^2 .$$

Определим нормативное значения пульсационной составляющей ветровой нагрузки на тот же высоте:

$$w_{p11,3}= w_{m11,2} \cdot \zeta_{11,2} \cdot \nu = -\ 0{,}202 \cdot 1{,}043 \cdot 0{,}750 = -\ 0{,}158 \text{ кН/м}^2 .$$

Нормативная значения ветровая нагрузка на тот же высоте:

$$W_{11,2}= w_{m11,2}+ w_{p11,2} = -0{,}202-0{,}158 = -0{,}360 \text{ кН/м}^2.$$

3.2.3. Температурно-климатические нагрузки

Согласно п. 13.2 [67], определим нормативные значения изменений средних температур по сечению элемента в теплое и холодное время года.

$$\Delta t_w = t_w - t_{0c} \tag{3.6}$$

$\Delta t_w = t_w - t_{0c}$=51,4-(-28)=79,4°$C$

$$\Delta t_c = t_c - t_{0w} \tag{3.7}$$

$\Delta t_c = t_c - t_{0w}$=-22-8=-30°$C$

Нормативные значения средних температур t_w и t_c в теплое и холодное время года для однослойных конструкций определяем по таблице 13.1 [67].

$t_w = t_{ew} + \theta_1 + \theta_4$=26+8+17,4=51,4°$C$

$t_c = t_{ic} + 0{,}6(t_{ec} - t_{ic}) - 0{,}5\theta_2$=20+0,6· (-45-20)-0,5·6=-22°C

t_{0w}, t_{0c} - начальные температуры в теплое и холодное время года, принимаемые в соответствии с 13.6 [67].

t_{ic} - температуры внутреннего воздуха помещений в холодное время года соответственно принимаемые по ГОСТ 30494-2011 или по заданию на проектирование с учетом технологических решений.

$$t_{0w} = 0{,}8t_{V11} + 0{,}2t_1 \quad (3.8)$$

$t_{0w} = 0{,}8t_{V11}+0{,}2t_1$=0,8·20-0,2·40=8°C

$$t_{0c} = 0{,}2t_{V11} + 0{,}8t_1 \quad (3.9)$$

$t_{0c} = 0{,}2t_{V11}+0{,}8t_1$=0,2·20-0,8·40=-28°C

t_{ew}, t_{ec} – средние суточные температуры наружного воздуха соответственно в теплое и холодное время года, принимаемые в соответствии с п. [67].

$\theta_1 = 8°C$, $\theta_2 = 6°C$, $\theta_3 = 4°C$, - приращение средних по сечению элемента температур и перепада температур от суточных колебаний температуры наружного воздуха, принимаемые по таблице 13.2 [67].

$\theta_4 = 0{,}05\rho S_{max}k$ = 0,05·0,65·766·0,7=17,4°C – приращения средних по сечению элемента температур и перепада температур от солнечной радиации, принимаемые в соответствии с 13.5 [67].

Средние суточные температуры наружного воздуха в теплое t_{ew} и холодное t_{ec} время года определяем по формулам:

$t_{ew} = t_{V11} + \Delta_{V11}$=20 + 6 = 26°$C$

$t_{ec} = t_1 - 0{,}5\Delta_1$= –40 – 0,5 · 10 = – 45°$C$

где t_I= -40°C, t_{VII} = 20°C – многолетние средние месячные температуры воздуха в январе и июле, принимаемые соответственно по картам 5 и 6 приложения Ж [67].

Δ_{VII} = 6°C, Δ_I = 10°C отклонения средних суточных температур от средних месячных (Δ_I принимается по карте 7 приложения Ж) [67].

Перепады температур по сечению элемента в теплое ϑ_w и холодное ϑ_c время года определяются по таблице 13.1 [67]:

$$\vartheta_w = \theta_5 = 0{,}05\rho S_{max}(1 - k) = 0{,}05 \cdot 0{,}65 \cdot 766 \cdot (1-0{,}7) = 7{,}5°C$$

$$\vartheta_c = 0{,}8(t_{ec} - t_{ic}) - 0{,}5\theta_3 = 0{,}8 \cdot (-45-20) - 0{,}5 \cdot 4 = -54°C$$

Коэффициент надежности по нагрузке γ_f для температурных климатических воздействий Δt и ϑ принимается равным 1,1.

3.3. Моделирование геодезического купола

В данной работе рассматривается работа элементов геодезического купола в условиях Крайнего Севера. Геометрическое моделирование данного купола было выполнено в программе ЛИРА-САПР 2016. Были смоделированы геодезические купола с разными жесткостными характеристиками из таких материалов как, сталь (рисунок 3.6), алюминий (рисунок 3.8) и древесина (рисунок 3.10).

После завершения разработки геометрии конечно-элементной модели, её элементам были присвоены различные «жесткости» (рисунок 3.5, 3.7, 3.9), т.е. физико-механические параметры материалов и сечений конструкций.

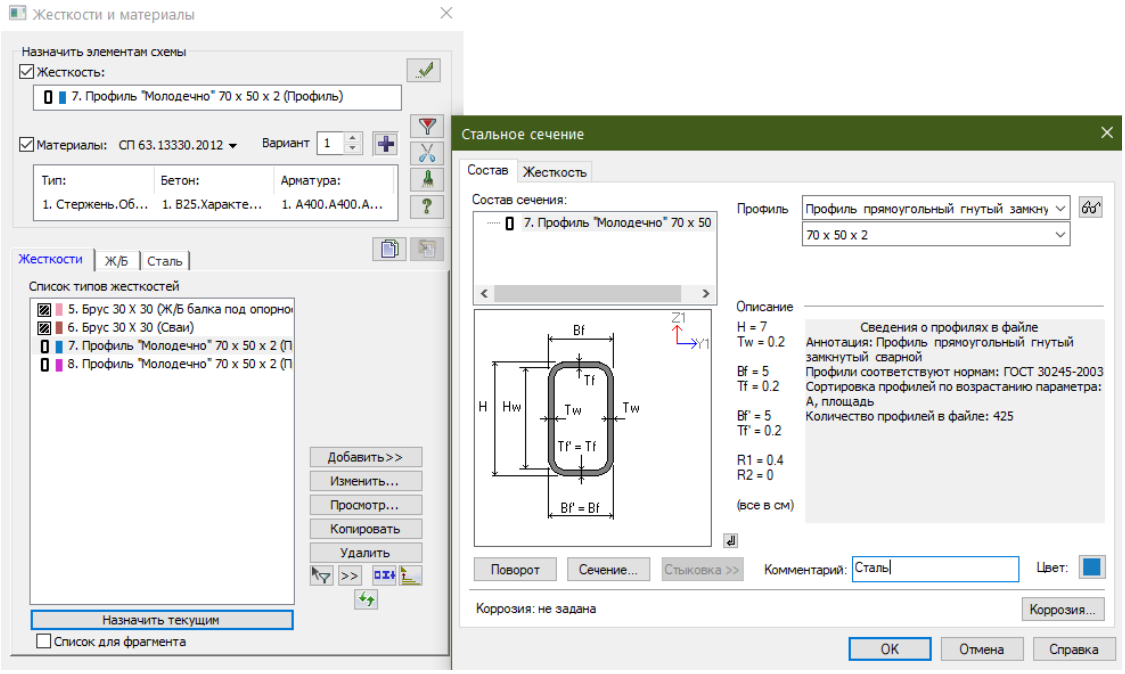


Рисунок 3.5 – Назначение жесткостей

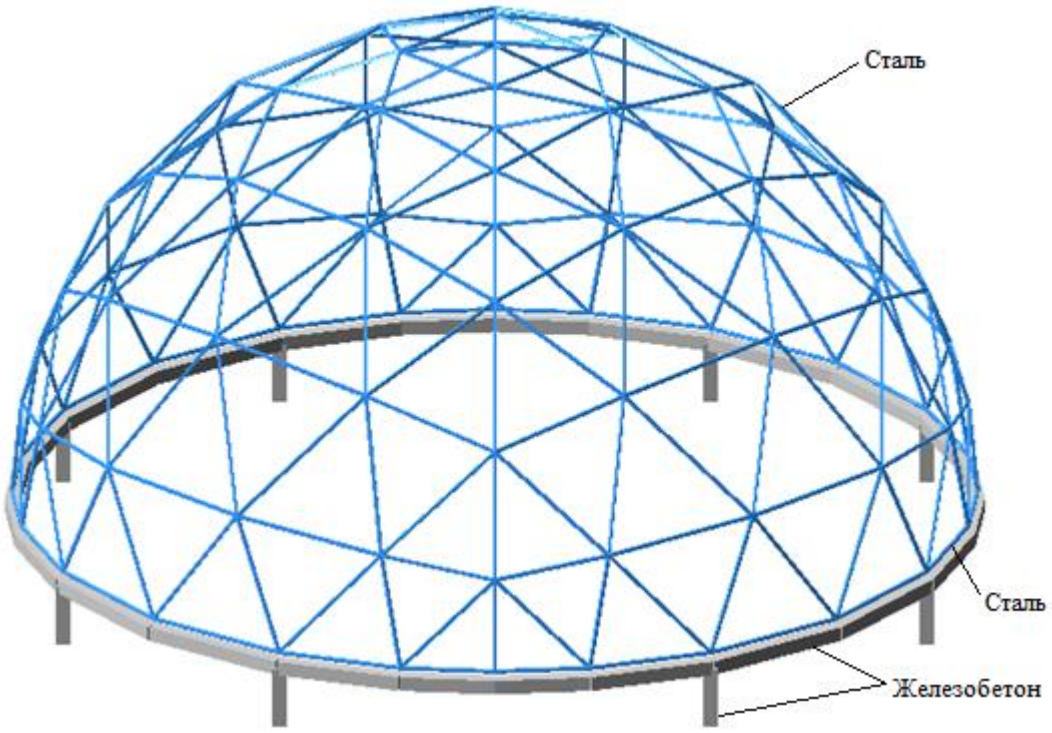


Рисунок 3.6 – Конечно-элементная 3Д модель стального купола

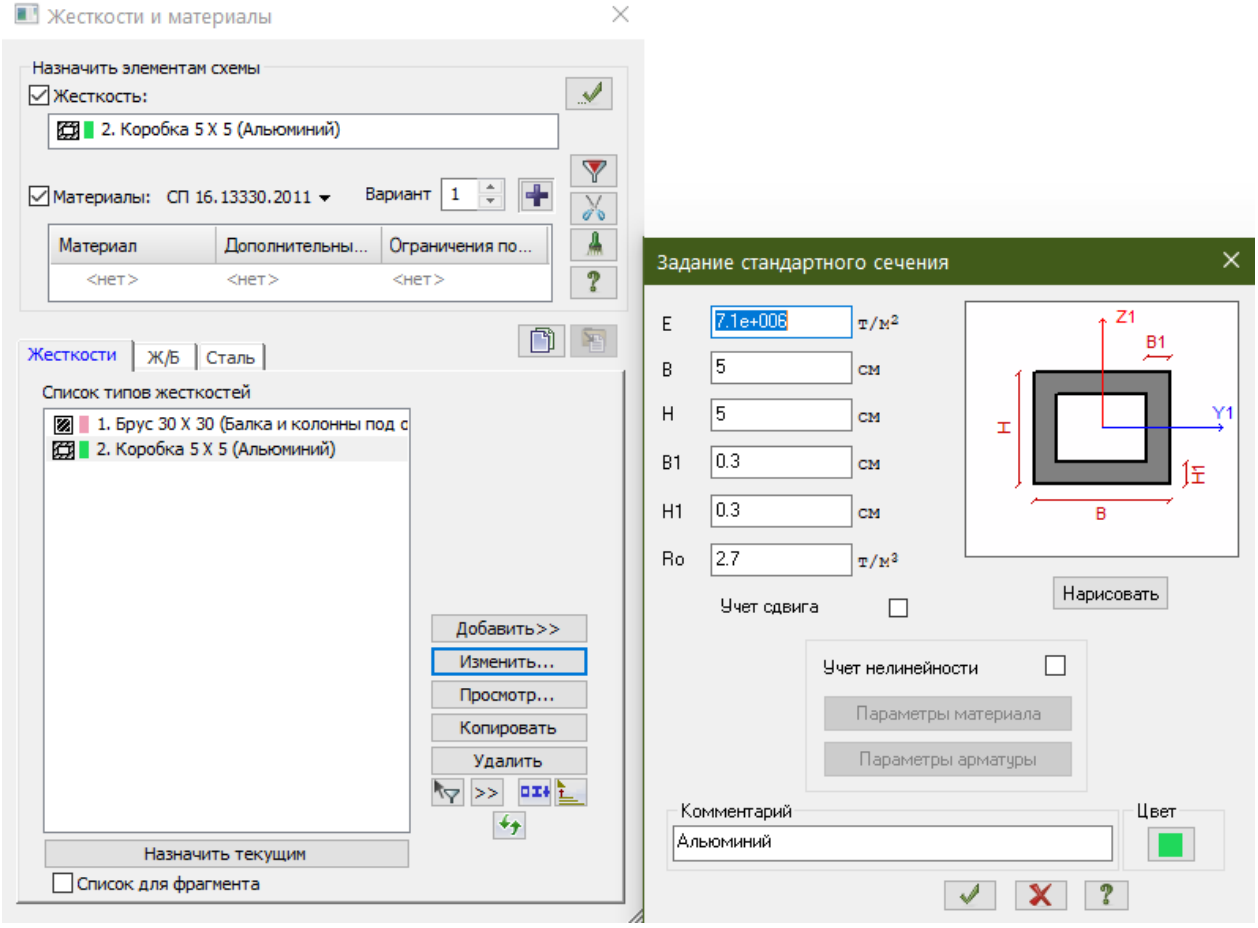


Рисунок 3.7 – Назначение жесткостей

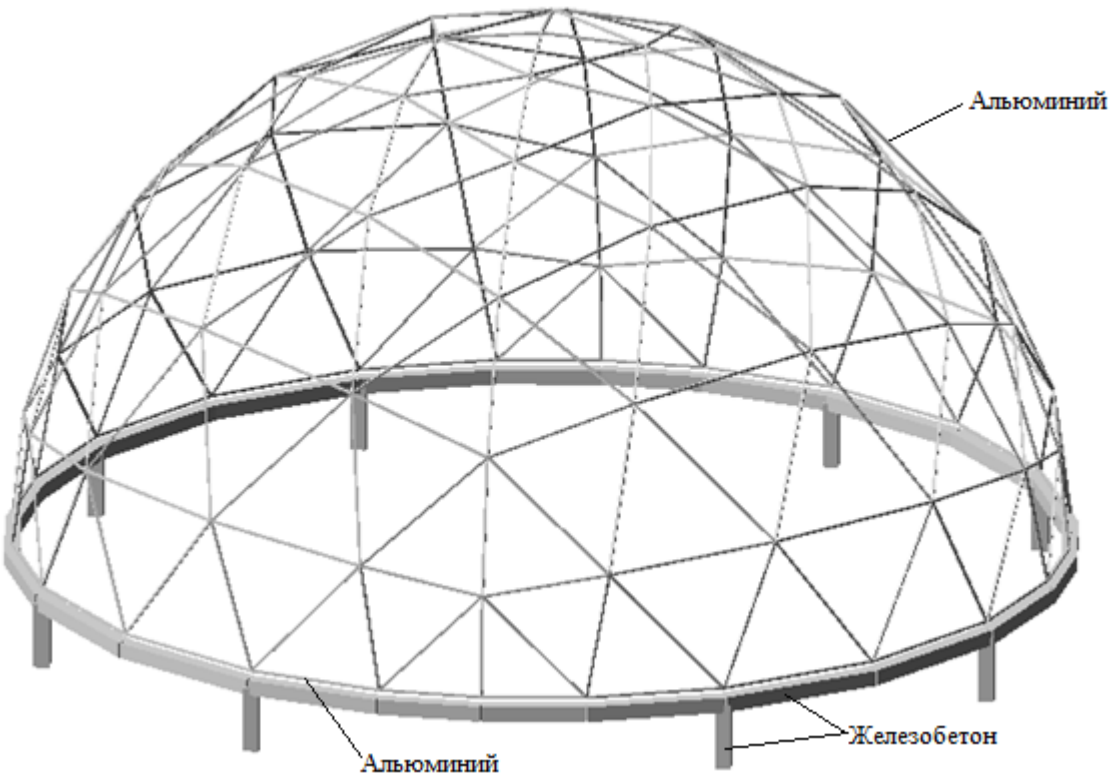


Рисунок 3.8 – Конечно-элементная 3Д модель алюминиевого купола

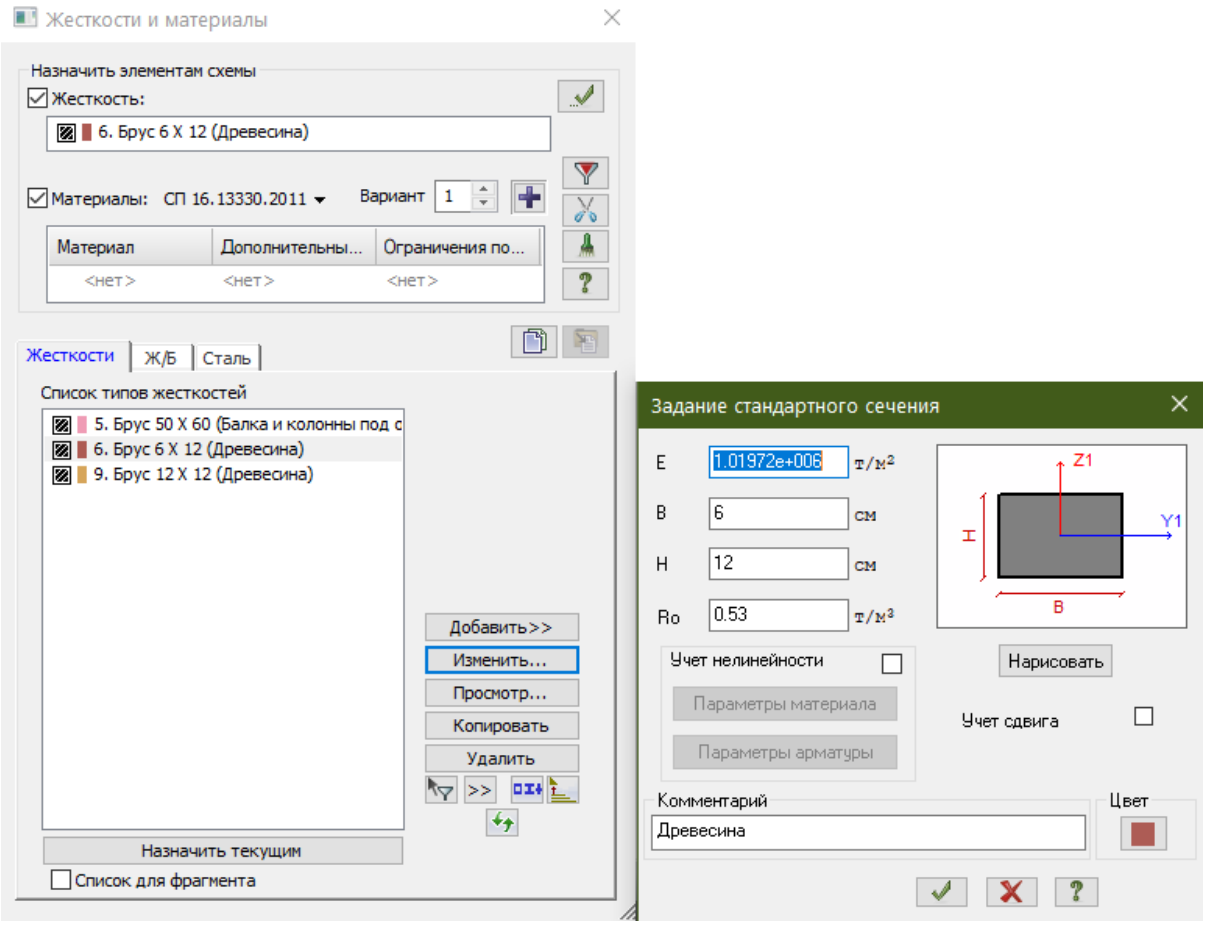


Рисунок 3.9 – Назначение жесткостей

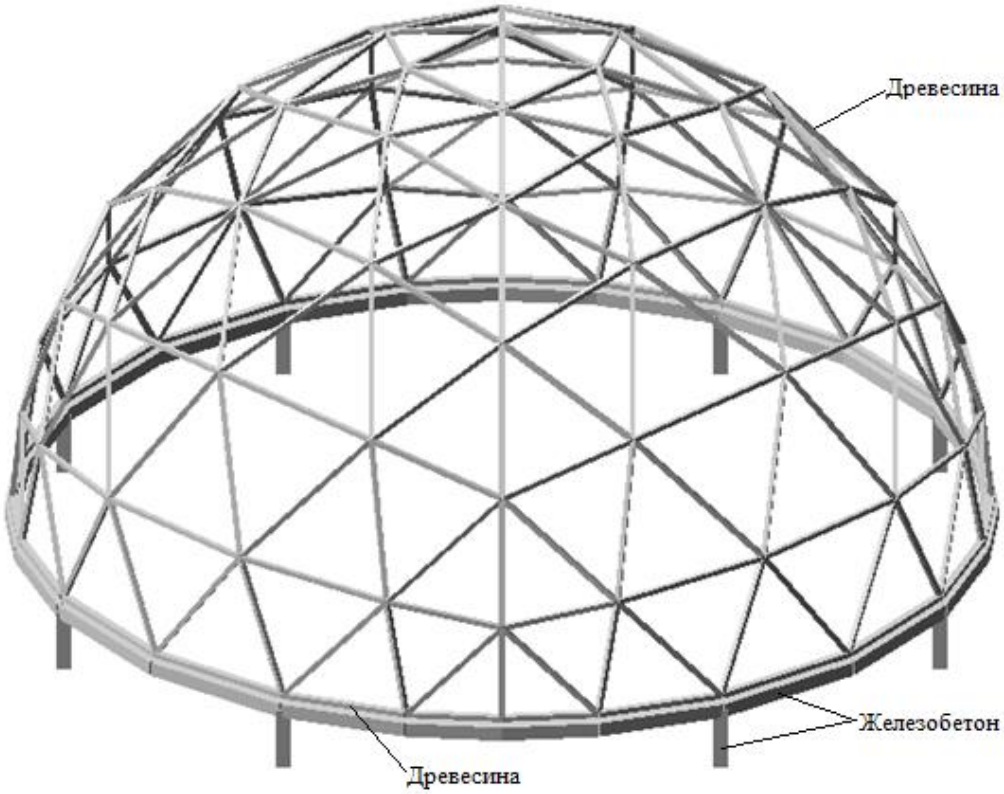


Рисунок 3.10 – Конечно-элементная модель деревянного купола

РСУ и РСН для всех вариантов расчета представлены на рисунках 3.11, 3.12, 3.13, 3.15 и 3.16.

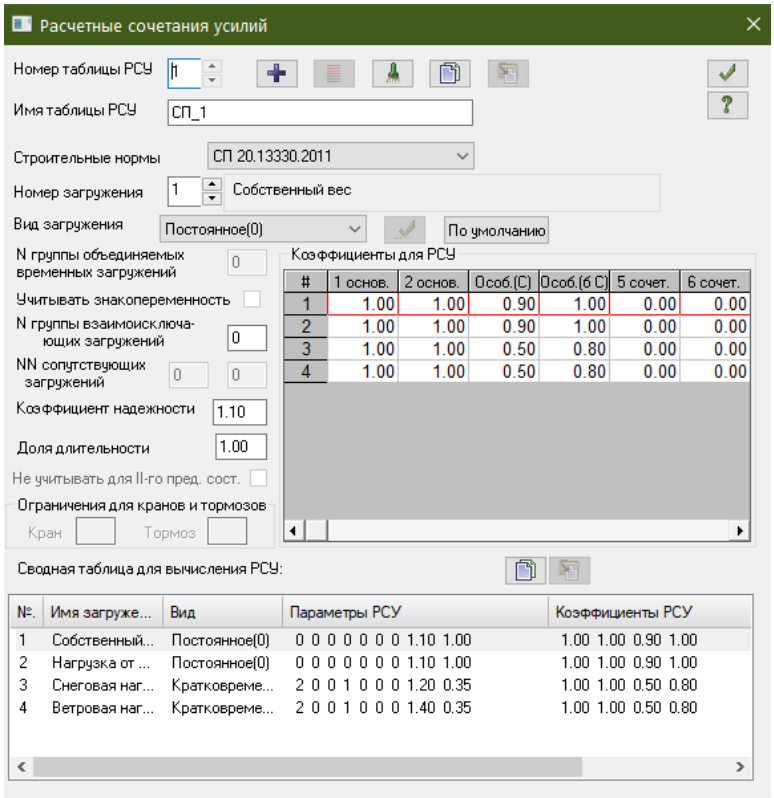


Рисунок 3.11 – Таблица расчет сочетания усилий для Варианта 1

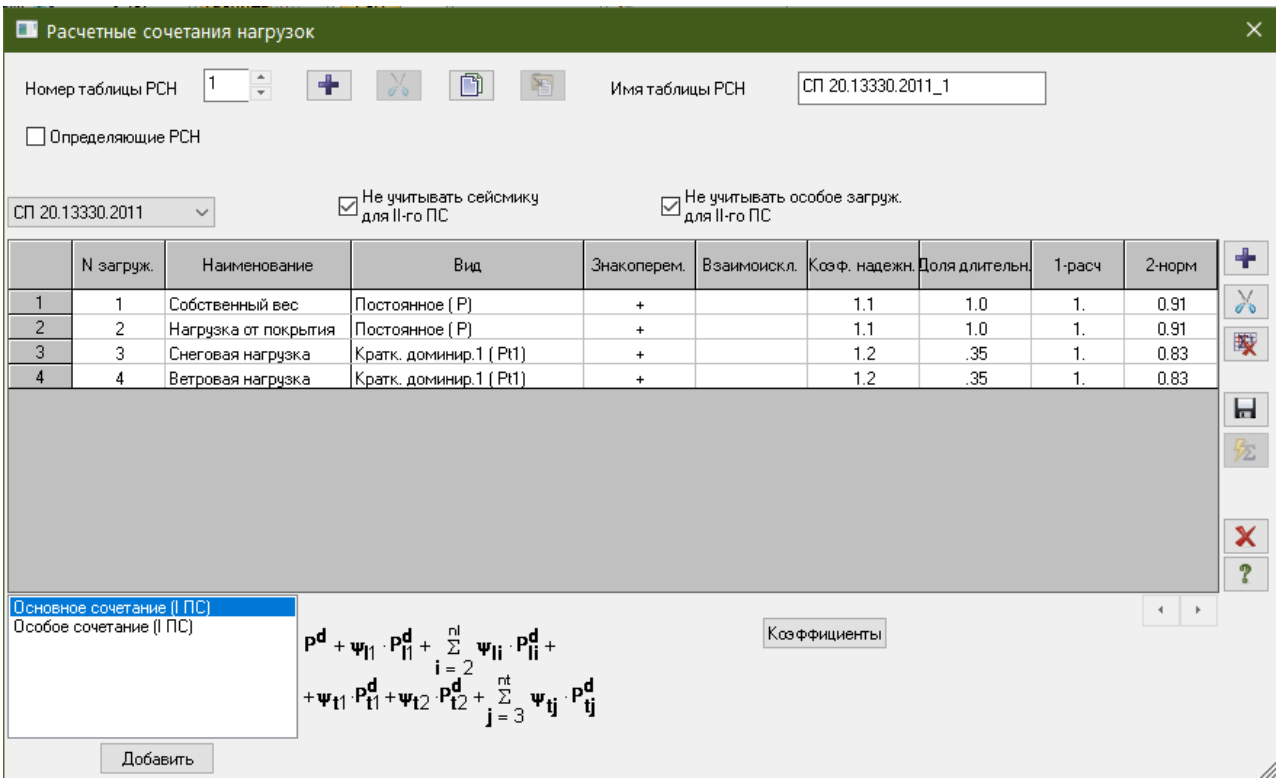


Рисунок 3.12 – Таблица расчет сочетания нагрузок для Варианта 1

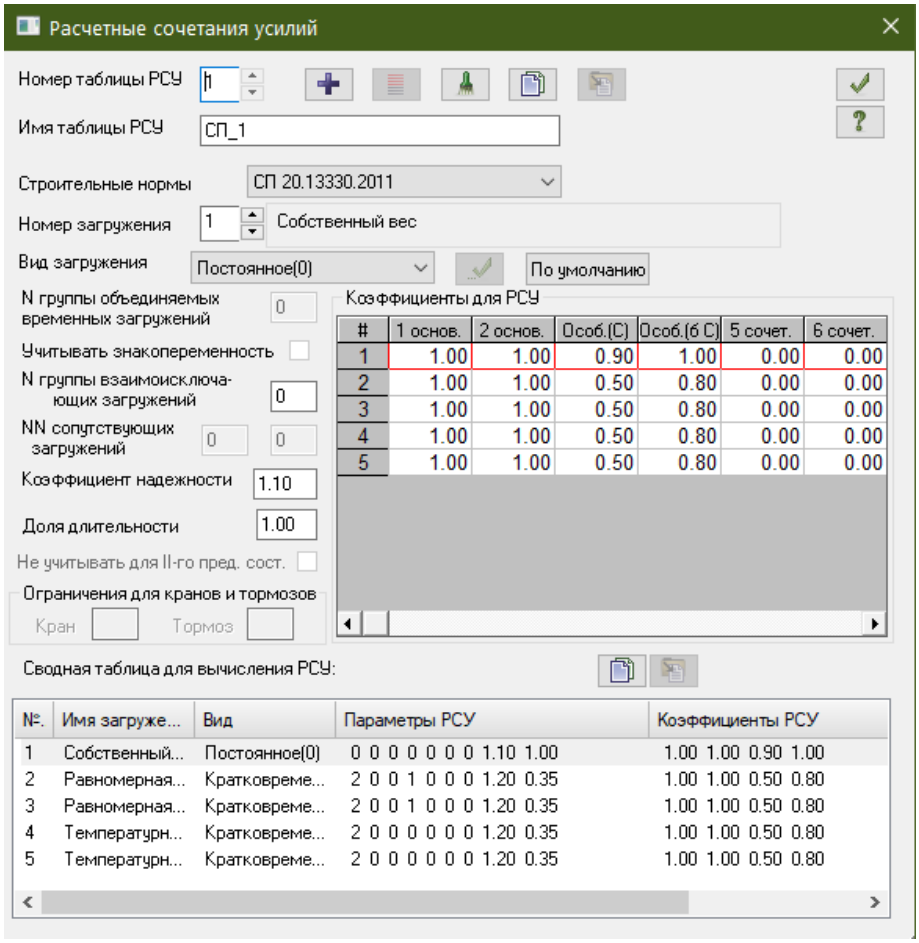


Рисунок 3.13 – Таблица расчет сочетания усилий для Варианта 2

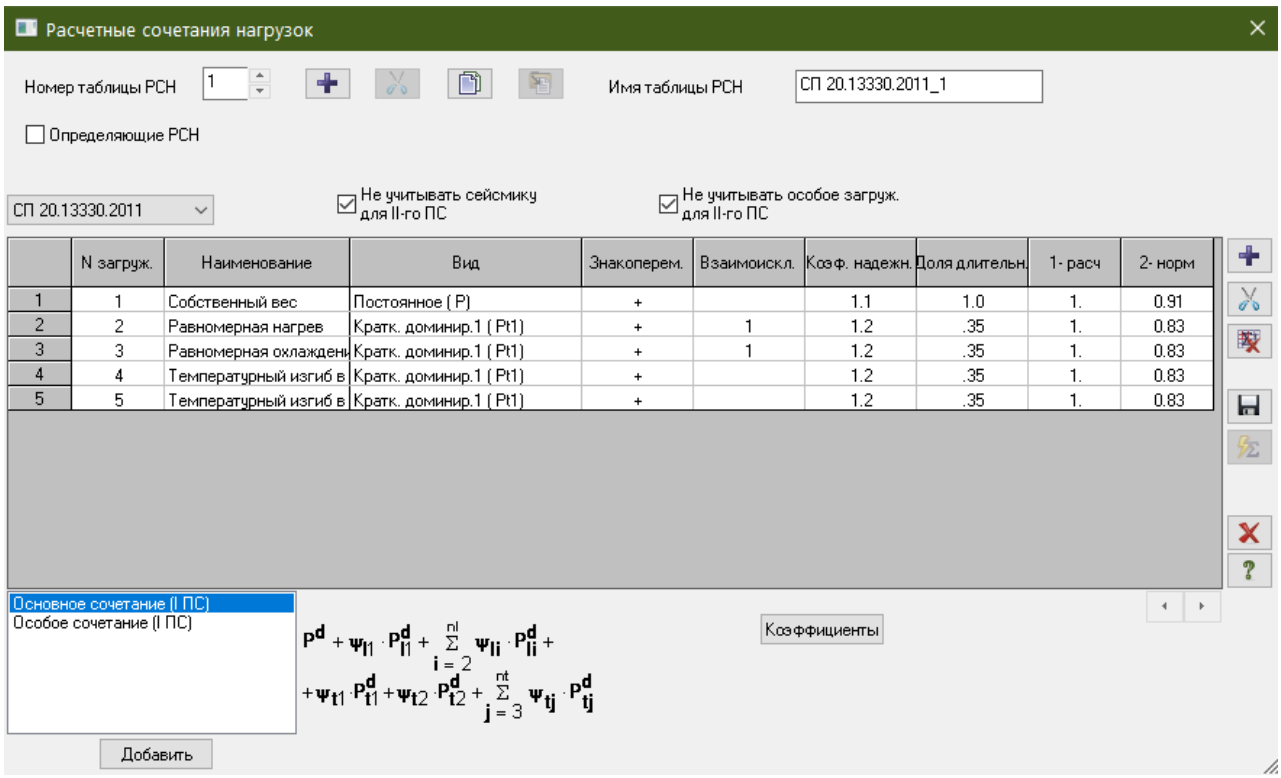


Рисунок 3.14 – Таблица расчет сочетания нагрузок для Варианта 2

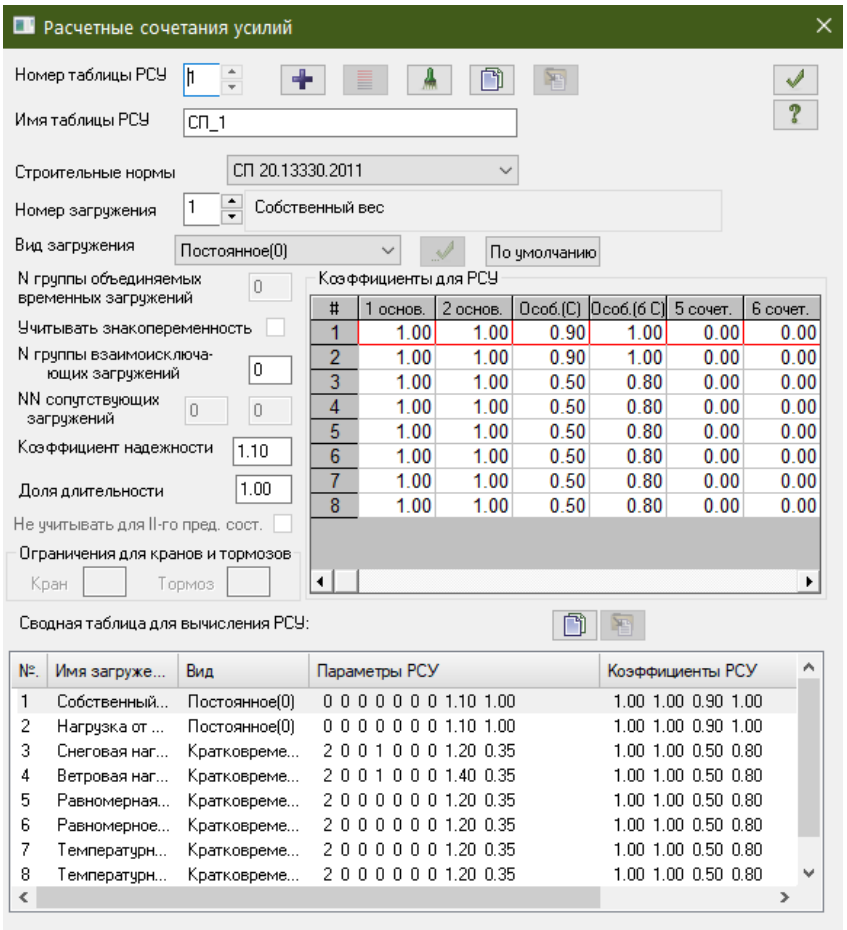


Рисунок 3.15 – Таблица расчет сочетания усилий для Варианта 3

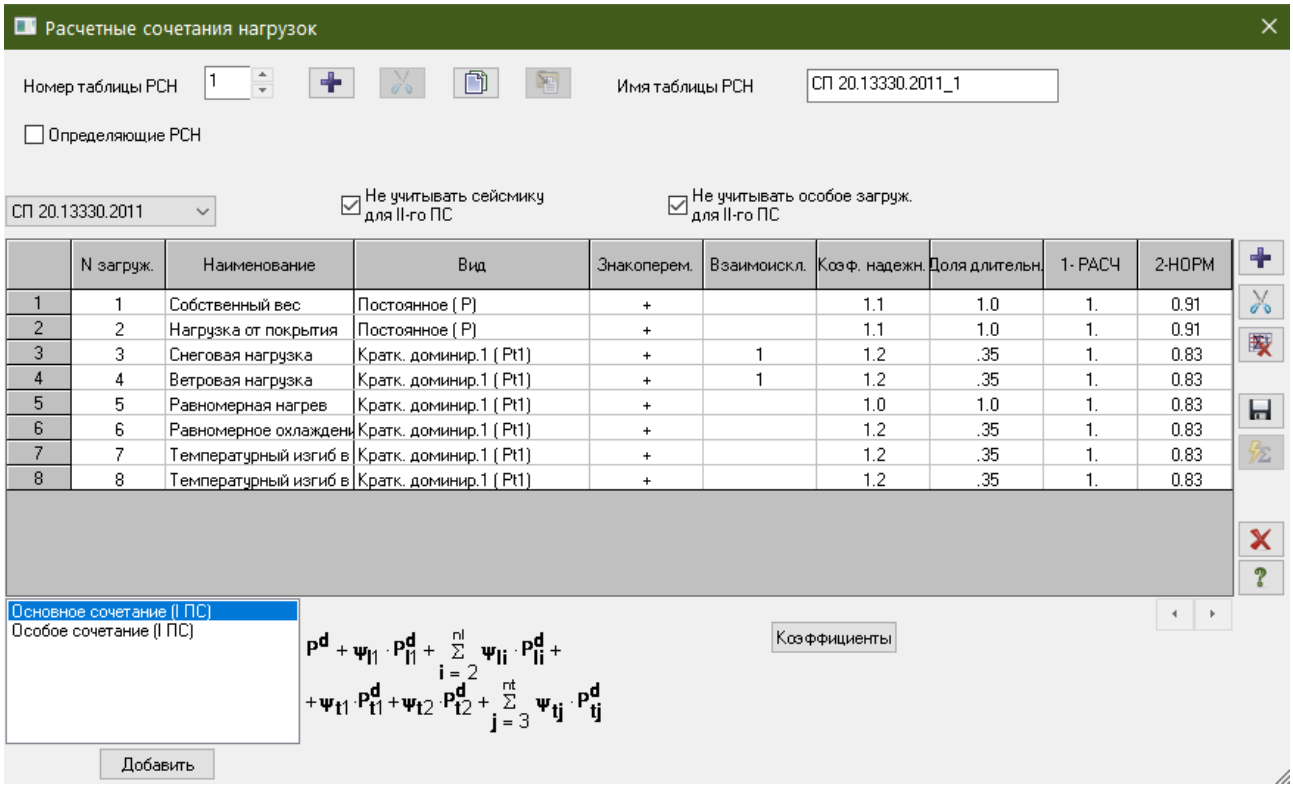


Рисунок 3.16 – Таблица расчет сочетания нагрузок для Варианта 3

3.4. Результаты расчета

В данной части работы представлены результаты проведенных расчетов, их анализ, общение и основные выводы по полученным данным.

В работе были рассмотрены три варианта расчета:

1 вариант: конструкция рассматривается в режиме эксплуатации, расчет производится по 1 и 2 группе предельных состояний, на воздействии постоянных, снеговых и ветровых нагрузок.

Имена загружений с 1-го варианта представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Имена загружений

№	Наименование
1	Собственный вес купола
2	Постонная нагрузка (от покрытия)
3	Снеговая нагрузка
4	Ветровая нагрузка

2 вариант: конструкция рассматривается в режиме эксплуатации, расчет производится по 1 и 2 группе предельных состояний, на воздействии положительных и отрицательных температурно-климатических нагрузок.

Имена загружений с 2-го варианта представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Имена загружений

№	Наименование
1	Собственный вес купола
2	Равномерная нагрев
3	Равномерная охлаждения
4	Температурный изгиб в теплое время
5	Температурный изгиб в холодное время

3 вариант: конструкция рассматривается в режиме эксплуатации, расчет производится по 1 и 2 группе предельных состояний, на воздействии совместных нагрузок.

При расчете по 2-му варианту было учтено коэффициент температурно-линейного расширения:

Сталь – 12·10-6 °С

Алюминий - 24·10-6 °С

Древесина - 3·10-6 °С

3.4.1. Результаты расчета стального геодезического купола

Результаты расчета представлены на рисунках 3.17 – 3.25.

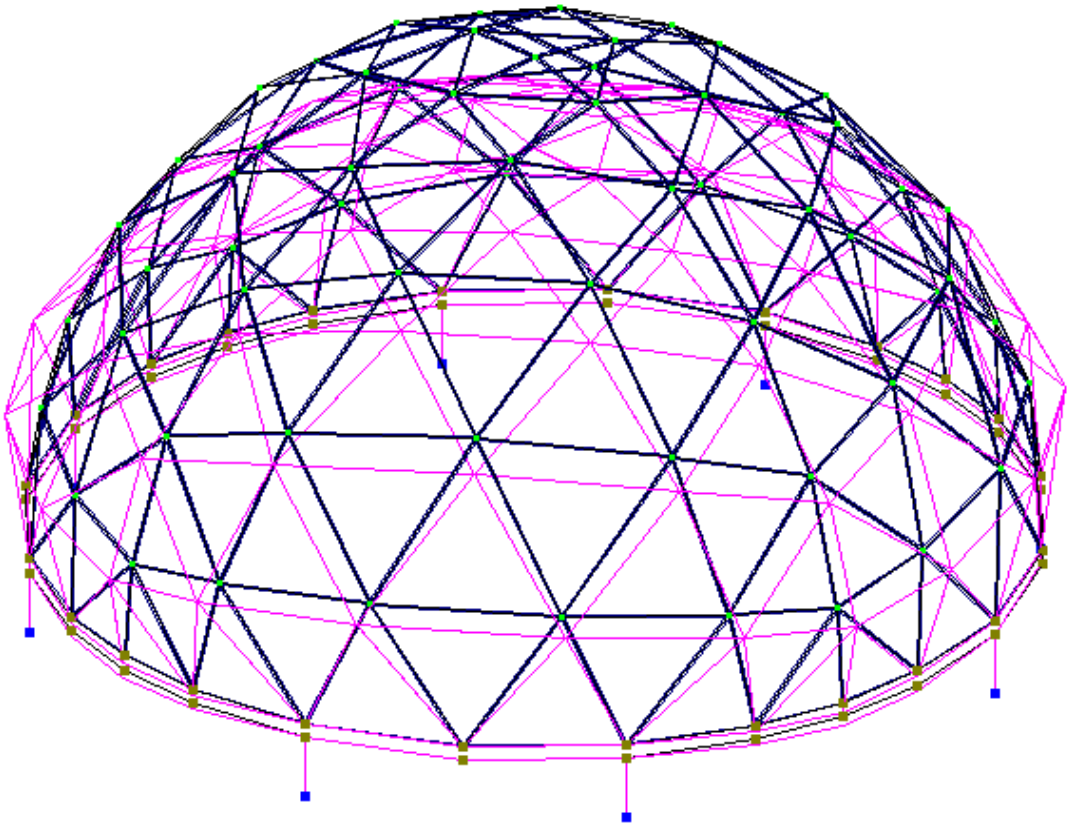


Рисунок 3.17 – Деформированная схема купола из стали (Вариант 1)

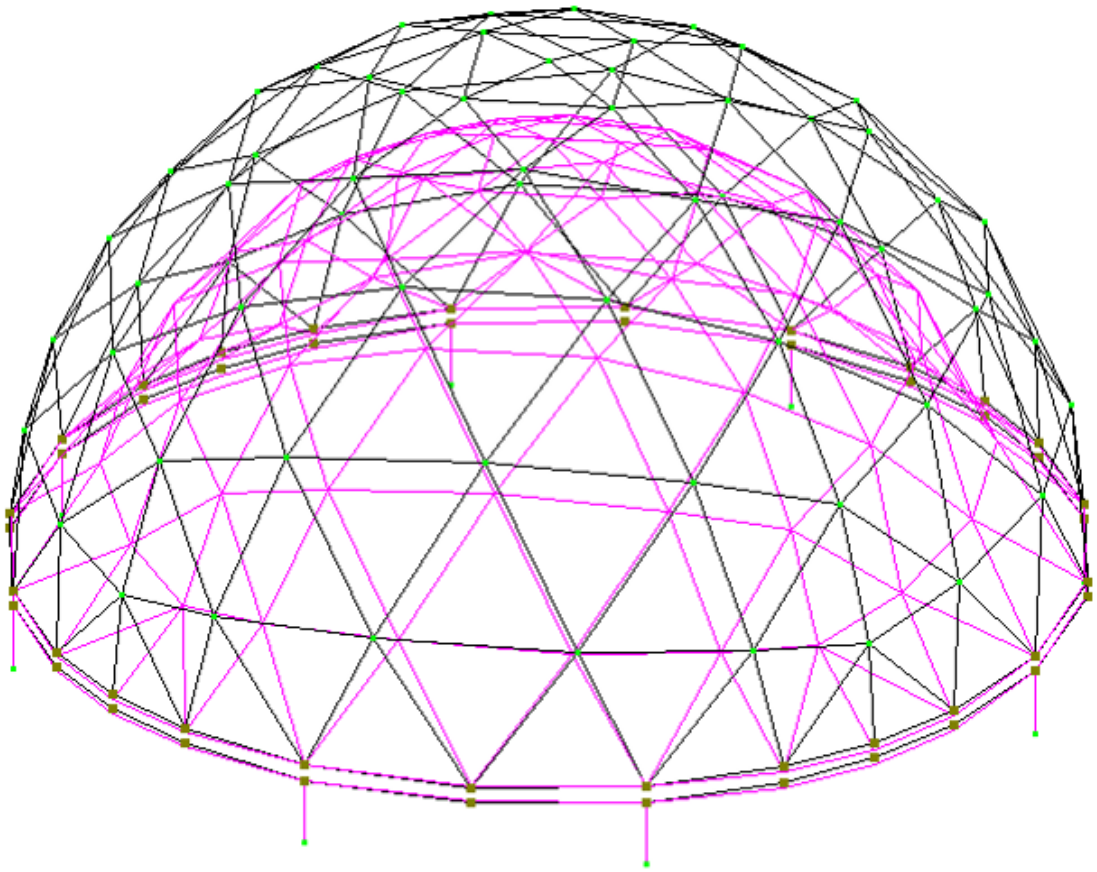


Рисунок 3.18 – Деформированная схема купола из стали (Вариант 2)

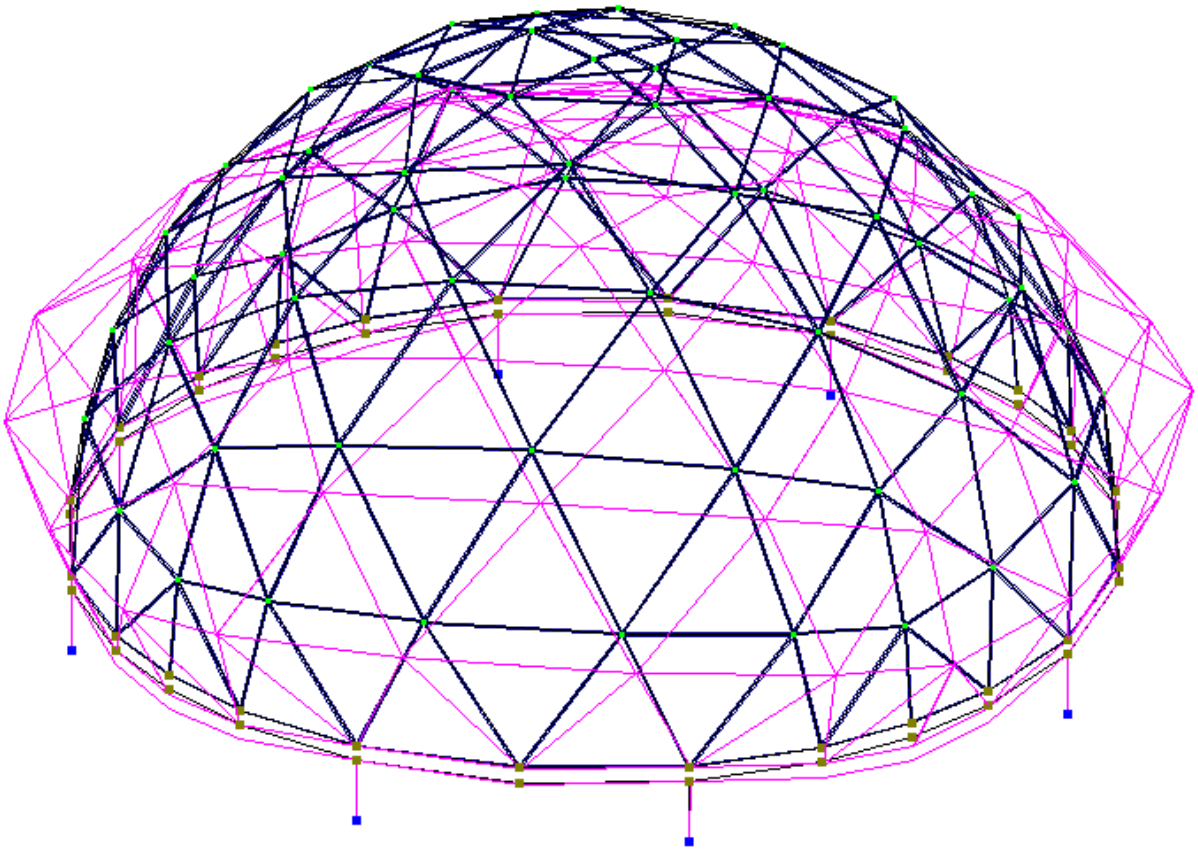


Рисунок 3.19 – Деформированная схема купола из стали (Вариант 3)

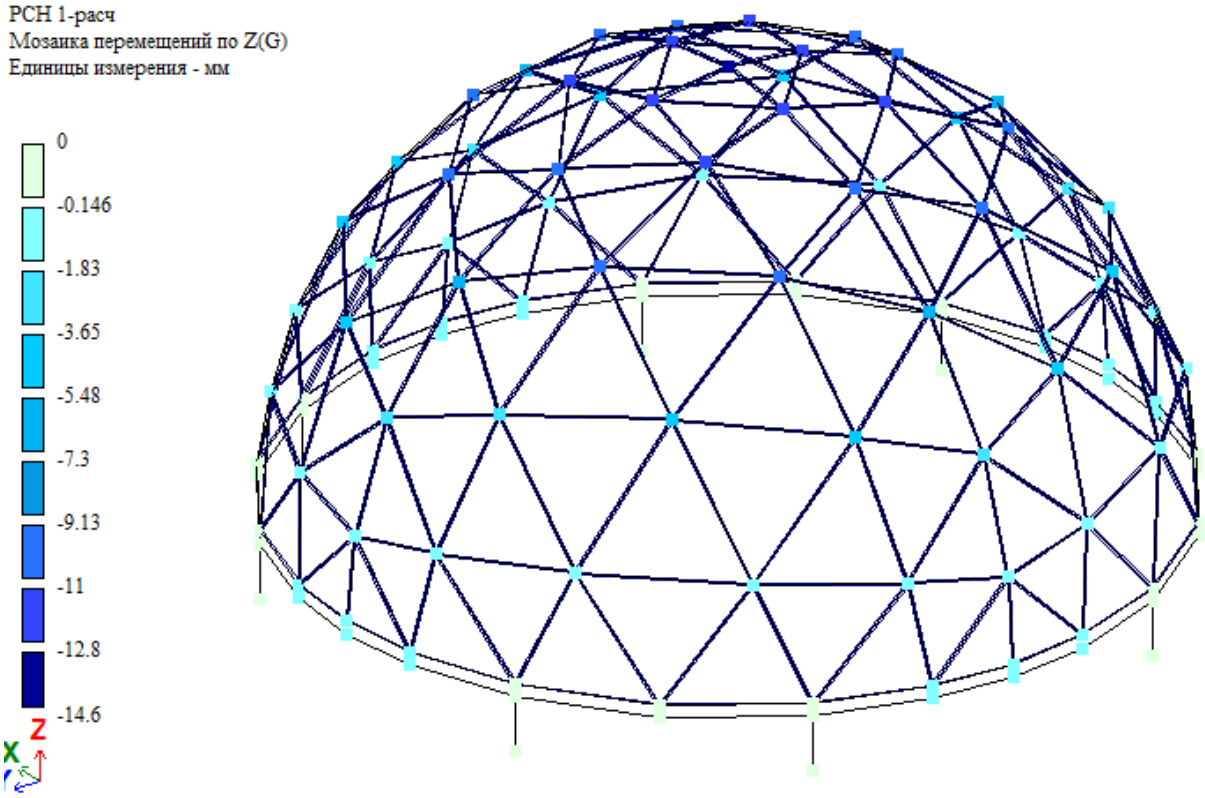


Рисунок 3.20 – Мозаика перемещений по Z (Вариант 1)

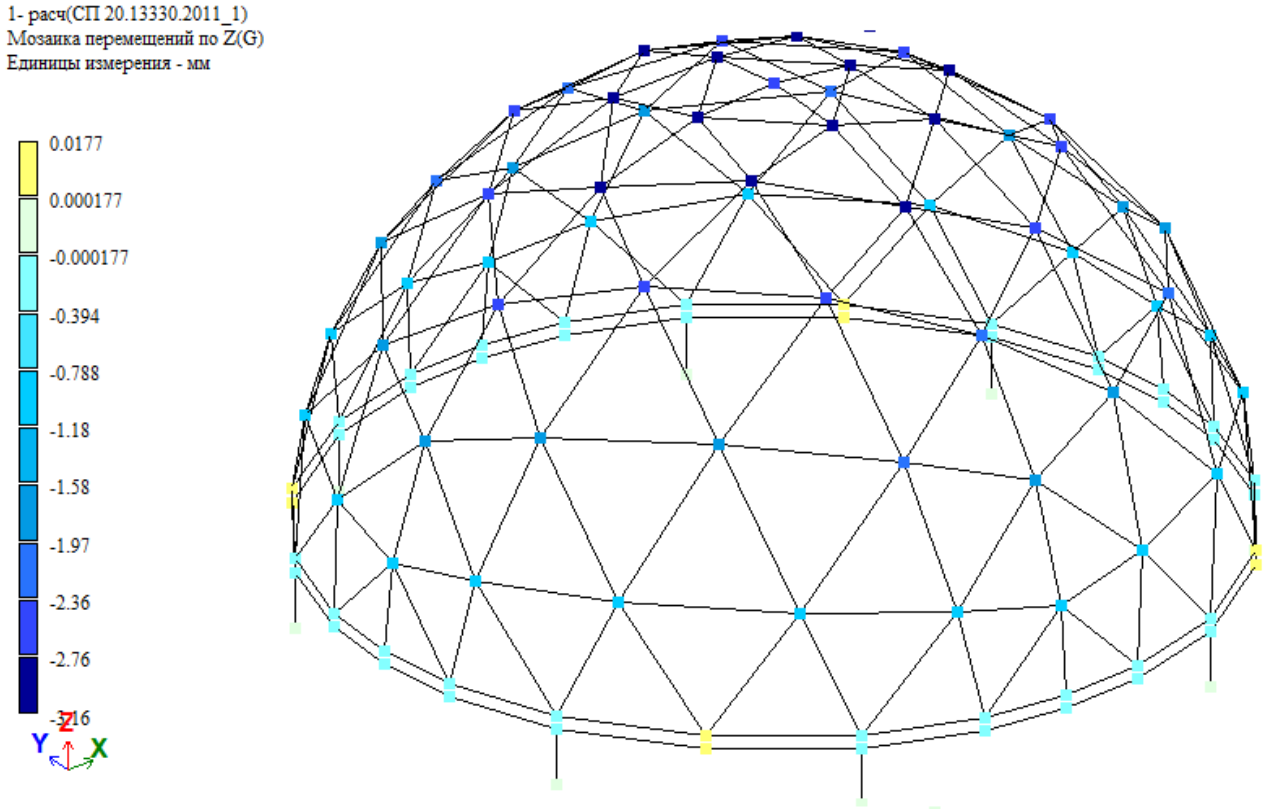


Рисунок 3.21 – Мозаика перемещений по Z (Вариант 2)

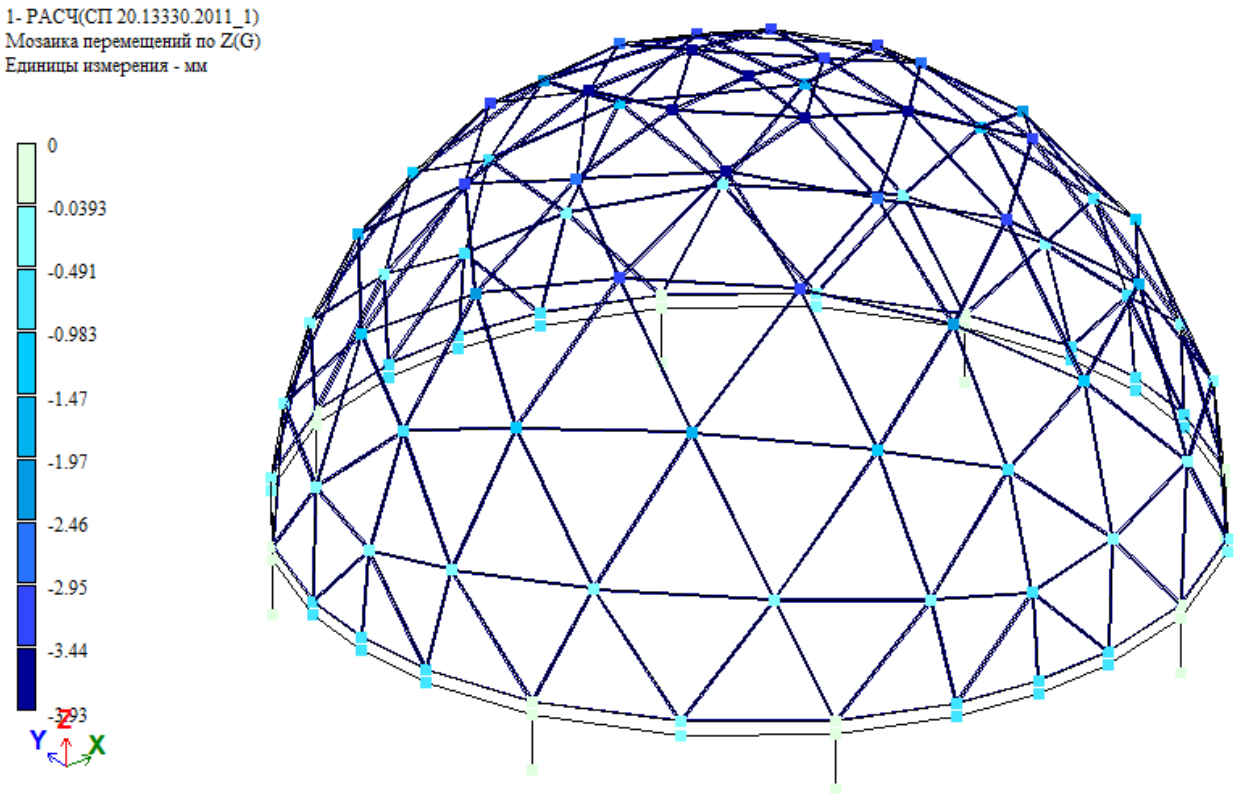


Рисунок 3.22 – Мозаика перемещений по Z (Вариант 3)

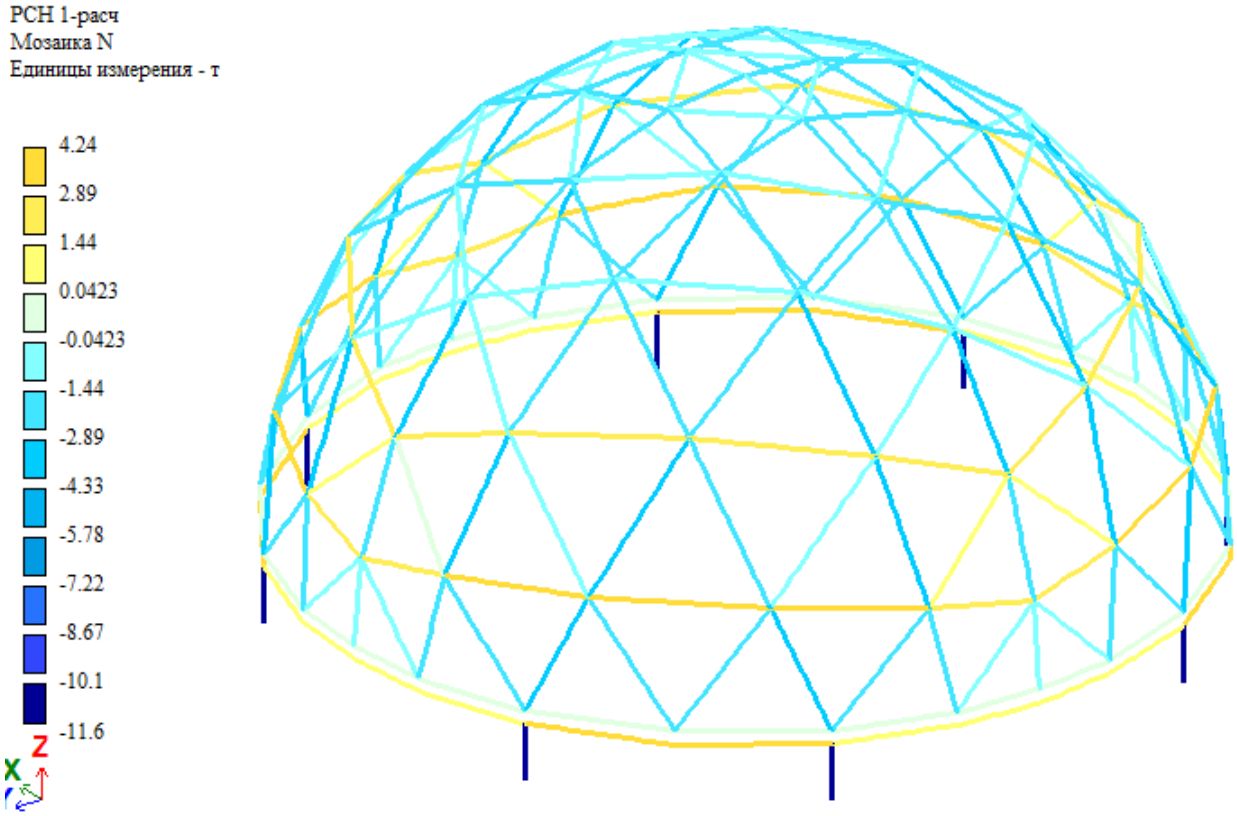


Рисунок 3.23 – Мозаика усилий N в стержнях (Вариант 1)

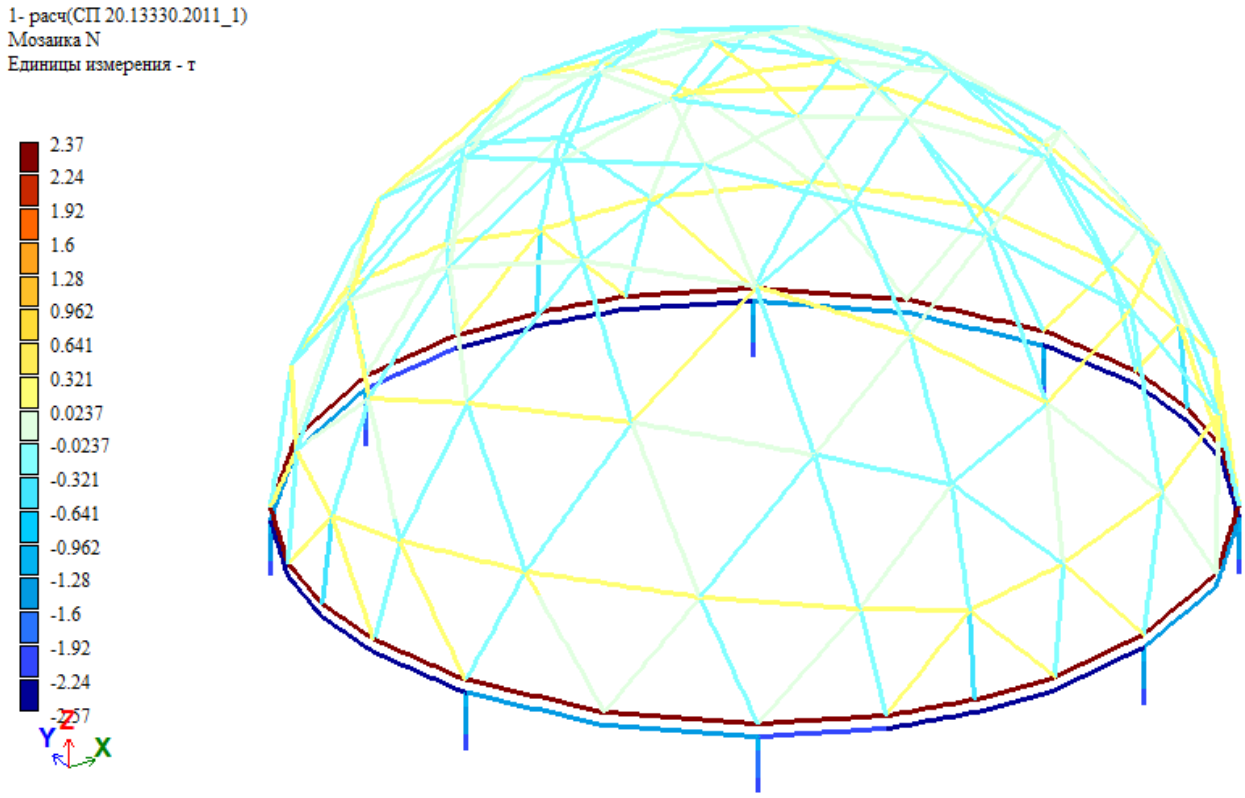


Рисунок 3.24 – Мозаика усилий N в стержнях (Вариант 2

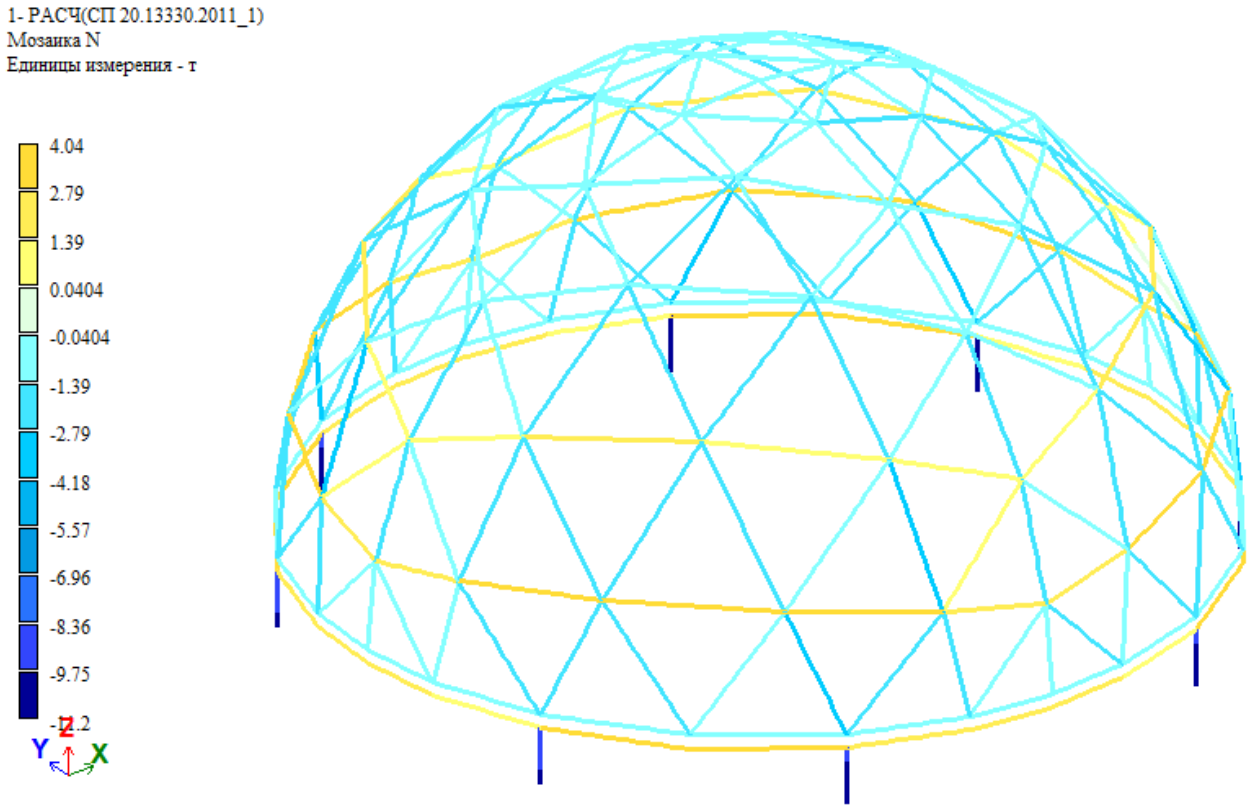


Рисунок 3.25 – Мозаика усилий N в стержнях (Вариант 3)

Показатели НДС геодезического купола из стали представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Сравнение показателей НДС

Материал	Варианты расчета	Анализ НДС	
		Z, мм	N, т
Сталь	1. На воздействии постоянных, снеговых и ветровых нагрузок	14,6	3,5
	2. На воздействии положительных и отрицательных температурно-климатических нагрузок	3,2	2,4
	3. На воздействии совместных нагрузок	14,5	4,04

По таблице сравнения показателей можно увидеть, что максимальные перемещения возникают в узлах стального купола при первой варианте расчета и его отличие от второго варианта расчета составляют 78,1 %.

Также можно увидеть, что на первом варианте расчета продольная усилия значительно больше чем на втором варианте расчета и их отличие составляет 31,4 %.

По результатам расчета первого варианта для элементов сетчатого купола сходя из наиболее нагруженных элементов, было подобрано два разных сечений

(профиль прямоугольный гнутый замкнутый сварной 50х40х2 для элементов опорного кольца и 80х60х2 для остальных элементов конструкций).

По результатам расчета второго варианта, было подобрано два разных сечений (профиль прямоугольный гнутый замкнутый сварной 80х60х2 для элементов опорного кольца и 70х50х2 для остальных элементов конструкций). Также были проверены 1 ПС и 2 ПС элементов конструкций.

По результатам расчета на совместные воздействия нагрузок, было подобрано два разных сечений (профиль прямоугольный гнутый замкнутый сварной 80х70х3 для элементов опорного кольца и 80х60х2 для остальных элементов конструкций). Также были проверены 1 ПС и 2 ПС элементов конструкций. Подобранные сечении профили соответствуют нормам [73].

3.4.2. Результаты расчета алюминиевого геодезического купола

Результаты расчета представлены на рисунках 3.26 – 3.34.

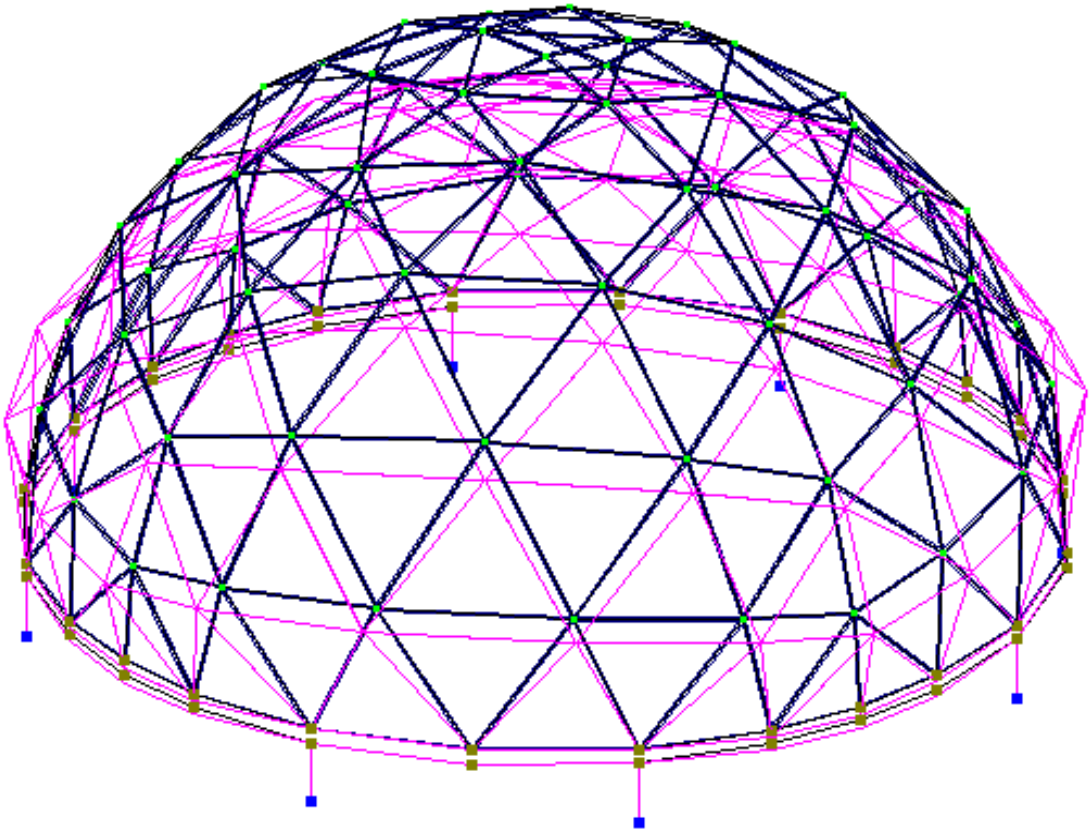


Рисунок 3.26 – Деформированная схема купола из алюминия (Вариант 1)

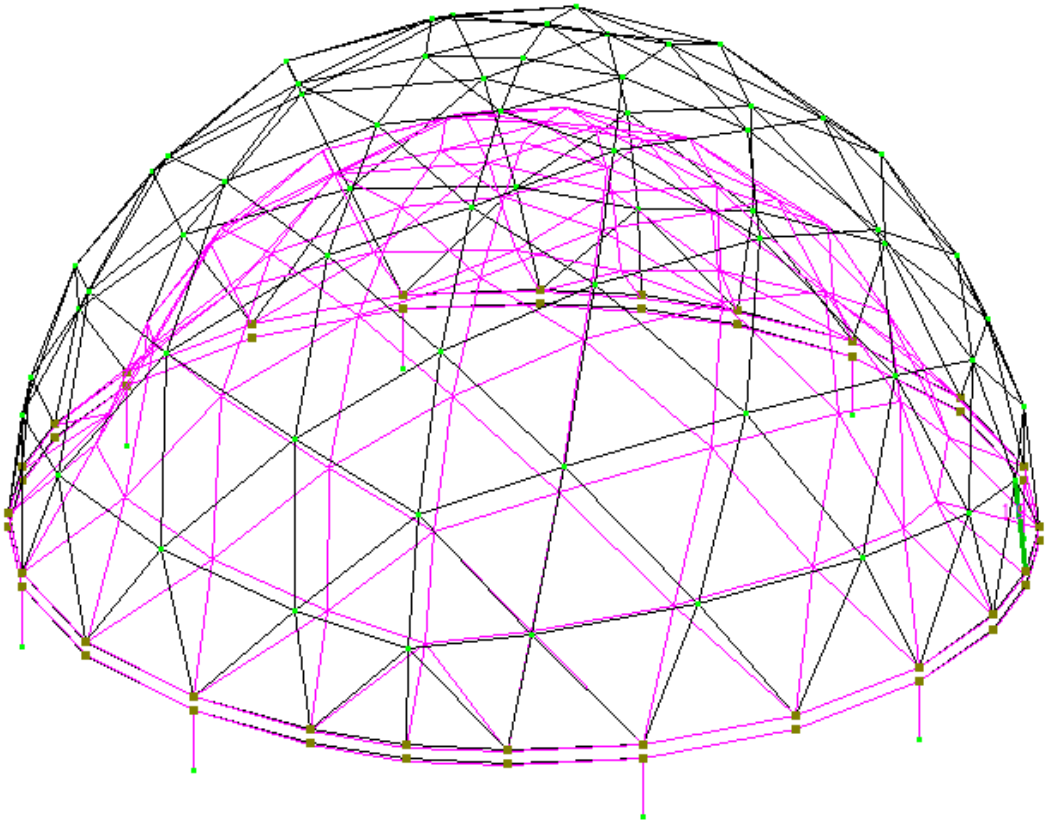


Рисунок 3.27 – Деформированная схема купола из алюминия (Вариант 2)

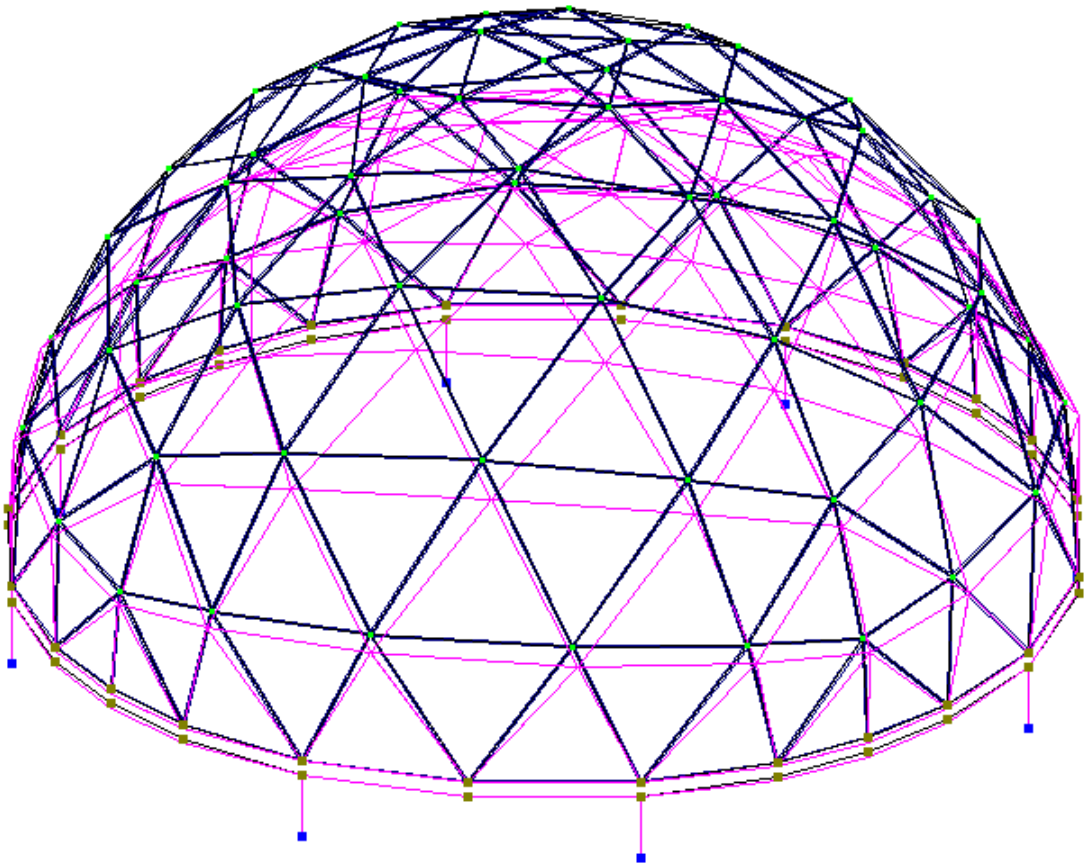


Рисунок 3.28 – Деформированная схема купола из алюминия (Вариант 3)

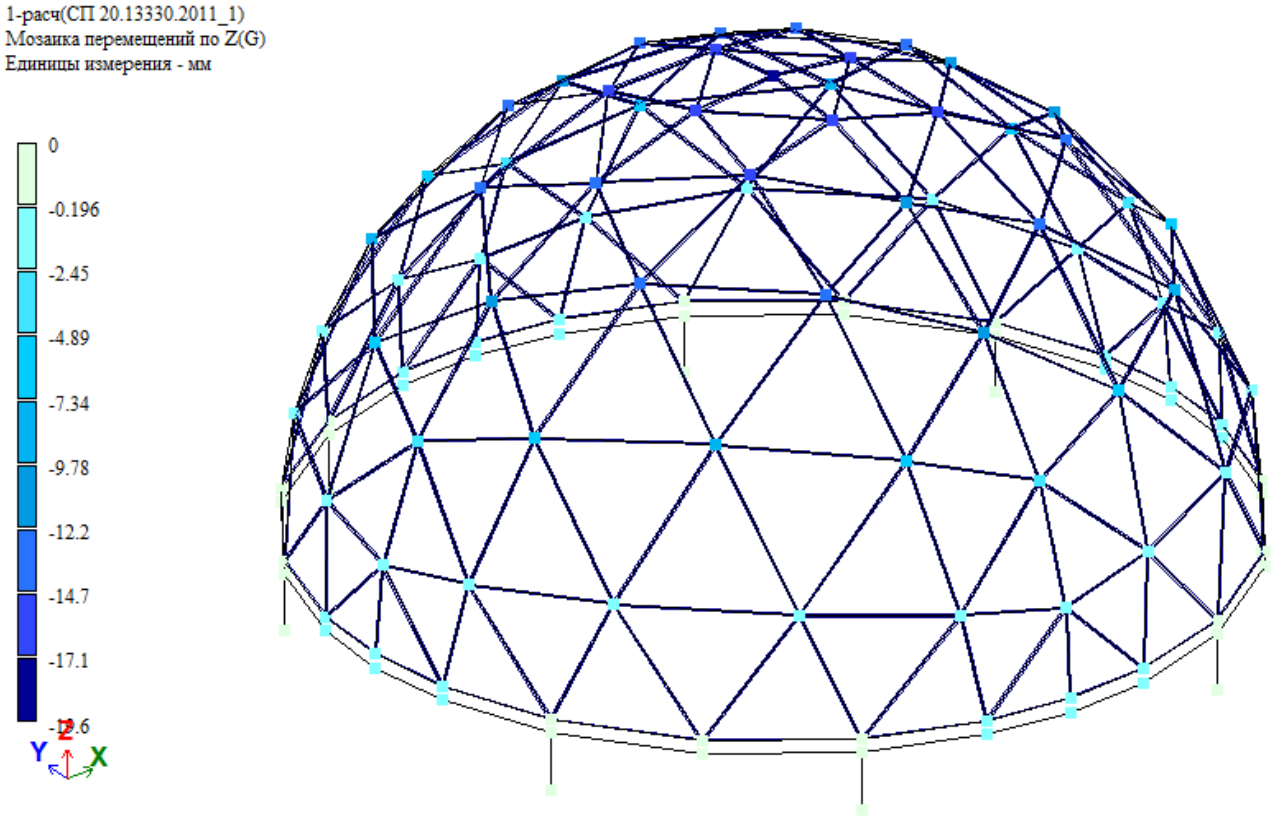


Рисунок 3.29 – Мозаика перемещений по Z (Вариант 1)

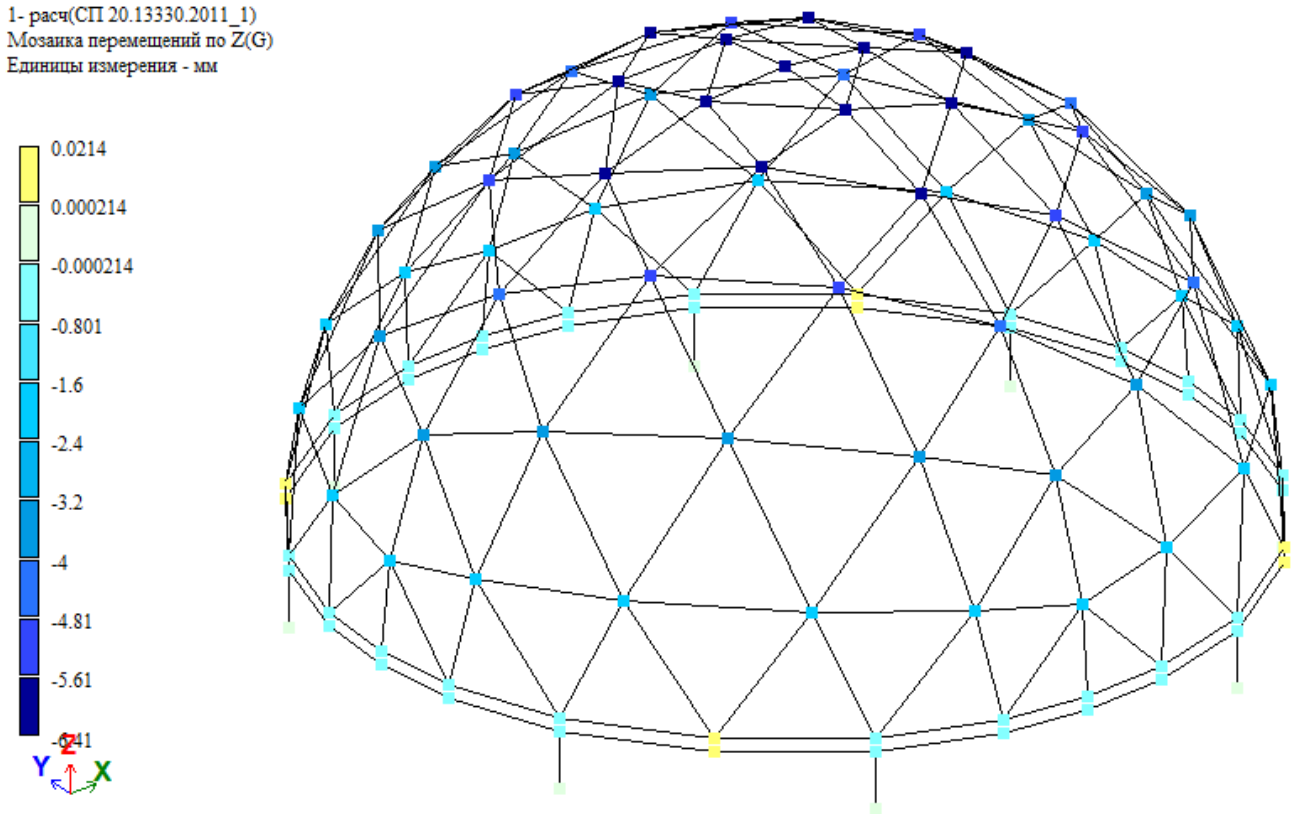


Рисунок 3.30 – Мозаика перемещений по Z(Вариант 2)

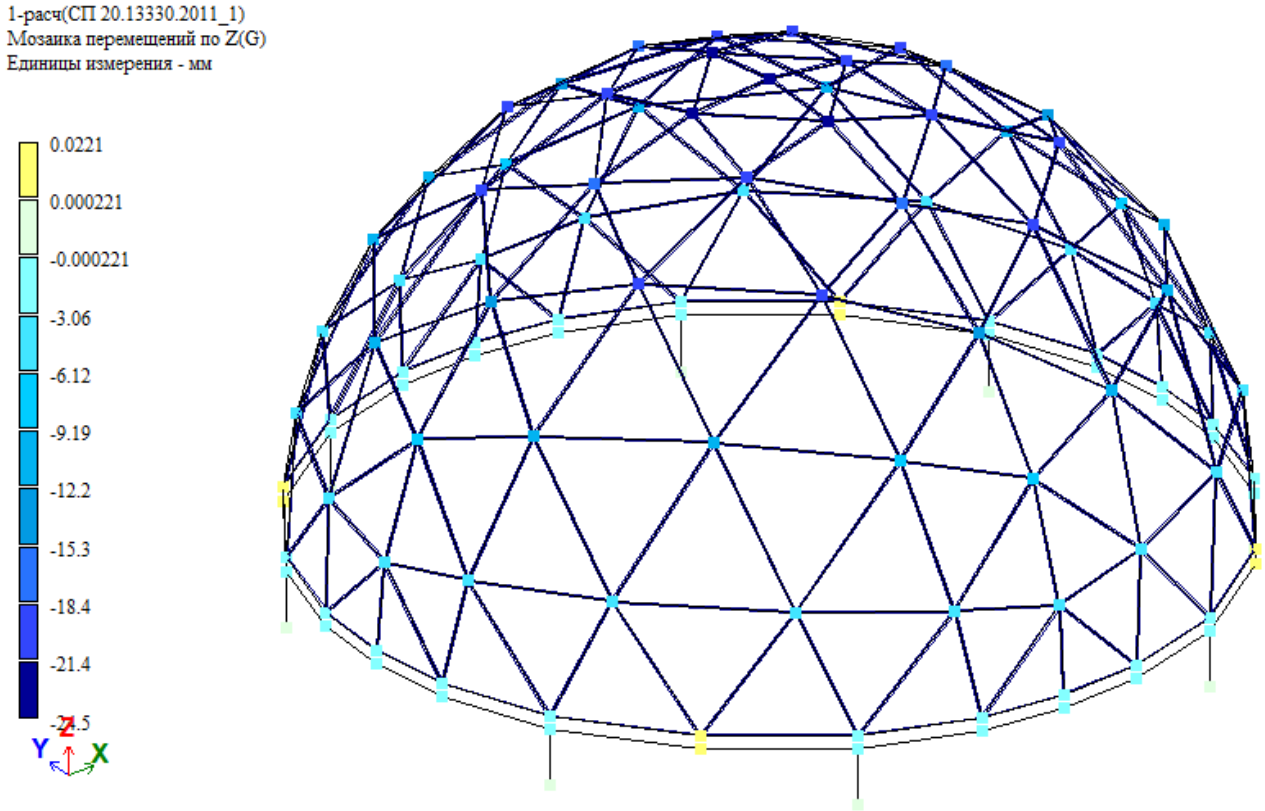


Рисунок 3.31 – Мозаика перемещений по Z (Вариант 3)

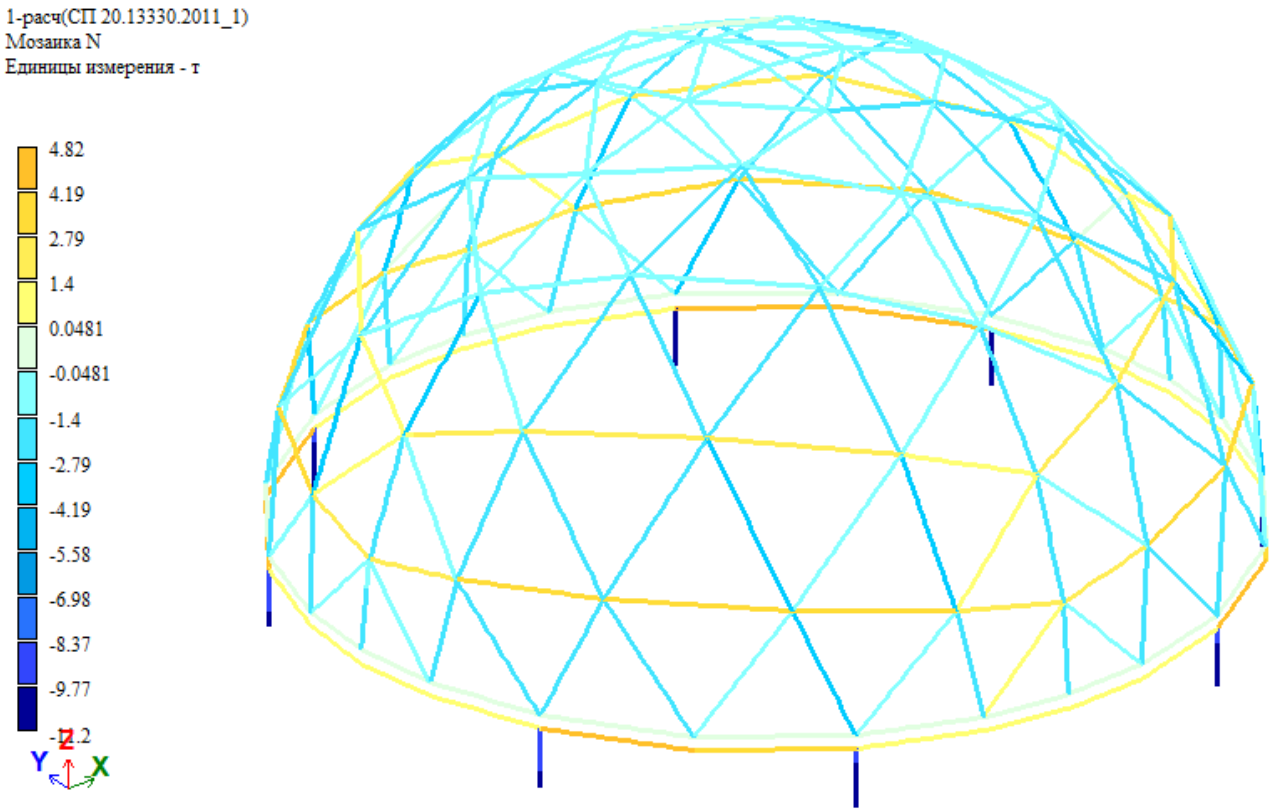


Рисунок 3.32 – Мозаика усилий N в стержнях (Вариант 1)

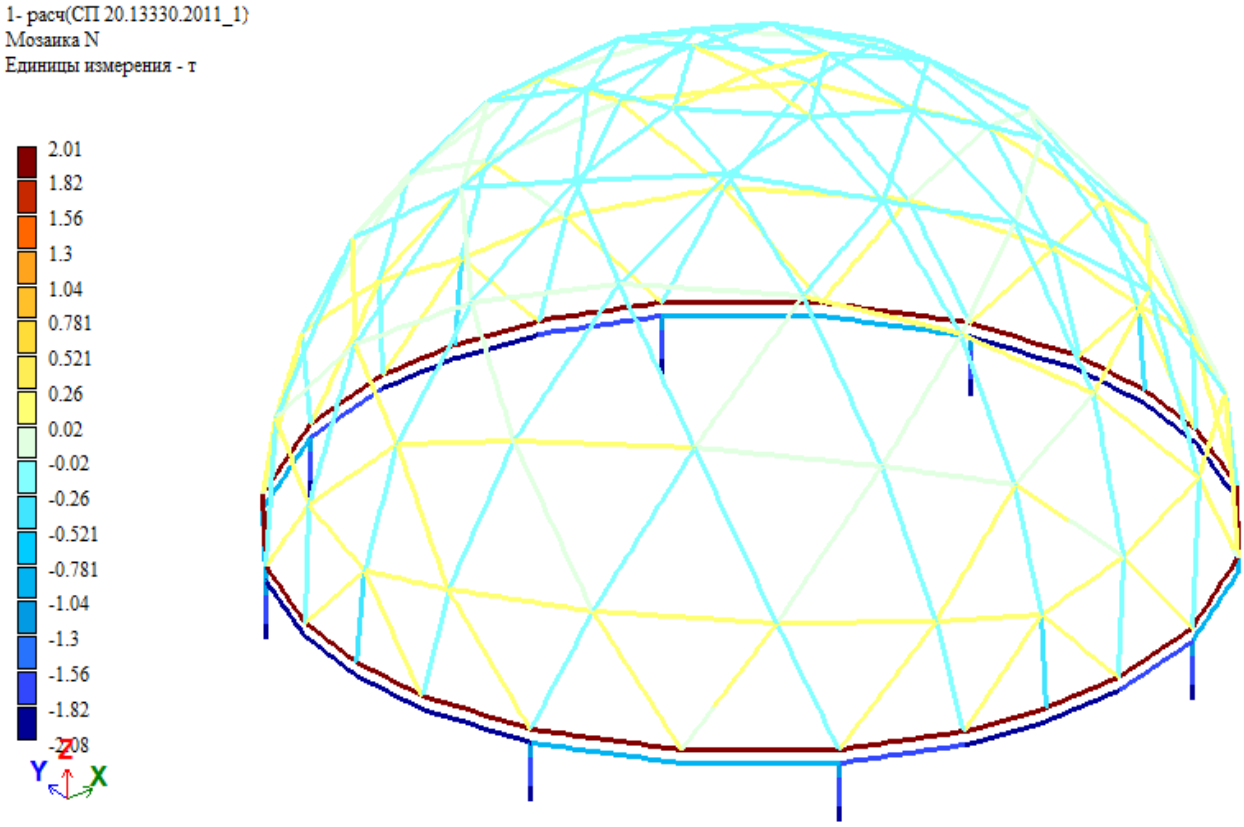


Рисунок 3.33 – Мозаика усилий N в стержнях (Вариант 2)

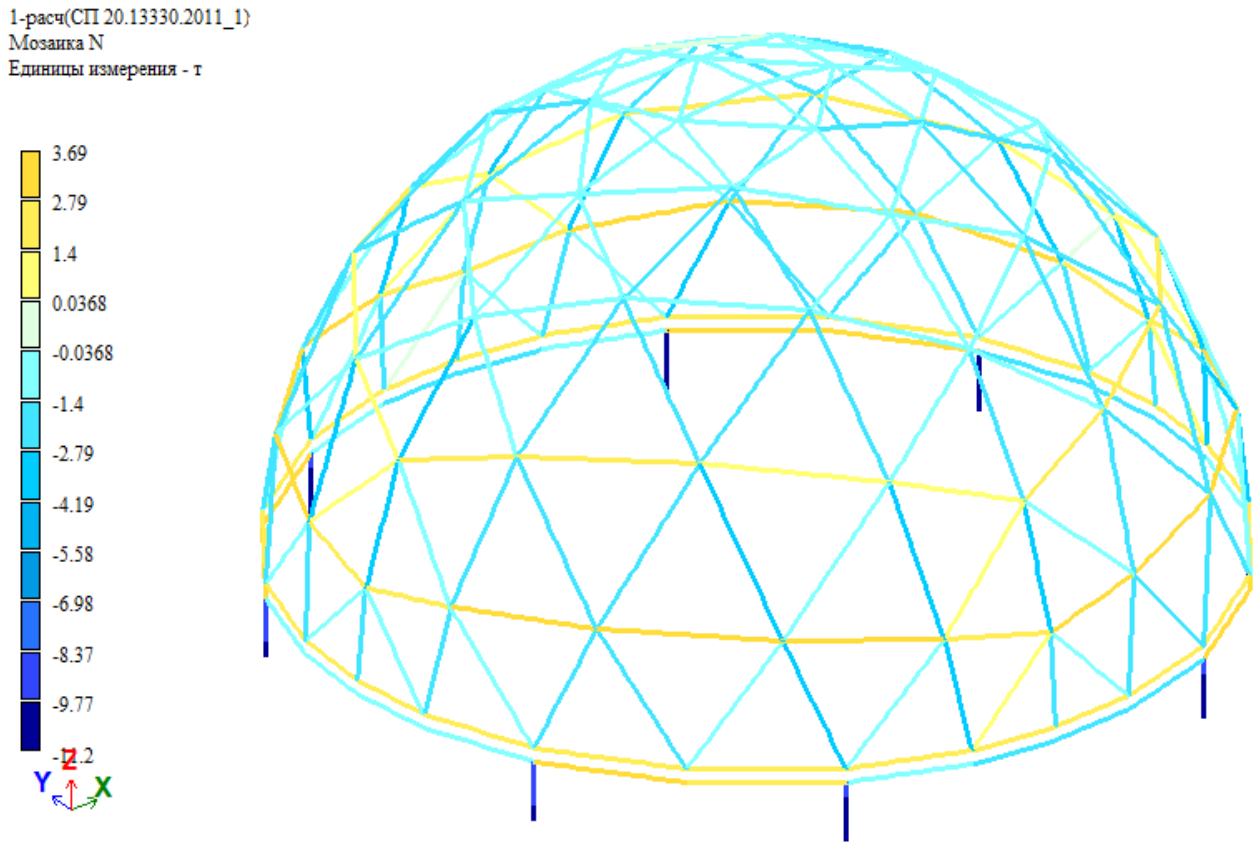


Рисунок 3.34 – Мозаика усилий N в стержнях (Вариант 3)

Показатели НДС геодезического купола из алюминия представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Сравнение показателей НДС

Материал	Варианты расчета	Анализ НДС	
		Z, мм	N, т
Алюминий	1. На воздействии постоянных, снеговых и ветровых нагрузок	19.6	3.7
	2. На воздействии положительных и отрицательных температурно-климатических нагрузок	6.4	2.01
	3. На воздействии совместных нагрузок	24.5	3.69

По таблице сравнения показателей можно увидеть, что максимальные перемещения возникают в узлах алюминиевого купола при первой варианте расчета и его отличие от второго варианта расчета составляют 67,3 %.

Также можно увидеть, что на первом варианте расчета продольная усилия значительно больше чем на втором варианте расчета и их отличие составляет 45,7%.

По результатам расчета первого варианта для элементов сетчатого купола исходя из наиболее нагруженных элементов, было подобрано одна сечения (профиль № 400558 с размерами b=30 мм; h=20 мм; s=2 мм; An=5,966 см^2 - для элементов опорного кольца и для остальных элементов конструкций купола).

По результатам расчета второго варианта, было подобрано одна сечения (профиль № 400558 с размерами b=30 мм; h=20 мм; s=2 мм; An=5,966 см^2 - для элементов опорного кольца и для остальных элементов конструкций).

По результатам расчета на совместные воздействия нагрузок, было подобрано одна сечения (профиль № 400558 с размерами b=30 мм; h=20 мм; s=2 мм; An=5,966 см^2 - для элементов опорного кольца и для остальных элементов конструкций). А также были проверены 1 ПС и 2 ПС элементов конструкций. Подобранные сечении профили соответствуют нормам [74].

3.4.3. Результаты расчета деревянного геодезического купола

Результаты расчета представлены на рисунках 3.35 – 3.43.

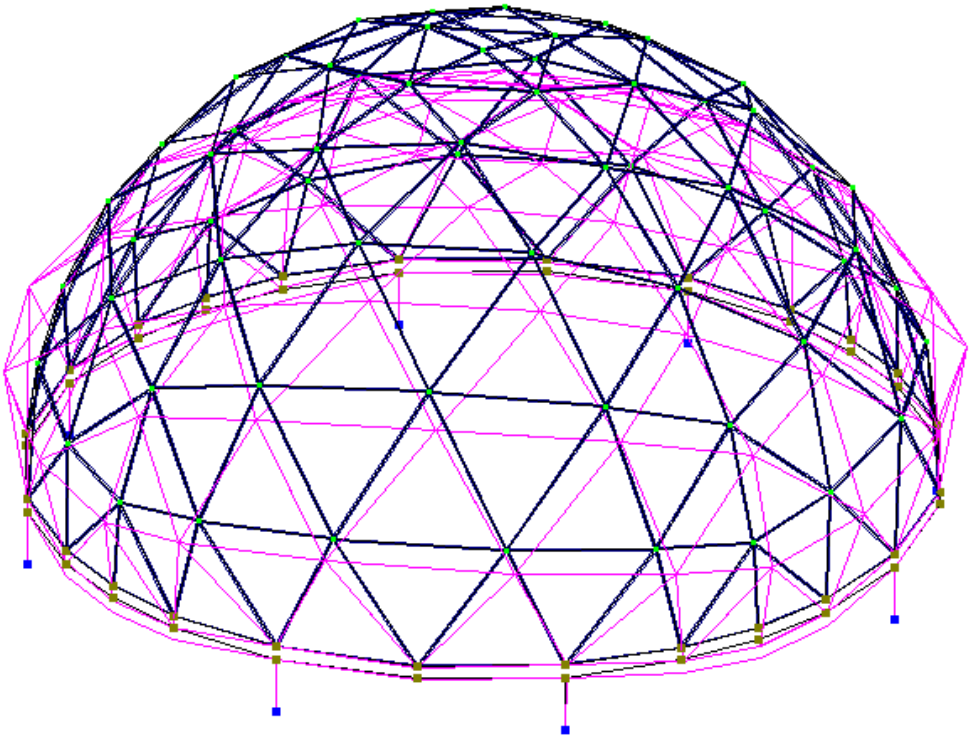


Рисунок 3.35 – Деформированная схема купола из древесины (Вариант 1)

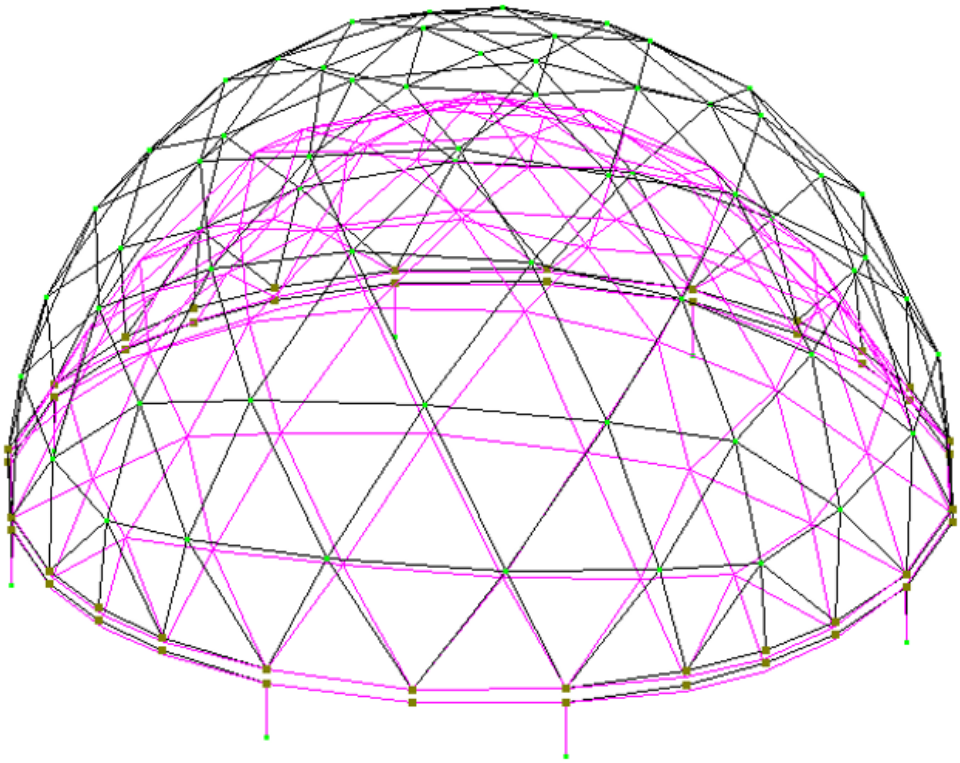


Рисунок 3.36 – Деформированная схема купола из древесины (Вариант 2)

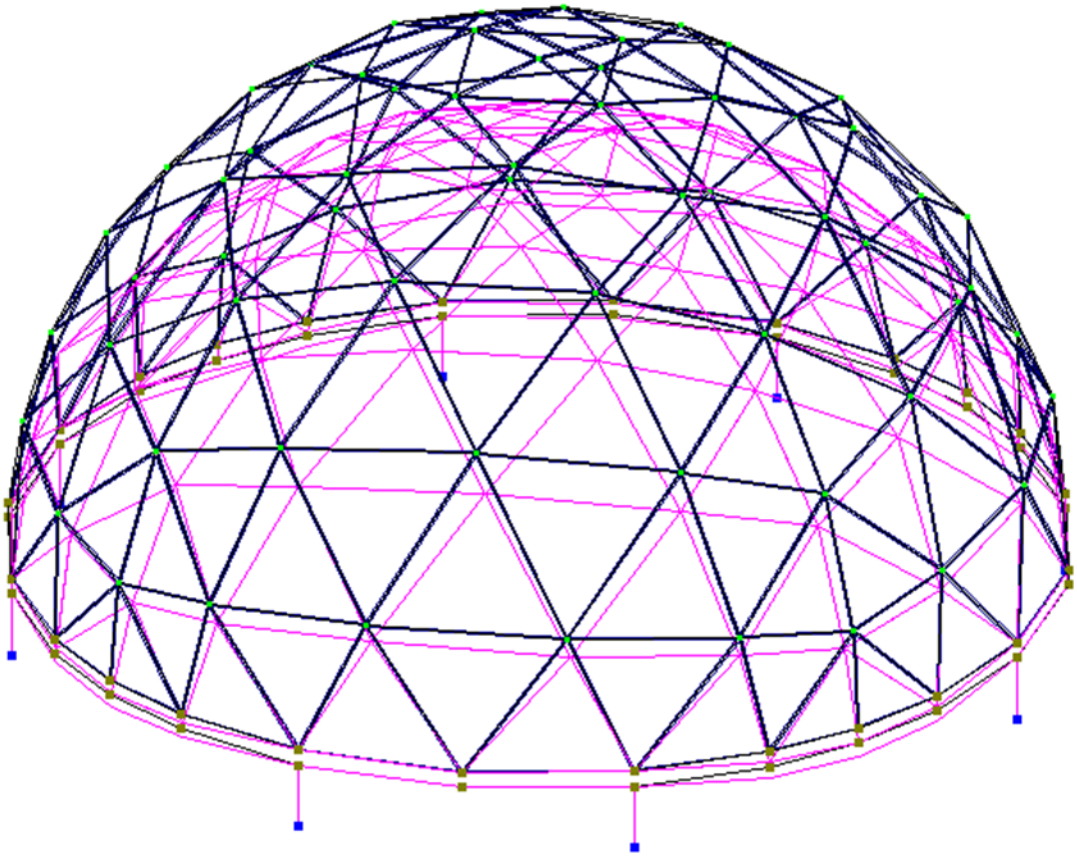


Рисунок 3.37 – Деформированная схема купола из древесины (Вариант 3)

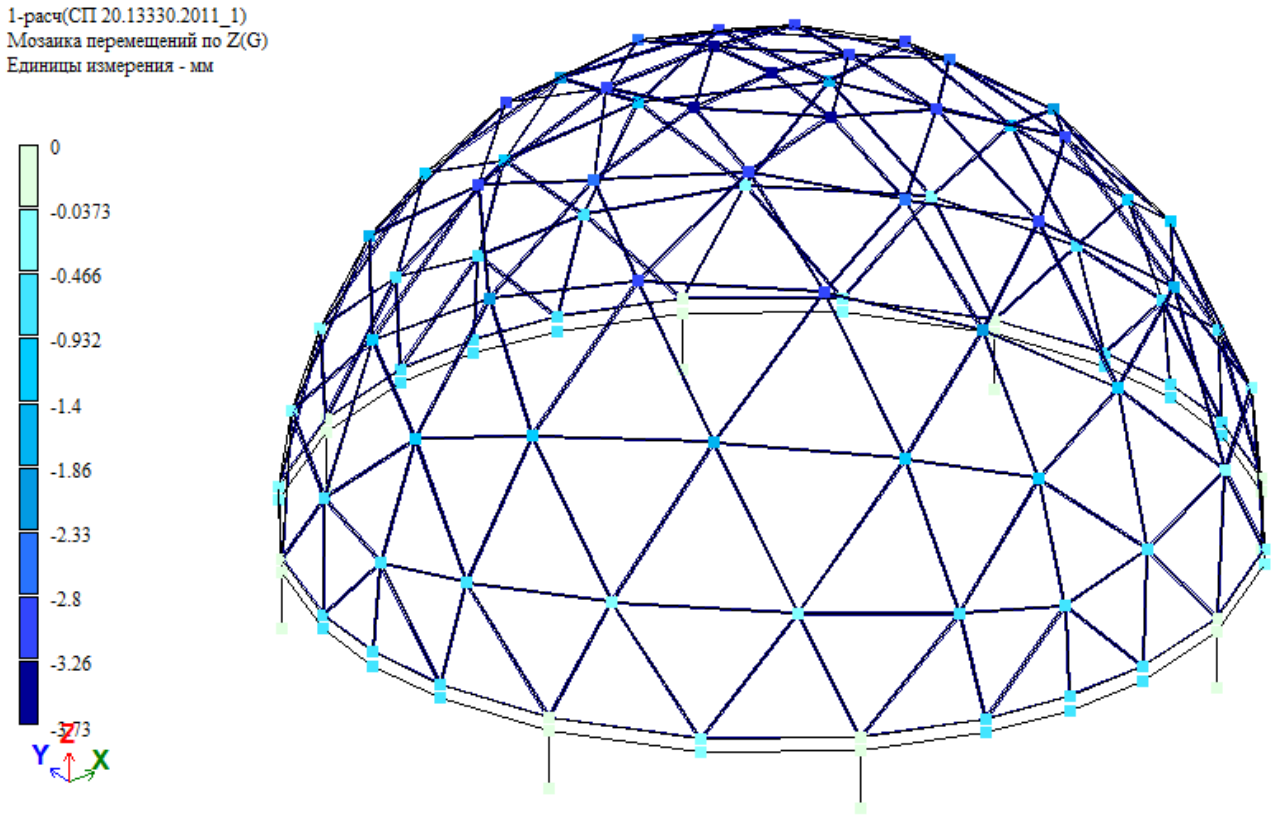


Рисунок 3.38 – Мозаика перемещений по Z (Вариант 1)

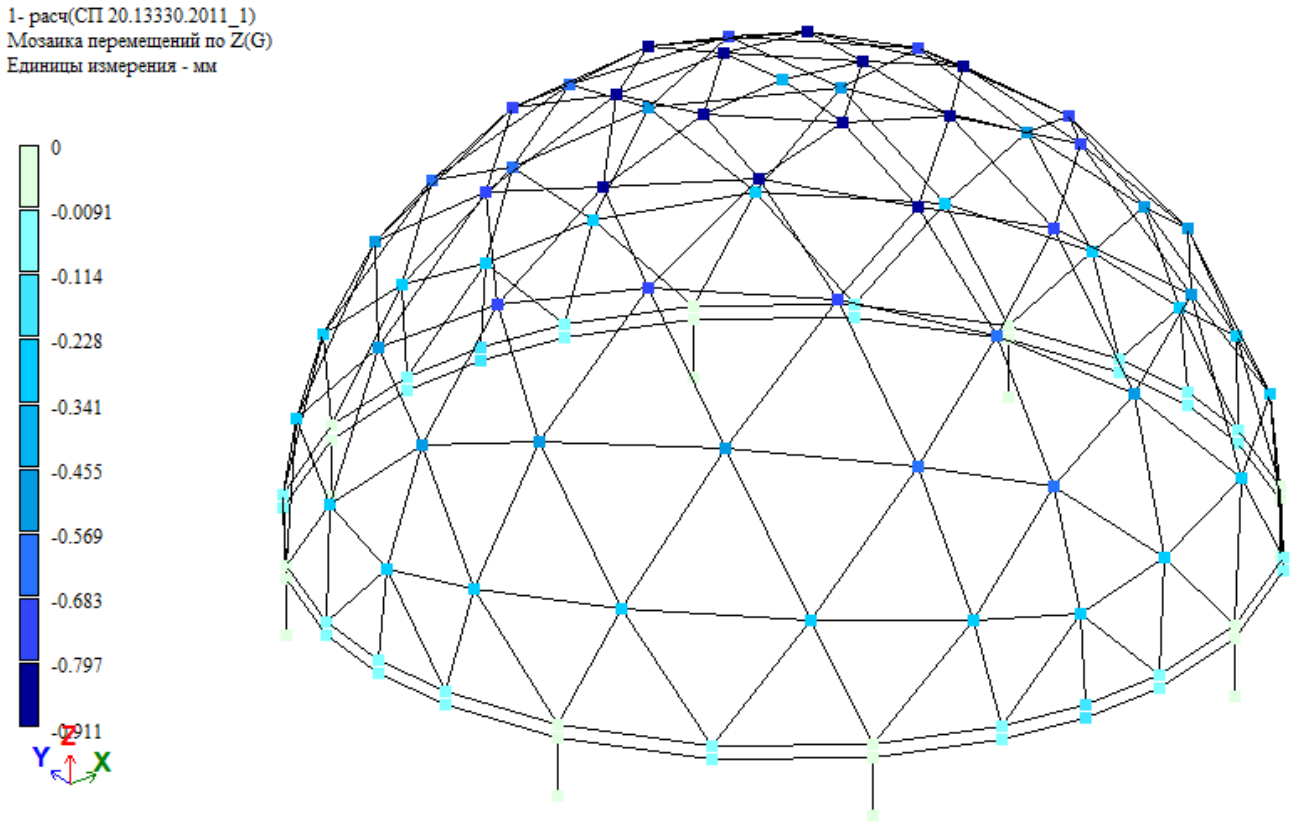


Рисунок 3.39 – Мозаика перемещений по Z (Вариант 2)

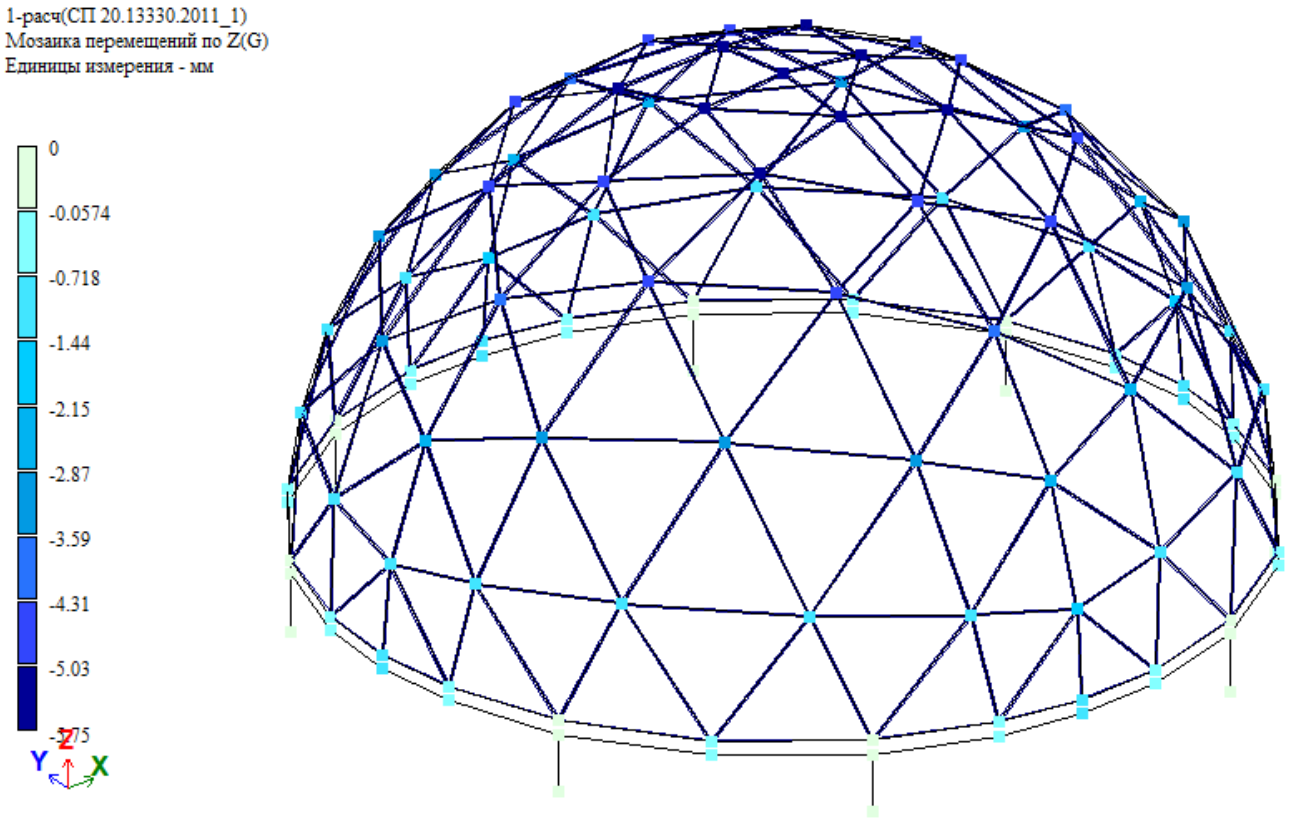


Рисунок 3.40 – Мозаика перемещений по Z (Вариант 3)

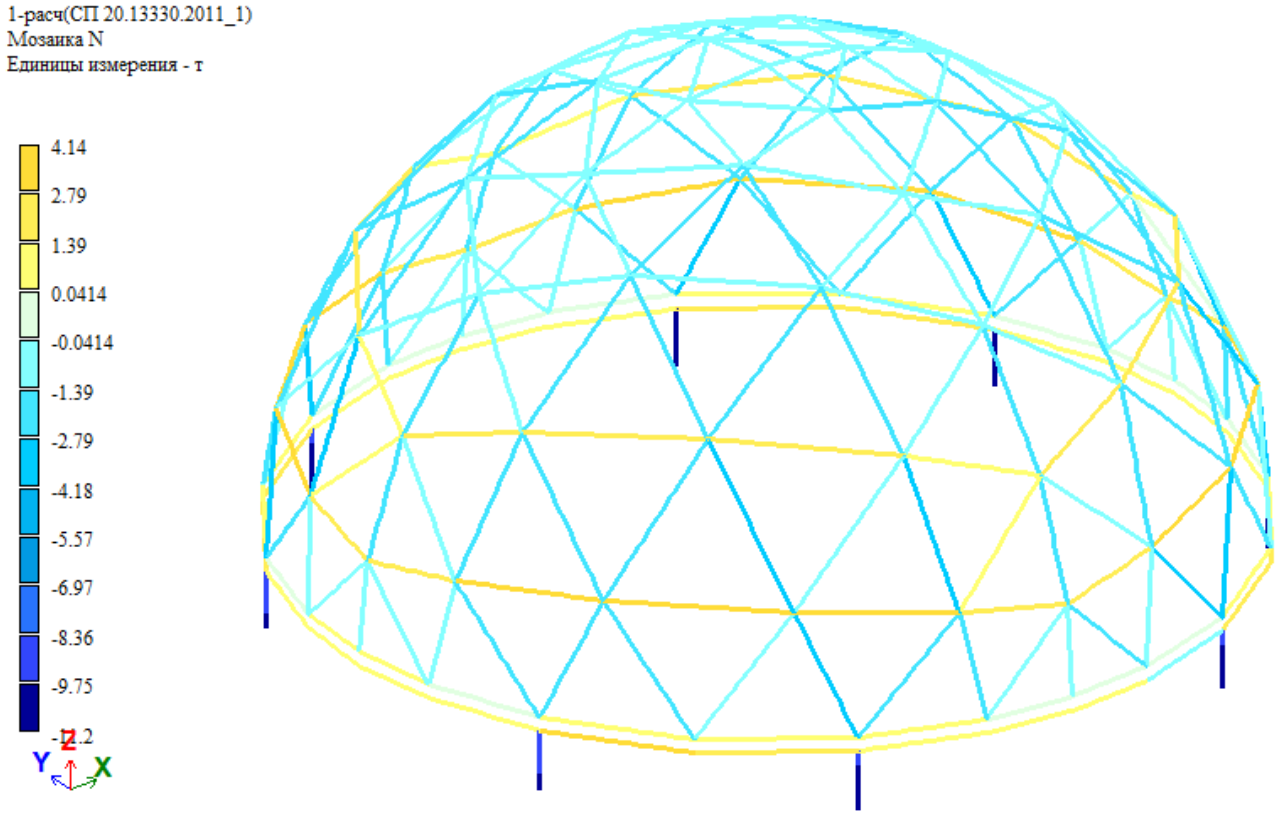


Рисунок 3.41 – Мозаика усилий N в стержнях (Вариант 1)

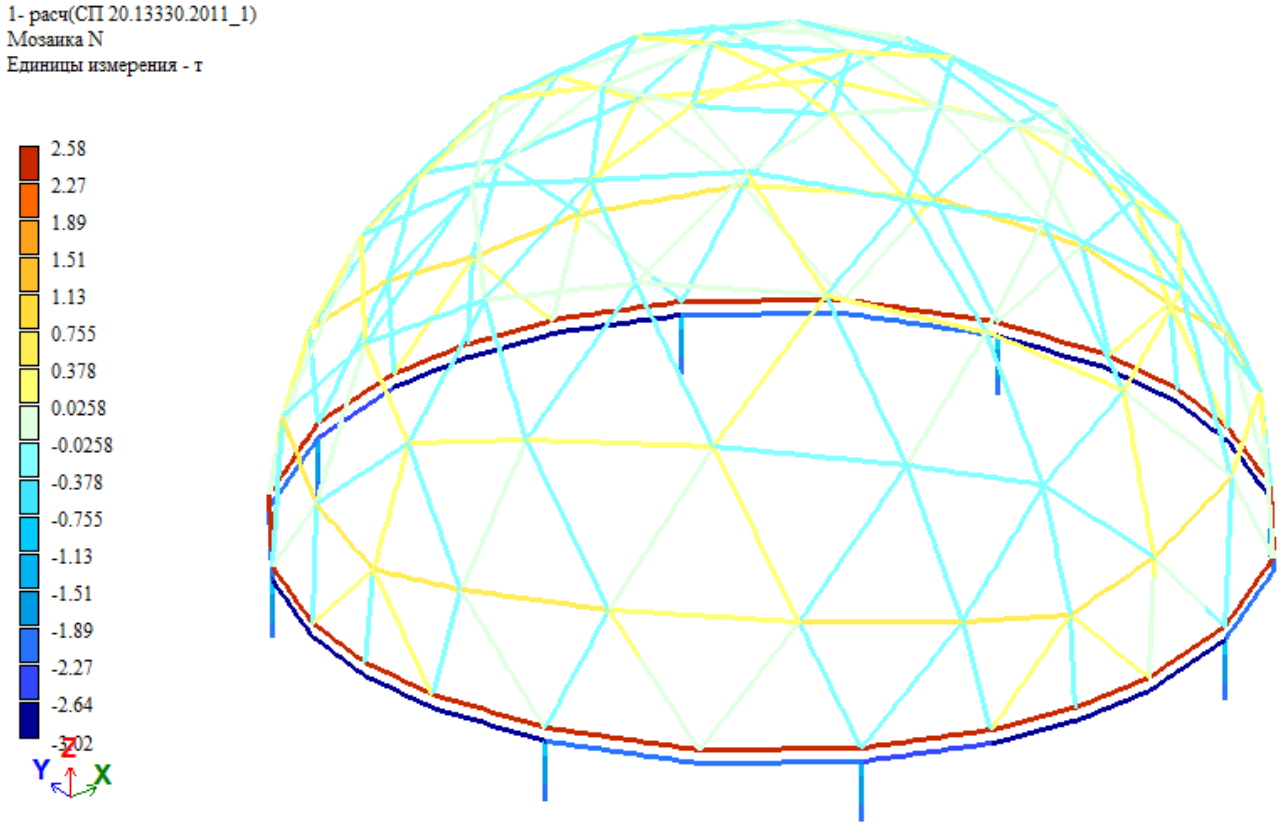


Рисунок 3.42 – Мозаика усилий N в стержнях (Вариант 2)

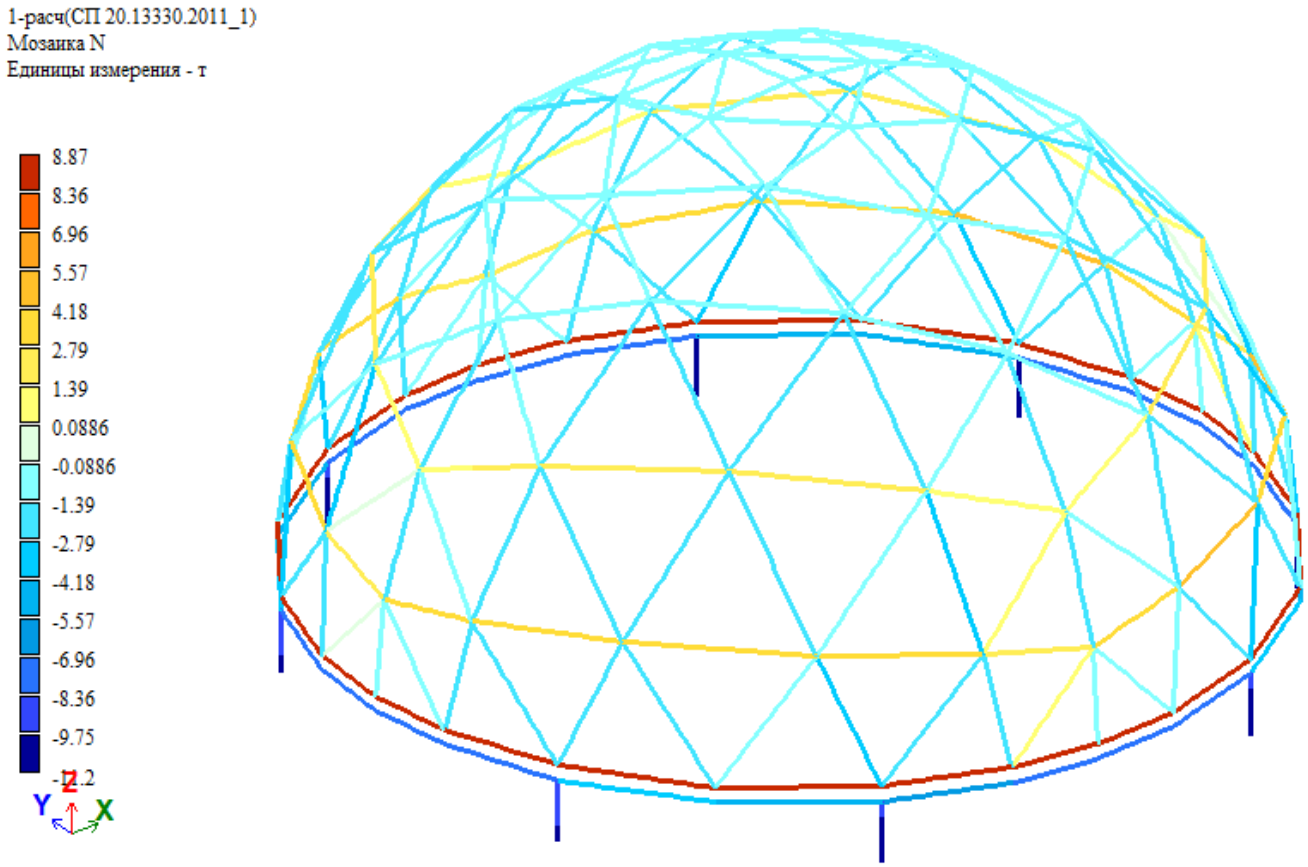


Рисунок 3.43 – Мозаика усилий N в стержнях (Вариант 3)

Показатели НДС геодезического купола из древесины представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Сравнение показателей НДС

Материал	Варианты расчета	Анализ НДС	
		Z, мм	N, т
Древесина	1. На воздействии постоянных, снеговых и ветровых нагрузок	3.7	4.1
	2. На воздействии положительных и отрицательных температурно-климатических нагрузок	0.9	2.6
	3. На воздействии совместных нагрузок	5.75	8.87

По таблице сравнения показателей можно увидеть, что максимальные перемещения возникают в узлах деревянного купола при первой варианте расчета и его отличие от второго варианта расчета составляют 75,7 %.

Также можно увидеть, что на первом варианте расчета продольная усилия значительно больше чем на втором варианте расчета и их отличие составляет 36,6 %.

По результатам расчета первого варианта для элементов сетчатого купола исходя из наиболее нагруженных элементов, было подобрано два разных сечений (клееной древесины, состоящими из 2 досок сечением 26х110 мм - для элементов опорного кольца и 4 досок сечением 26х110 мм - для остальных элементов конструкций).

По результатам расчета второго варианта, было подобрано одна сечения (клееной древесины, состоящими из 2 досок сечением 26х110 мм для элементов опорного кольца и для остальных элементов конструкций купола).

По результатам расчета на совместные воздействия нагрузок, было подобрано два разных сечений (клееной древесины, состоящими из 6 досок сечением 26х110 мм - для элементов опорного кольца и 4 досок сечением 26х110 мм - для остальных элементов конструкций). Также были проверены 1 ПС и 2 ПС элементов конструкций. Подобранные профили соответствуют нормам [75].

3.5. Расчет стоимости элементов геодезического купола

По результатам расчета 1-го, 2-го и 3-го варианта для элементов геодезического купола исходя из наиболее нагруженных элементов, было подобрано несколько разных сечений элементов. В окончательном варианте чтобы унифицировать все элементы выбрано только 2 сечений. А также было определено общая стоимость конструкций купола. Результаты представлены в таблицах 3.9, 3.10 и 3.11.

Таблица 3.9 – По результатам 1-го варианта расчета

№ п/п	Материал	Сечения элемента, мм	Общая стоимость в руб.
Элементы опорного кольца			
1	Сталь	Профиль прямоугольный гнутый замкнутый сварной 50х40х2	3073.26
Остальные элементы			
2	Сталь	Профиль прямоугольный гнутый замкнутый сварной 80х60х2	50609.96
		Итого:	53683.22
Элементы опорного кольца			
3	Алюминий	Профили прессованные прямоугольные полосооб-разного сечения b=30 мм; h=20 мм	3878.72

№ п/п	Материал	Сечения элемента, мм	Общая стоимость в руб.
Остальные элементы			
4	Алюминий	Профили прессованные прямоугольные полосооб-разного сечения b=30 мм; h=20 мм	39940.4
		Итого:	43819.12
Элементы опорного кольца			
5	Древесина	Клееной древесины, состоящими из 2 досок сечением 26х110 мм	805.15
Остальные элементы			
6	Древесина	Клееной древесины, состоящими из 4 досок сечением 26х110 мм	16523.73
		Итого:	17328.88

Таблица 3.10 – По результатам 2-го варианта расчета

№ п/п	Материал	Сечения элемента, мм	Общая стоимость в руб.
Элементы опорного кольца			
1	Сталь	Профиль прямоугольный гнутый замкнутый сварной 80х60х2	4914.87
Остальные элементы			
2	Сталь	Профиль прямоугольный гнутый замкнутый сварной 70х50х2	43000.35
		Итого:	47915.22
Элементы опорного кольца			
3	Алюминий	Профили прессованные прямоугольные полосооб-разного сечения b=30 мм; h=20 мм	3878.72
Остальные элементы			
4	Алюминий	Профили прессованные прямоугольные полосооб-разного сечения b=30 мм; h=20 мм	39940.4
		Итого:	43819.12
Элементы опорного кольца			
5	Древесина	Клееной древесины, состоящими из 2 досок сечением 26х110 мм	844.56
Остальные элементы			
6	Древесина	Клееной древесины, состоящими из 2 досок сечением 26х110 мм	8290.85
		Итого:	9135.41

Таблица 3.11 – По результатам совместного воздействия нагрузок

№ п/п	Материал	Сечения элемента, мм	Общая стоимость в руб.
Элементы опорного кольца			
1	Сталь	Профиль прямоугольный гнутый замкнутый сварной 80х70х3	7741.80

№ п/п	Материал	Сечения элемента, мм	Общая стоимость в руб.
Остальные элементы			
2	Сталь	Профиль прямоугольный гнутый замкнутый сварной 80х60х2	50609.96
		Итого:	58351.76
Элементы опорного кольца			
3	Алюминий	Профили прессованные прямоугольные полосооб-разного сечения b=30 мм; h=20 мм	3878.72
Остальные элементы			
4	Алюминий	Профили прессованные прямоугольные полосооб-разного сечения b=30 мм; h=20 мм	39940.4
		Итого:	43819.12
Элементы опорного кольца			
5	Древесина	Клееной древесины, состоящими из 6 досок сечением 26х110 мм	2392.92
Остальные элементы			
6	Древесина	Клееной древесины, состоящими из 4 досок сечением 26х110 мм	16523.73
		Итого:	18916.65

Выводы по третьей главе

Элементы расчетной схемы моделировались для признака схемы №5 (шесть степеней свободы в узле). В качестве конечного элемента был выбран КЭ-5 пространственной рамы, имеющий возможность располагаться в плоскости произвольно. Узлы сетчатого геодезического купола в расчетной схеме принимались шарнирными.

Напряженно-деформированное состояние сетчатого геодезического купола изучалось по пространственной схеме от действия равномерных сил, приложенных в элементах конструкция купола.

1. По результатам статического расчета и подбора сечений элементов конструкций геодезического купола с разными жесткостными характеристиками из таких материалов как, сталь, алюминий и древесина можно сделать вывод:

2. В результате проведенных исследований на расчетных моделях сетчатого геодезического купола установлено, что большие влияние на конструкции купола приходится с 1-го варианта нагрузок, так как возникают максимальные продольные усилия и перемещения в расчетной схеме.

3. Результаты исследований показывают, что в первом варианте расчета вклад в напряженно-деформированное состояние элементов конструкций геодезического купола составляет: 20 % от собственного веса и веса от покрытия, 39.1 % от снеговых и 40.9 % от ветровых нагрузок. А на втором варианте расчета вклад в напряженно-деформированное состояние элементов конструкций купола составляет: 19.6 % от средней температуры в теплое время, 34 % от средней температуры в холодное время, 5.7 % от перепада температуры в теплое время и 40.7 % от перепада температуры в холодное время года.

4. По результатам расчета стоимости элементов сетчатого геодезического купола общая стоимость составляет для: элементов купола из стали - 58351.76 руб.; элементов купола из алюминий- 43819.12 руб.; элементов купола из древесины - 18916.65 руб.

5. По результатам статического расчета сетчатого геодезического купола 1-й вариант (на воздействии постоянных, снеговых и ветровых нагрузок), 2-й вариант (на воздействии положительных и отрицательных температурно-климатических нагрузок), 3-й вариант (на воздействии совместных нагрузок) в условиях Крайнего Севера в программном комплексе ЛИРА-САПР, минимальные показатели перемещений соответствует, купол из древесины, а максимальные показатели перемещений соответствует, куполов из стали и алюминия.

6. Результаты данного исследования могут быть использованы для дальнейших научных разработок в области купольного строительства.

Также по результатам расчета были выполнены два варианта конструктивные решения узловых соединений геодезического купола, которые представлены в приложения А на рисунках А3-А22.

Заключение

Геодезические системы можно отнести к сооружениям, которые одновременно надежны, композиционно сочетаемые со многими формами и неприхотливы в эксплуатации, а также энергоэффективны.

Достоинства геодезических систем: строительство зданий и сооружений различного функционального назначения; малая масса при небольшом внутреннем пространстве; малое число типоразмеров элементов купола; своеобразная пластика поверхности, определяемая вариантом разбивки; отсутствие необходимости в дополнительной декоративной доработке; строительство в сейсмических зонах; значительная прочность системы; геодезическая решетка – самая экономичная структурная система; самое выгодное отношение площади наружных ограждений к объёму; на четверть меньше расхода материала по сравнению с кубической поверхностью; меньшая площадь поверхности, на которую действует окружающая среда; аэродинамический эффект купола; энергоэффективность.

Сетчатые купола, а именно геодезические – это одни из лучших покрытий по многим параметрам для перекрытия больших пролетов и придания архитектурной выразительности зданию или сооружению в целом. Во многих странах данные конструкции давно зарекомендовали себя и используются для уникальных гражданских, а также промышленных сооружений, которые поражают своей красотой и практичностью.

Таким образом, на примере металлического, алюминиевого и деревянного купола нами продемонстрировано, что для проектирования уникальных и технически сложных сооружений требуется применение современных программных комплексов, позволяющих в необходимом объеме учитывать напряженно-деформированное состояние всех элементов конструкции, а также анализировать различные варианты исполнения.

Список использованных источников

1. Дзюба, А.С. Геодезические системы /А.С. Дзюба, Т.П. Билюшова // Архитектура и дизайн: история, теория, инновации. –2018. –№ 3. –С. 239-242.
2. Fuller, R.B. No Title /R.B. Fuller// Archit. Design. –1961. –№ 7 (31). –С. 290–319.
3. Rosen, S. Wisard of the dome R. Buckminster Fuller, designer for the future / S. Rosen // S. Rosen, Boston-Toronto: Zittle, Brown and co., –1969. –189 с.
4. Панова, Я.В. Эффективная строительная система геодезический купол / Я.В. Панова, С.В. Демидов // В сборнике: Череповецкие научные чтения - 2014. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. ред. К.А. Харахнин. –2015. –С. 39-43.
5. Алпатов, В.Ю. Оптимизация геометрической формы пространственно-стержневых конструкций / В.Ю. Алпатов, И.С. Холопов // Металлические конструкции. –2009. –№1 (15). –С. 47–57.
6. Райт, Д.Т. Большепролетные сетчатые оболочки. Том 1 / Д.Т. Райт // М.: Стройиздат. –1969. –308 с.
7. Туполев, М.С. Новые виды пространственных покрытий / М.С. Туполев // М.: МАрхИ, –1963. –37 с.
8. Friedrich, B. Buckling strength of metal structures / B. Friedrich, New York-Toronto-London: McGraw-Hill, –1952. –544 с.
9. Савельев, В.А. Прочность и устойчивость металлических сетчатых большепролетных куполов: специальность 05.00.00 "Строительные материалы и изделия": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Савельев, Виталий Алексеевич. Москва, 1966. –161 с.
10. Тимошенко, С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек / С.П. Тимошенко // М.: Наука. –1971. –807 с.
11. Алпатов, В.Ю. Компьютерное моделирование и численные исследования узловых соединений структурных конструкций / В.Ю. Алпатов // Градостроительство и архитектура. –2016. –№ 25 (4). –С. 19–22.

12. Клименко, М.Ю. Перспективы использования геодезических куполов в условиях Арктики / М.Ю. Клименко, Н.Г. Царитова, С.А. Чернушкина // Тенденции развития науки и образования. –2020. –№ 61-7. –С. 54-58.
13. Животов, Д.А. Технология возведения деревянного геодезического купола с учетом результатов эксперимента / Д.А. Животов, Ю.И. Тилинин // Актуальные проблемы военно-научных исследований. –2020. –№ S10 (11). –С. 27-36.
14. Наджмудинов, А.Х. Напряженно-деформированная состояния геодезических куполов в условиях Крайнего Севера / А.Х. Наджмудинов, С.С. Зимин // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, Инженерно-строительный институт. В 3 ч., Санкт-Петербург, 26–30 апреля 2021 года / отв. ред. Н. Д. Беляев, В. В. Елистратов. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2021. – С. 3-5.
15. Фалилеева, А.А. Выбор материалов куполов / А.А. Фалилеева, М.В. Чечель // Современные проблемы строительства зданий и сооружений в суровых условиях. Сборник материалов I Всероссийской научно-практической конференции строителей. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет»; ответственный редактор Н.П. Сигачев. – 2018. –С. 21-24.
16. Тур, В.И. Влияние податливости узловых соединений на напряженно-деформированное состояние металлического сетчатого купола / В.И. Тур, А.В. Тур // Фундаментальные исследования. –2014. –№ 6 (6). –С. 1165–1168.
17. Дериглазов, О.Ю. Разработка, конструирование и исследование деревянного ребристо-кольцевого купола с блоками жесткости и сборно-разборными узлами: специальность 05.23.01 "Строительные конструкции, здания и сооружения": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук //Дериглазов Олег Юрьевич Томск, 2007. –187 с.

18. Тур, А.В. Автоматизированная программа подготовки исходных данных для расчета сетчатых куполов разрезки Кайвитта / А.В. Тур // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. –2011. –№ 3. – С. 116–119.
19. Тур, В.И. Изменение напряженно-деформированного состояния сетчатого купола при исключении из работы одного узлового соединения / В.И. Тур, А.В. Тур // Строительство и реконструкция. –2015. –№ 58 (2). –С. 42–46.
20. Тур, В.И. Исследование узловых соединений металлического купола/ В.И. Тур, А.В. Тур // Фундаментальные исследования. –2016. –№ 1 (9). –С. 75–79.
21. Холопов, И.С. Исследование напряженно деформированного состояния узлового соединения сетчатого купола / И.С. Хлопов, В.И. Тур, А.В. Тур // Известия высших учебных заведений. Строительство. –2012. –№ 4. –С. 104–111.
22. Чернявская, А.Е. Расчет геодезических куполов с использованием ПК ЛИРА-САПР / А.Е. Чернявская, М.А. Мурый //Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. –2018. Т. 1. –С. 431-434.
23. Бугакова, Т.Ю. 3D-моделирование и визуализация деформации поверхности на примере купола новосибирского планетария / Т.Ю. Бугакова, М.М. Шляхова //Интерэкспо Гео-Сибирь. –2015. Т. 7. –С. 63-67.
24. Самохвалов, И.А. Сравнительный анализ работы сетчатых куполов среднего диаметра в зависимости от их формы / И.А. Самохвалов, А.И. Пахомов, Н.Ю. Трянина //Современные тенденции развития науки и технологий. –2015. –№ 6-6. –С. 101-105.
25. Таскин, И.А. Распределение усилий между рёбрами и настилом в пологом сетчатом куполе / А.И. Таскин // Архитектура и строительство. –2016. –№ 3. –С. 110-115.
26. Лахов, А.Я. Стереовизуализация результатов расчетов на прочность геодезических куполов на проекционной системе / А.Я. Лахов // Инженерный вестник Дона. –2016. –№ 3 (42). –С. 33.

27. Романович, А.Н. Геодезические купола. Общие сведения. Особенности применения и расчёта / А.Н. Романович // Современные инновации. –2016. – № 6 (8). –С.22-23.
28. Есипова, А.А. Применение геодезических куполов в строительстве: преимущество и недостатки / А.А. Есипова // Наука и современность. –2015. –№ 38. –С. 8-11.
29. Кашина, И.В. Применение концепции «Город под куполом» в градостроительных целях, при проектирование большепролетных зданий и сооружений / И.В. Кашина, Д.А. Шульга // Строительство и техногенная безопасность. –2018. –№ 12 (64). –С. 17-22.
30. Миряев, Б.В. Применение пиломатериалов в строительной конструкции сетчатого деревянного / Б.В. Миряев, А.Б. Миряева // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. –2015. Т. 3. –№ 2-2 (13-2). –С. 443-446.
31. Горев, В.В. [и др.]. Металлические конструкции, Том 2: Конструкции зданий. / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филлипов, Г.И. Белый, В.Н. Валь [и др.] // М.: Высшая школа. –2002. –528 с.
32. Павлов, Г.Н. Автоматизация архитектурно-строительного проектирования геодезических куполов и оболочек: 05.13.12. “Системы автоматизации проектирования”: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Павлов Геннадий Николаевич. -Нижний Новгород, 2007. –272 с.
33. Молев, И.В. Конструктивные разработки, экспериментально-теоретические исследования и внедрение стальных куполов: 05.23.01. "Строительные конструкции, здания и сооружения": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Молев Игорь Васильевич. - Нижний Новгород, 1998. –462 с.
34. Тур, А.В. Совершенствование узловых соединений сетчатых куполов из тонкостенных холодногнутых профилей: 05.23.01. "Строительные конструкции, здания и сооружения": диссертация на соискание ученой

степени доктора технических наук / Тур Алексей Витальевич. Казань, 2013. – 220 с.

35. Антошкин, В.Д. Конструктивно-технологическое решения сборных сферических оболочек: специальность 05.23.01 "Строительные конструкции, здания и сооружения": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Антошкин Василий Дмитриевич. -Саранск, 2017. -369 с.
36. Haapio, J. Feature-Based Cost and CO2 Equivalent Optimization of Semi-rigid Steel Frames 2010.
37. Haapio, J. Minimum cost steel beam using semi-rigid joints / J. Haapio, M. Heinisuo // Journal of Structural Mechanics. –2010. –№ 1 (43). –С. 1–11.
38. Madhukar, A. Bistable characteristics of thick-walled axisymmetric domes / A. Madhukar, [и др.] // International Journal of Solids and Structures. –2014. –№ 14 (51). –С. 2590– 2597.
39. Gythiel, W. A Comparative Study of the Structural Performance of Different Types of Reticulated Dome Subjected to Distributed Loads / W. Gythiel, C. Mommeyer, T. Raymaekers, M. Schevenels // Frontiers in Built Environment. – 2020. –№ 56. –С. 1-6.
40. Pawel, Z. Effect of Increased Density of Nodes in Geodesic Dome on its Critical Load Capacity/ Z. Pawel, R. Urszula // Kielce University of Technology, Al. Tysiaclecia Panstwa Polskiego 7,25-314 Kielce, Polska.
41. Skejić, D. Analysis of prefabricated steel dome nodal connection behavior / D. Skejić, A. Alagušić, G. Hrg, M. Lokin, D. Damjanović // Gradjevinar. –2019. – №71 (2). –С. 85-93.
42. Fuller, R.B. Geodesic dome / R.B. Fuller // Perspecta. –1952. –№ 1. –С. 30-33.
43. Лахов, А.Я. Приближенный способ определения максимальных растягивающих напряжений в стержнях двухконтурных геодезических куполов системы «Р» от воздействия собственного веса / А.Я. Лахов // Вестник МГСУ, –2014. –№ 1. –С. 58-65.
44. Молев, И.В. Сетчатые купола в современной строительной практике / И.В. Молев // Горький: ГГУ им. Н.И. Лобачевского. –1981. –64 с.

45. Norrie, D.H. An Introduction to Finite Element Analysis / D.H. Norrie, G. de Vries // New York: Academic Press. –1978. –301 с.
46. Zienkiewicz, O.C. The finite element method / O.C. Zienkiewicz // London: McGraw-Hill. –1977. –787 с.
47. Bathe, K.J. Numerical methods in finite element analysis / K.-J. Bathe, E.L. Wilson // N.J.: Prentice-Hall. –1976. –544 с.
48. Gallagher, R.H. Finite element analysis: Fundamentals / R.H. Gallagher // N.J.: Prentice-Hall. –1975. –416 с.
49. Мансурова, А.Р. Применение программного комплекса ANSYS в компьютерном моделировании / А.Р. Мансурова // Молодой учёный. –2018. – № 39. –С. 31–33.
50. Справочная система: ПК ЛИРА САПР 2016 R5.
51. Справочная система: ПК SCAD OFFICE.
52. Басов К.А. ANSYS для конструкторов / К.А. Басов // М.: ДМК Пресс, –2009. –248 с.
53. Канаев, Е.В. Влияние податливости узлов на свободные длины элементов сетчатых стальных куполов// Санкт-Петербург-2019. –65с.
54. Kanaev, E. Accounting for the flexibility of nodes in the design of steel mesh dome / E. Kanaev, D. Demidova, S. Zimin // MATEC Web of Conferences. –2018. – (245). –С. 08006.
55. Методическое пособие. Autodesk Robot structural analysis professional 2014 // Москва. -2013. -94с.
56. Программное обеспечение SOFiSTiK [электронный ресурс]. - URL: https://www.pss.spb.ru/products/SOFiSTiK-AG/SOFiSTiK.html (дата обращения: 25.04.2021).
57. Ghasemi, M., Tensile stiffness of MERO-type connector regarding bolt tightness / M. Ghasemi, M.R. Davoodi, S.A. Mostafavian // Journal of Applied Sciences. – 2010. –№ 9 (10). –С. 724–730.

58. Morozovskiy, P. Compliance of a rigid joint of a steel column of I-section on a rigid foundation / P. Morozovskiy, [и др.] // MATEC Web of Conferences. –2019. – (265). –С. 05035.
59. Горохов, Е.В. Учет конструктивных особенностей узловых соединений в расчетах устойчивости центрально сжатых стержней структурных покрытий / Е.В. Горохов, А.В. Мушанов // Металлические конструкции. –2016. –№ 22 (3). –С. 125–137.
60. Демидова, Д.А. Оценка влияния узловой податливости геодезического купола / Д.А. Демидова, Е.В. Канаев // Материалы научной конференции с международным участием. Инженерно-строительный институт. –2018. –№ УДК: 69.04. –С. 227–229.
61. Драган, В.И. Методика расчета живучести структурных конструкций системы «БРГТУ» / В.И. Драган, Н.Л. Морилова // Строительство и архитектура. –2012. –№73 (1). –С. 39–46.
62. Драган, В.И. Податливость стержневых систем с узловыми соединениями на пространственных листовых фасонках / В.И. Драган, А.Б. Шурин // Промышленное и гражданское строительство. –2015. – (7). –С. 37–43.
63. Трофимов, В.И. Учет влияния податливости болтового соединения на работу структурной конструкции / В.И. Трофимов, Э.В. Третьякова, И.И. Зуева // Строительная механика и расчет сооружений. –1976. –№ 1. –С. 24–26.
64. Шурин, А.Б. Напряженно-деформированное состояние большепролетного комбинированного покрытия из металлических арок и структурной плиты: специальность 05.23.01 “строительные конструкции, здания и сооружения”: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шурин Андрей Брониславович. –Брест, 2011. –181 с.
65. Сапелко, А.В. Большепролетные светопрозрачные защитные сооружения. Применение купольных покрытий при строительстве большепролетных светопрозрачных сооружений / А.В Сапелко // Международный академический вестник. –2015. –№ 2 (8). –С. 132-135.

66. Панова, Я.В. Эффективная строительная система– геодезический купол / Я.В. Панова, С.В. Демидов // В сборнике: Череповецкие научные чтения - 2014. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. ред. К.А. Харахнин. –2015. –С. 39-43.
67. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М:. Минстрой России, 2016. -136 с.
68. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – М:. Минстрой России, 2017. -148 с.
69. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23 81*).
70. ТУ 5285-001-47543297-09. Стержни и узловые элементы системы МАРХИ. – М.: –60 с.
71. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. – М:. Минрегион России, 2012. -108 с.
72. СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II -25-80. – М:. Минстрой России, 2017. -105 с.
73. ГОСТ 30245-2003 Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. – М.: 2003. – 30 с.
74. ГОСТ 13616-97 Профили прессованные прямоугольные полосообразного сечения из алюминия, алюминиевых и магниевых сплавов. – М.: 1997. – 25 с.
75. ГОСТ 24454-80 Пиломатериалы хвойных пород. – М.: 1980. – 4 с.
76. СП 128.13330.2012. Алюминиевые конструкции. Актуализированная редакция СНиП 2.03.06-85. – М:. Минрегион России, 2011. -85 с.
77. Тур, В.И. Рекомендации по расчету и конструированию сетчатых куполов со стержнями из холодногнутых тонкостенных профилей. Учебное электронное издание / В.И. Тур, А.В. Тур, И.С. Холопов // -Ульяновск: УлГТУ, 2012. -38 с.
78. Рчков, С.П. Технический отчет: Расчет несущей конструкции купольного здания Z14 / С.П. Рычков // Самара, 2017. -28 с.
79. Тур, В.И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности. Учебное пособие / В.И. Тур // -М: Издательство АСВ, 2004. -96 с.

Приложение А. План, разрез, узлы соединения

План, разрез и узлы соединения сетчатого геодезического купола представлены на рисунках А.1 – А22.

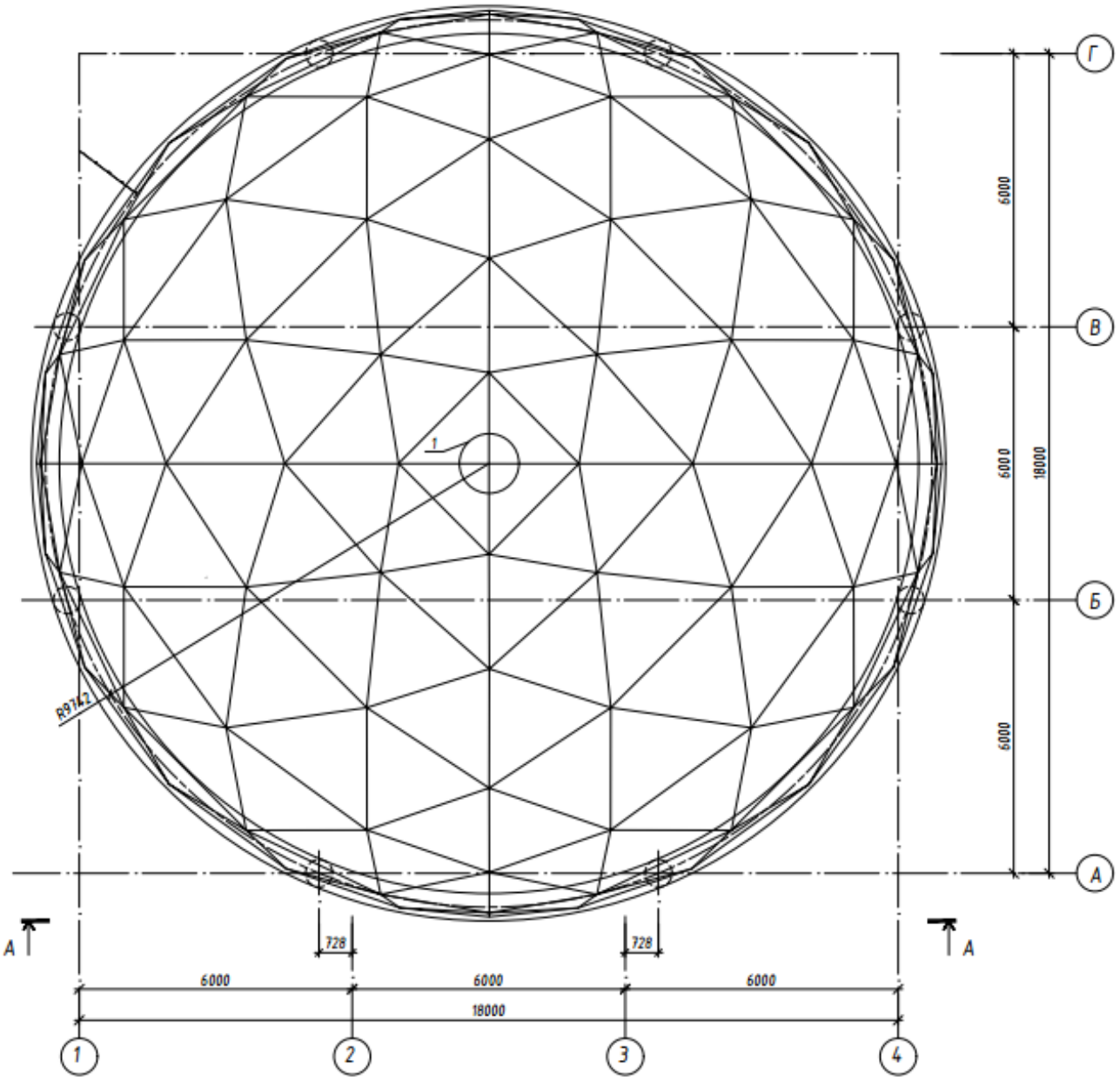


Рисунок А.1 – Схема расположения ребер сетчатого купола (1:100)

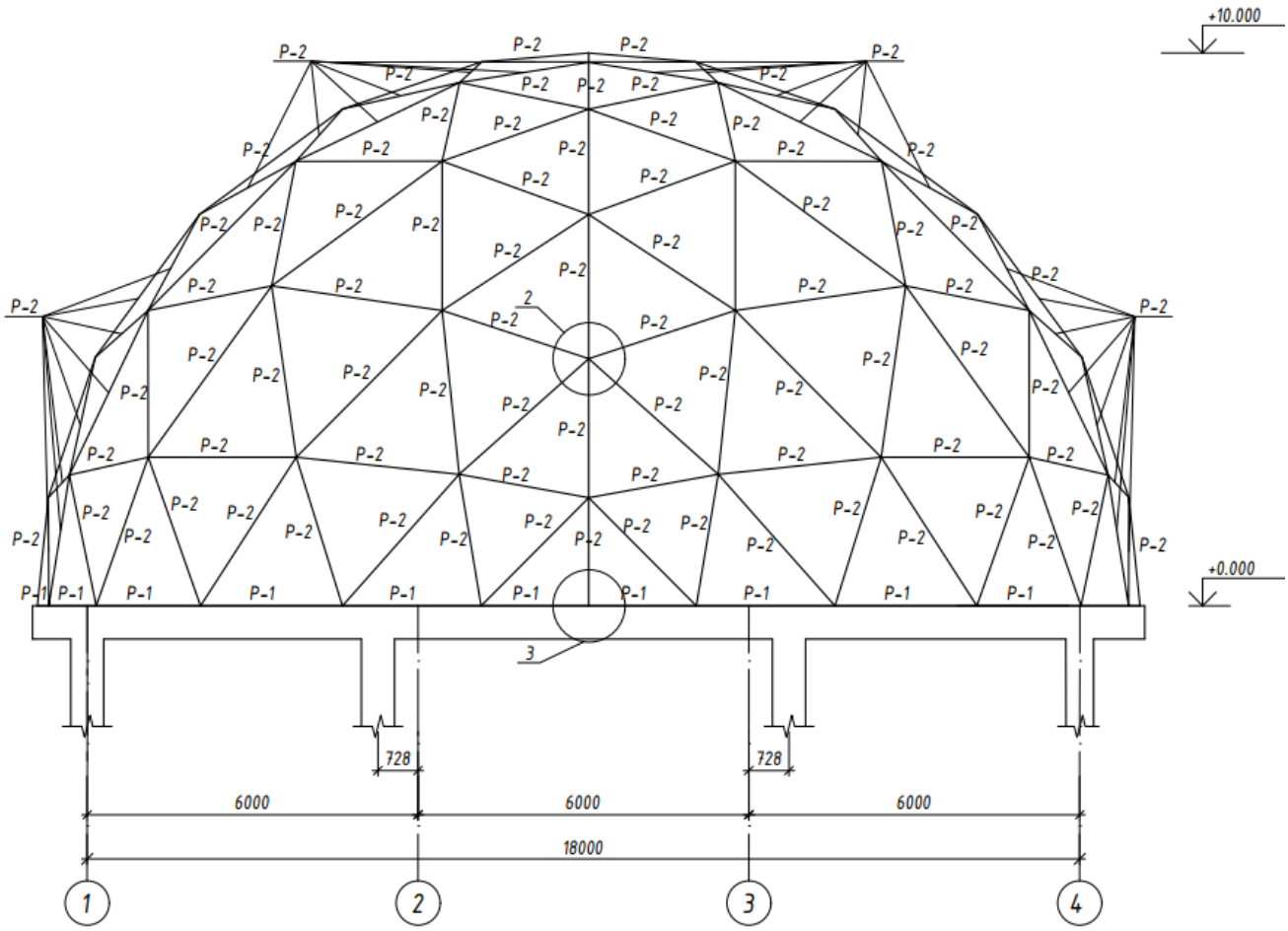


Рисунок А.2 – Вид А-А (1:100)

Узлы соединения стального купола

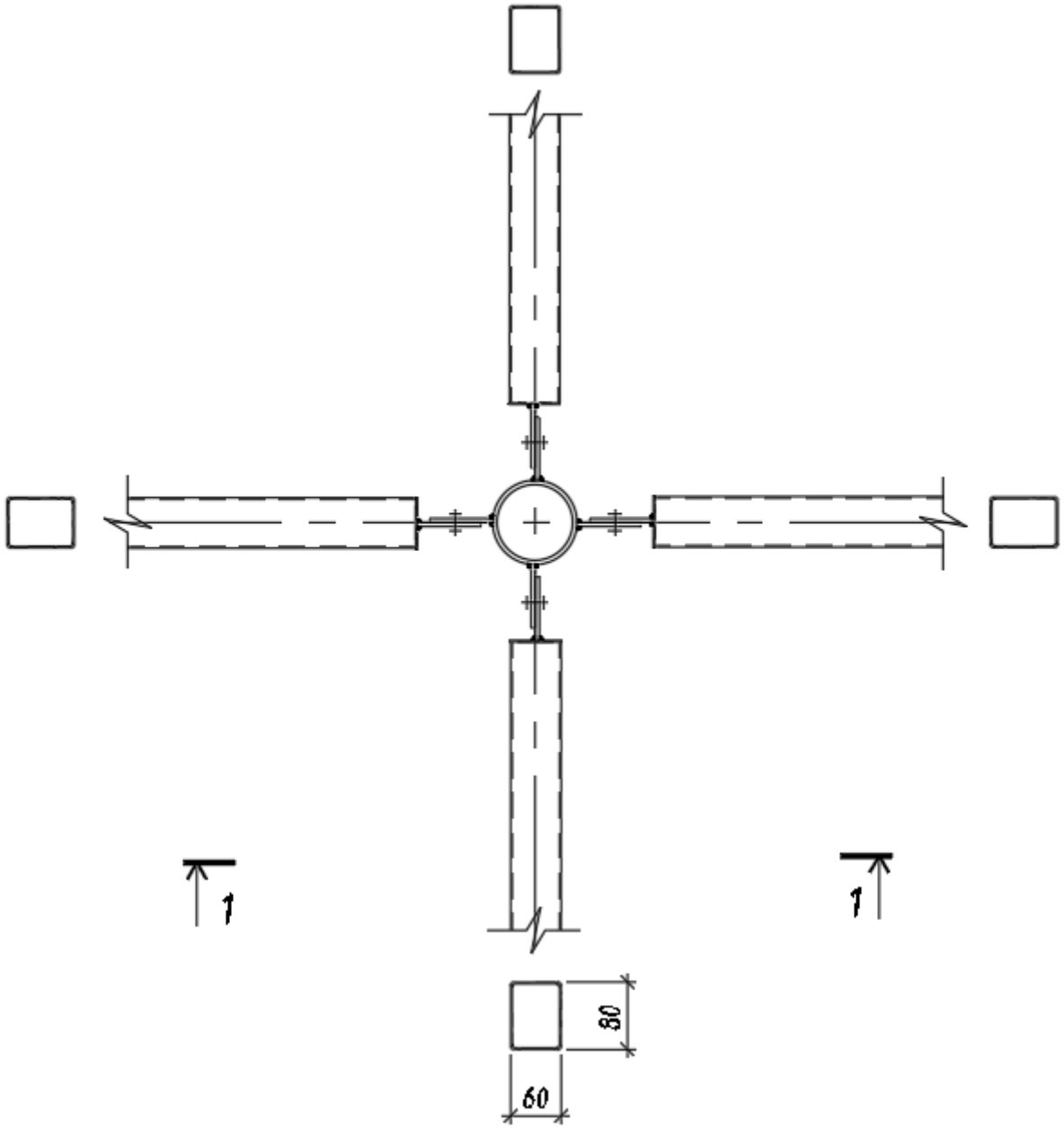


Рисунок А.3 – Узел 1А (1:10)

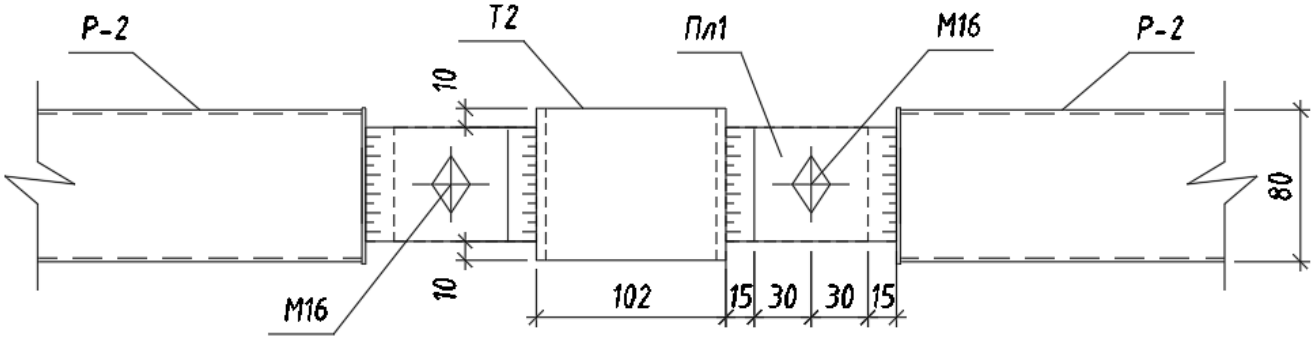


Рисунок А.4 – Разрез 1-1 (1:5)

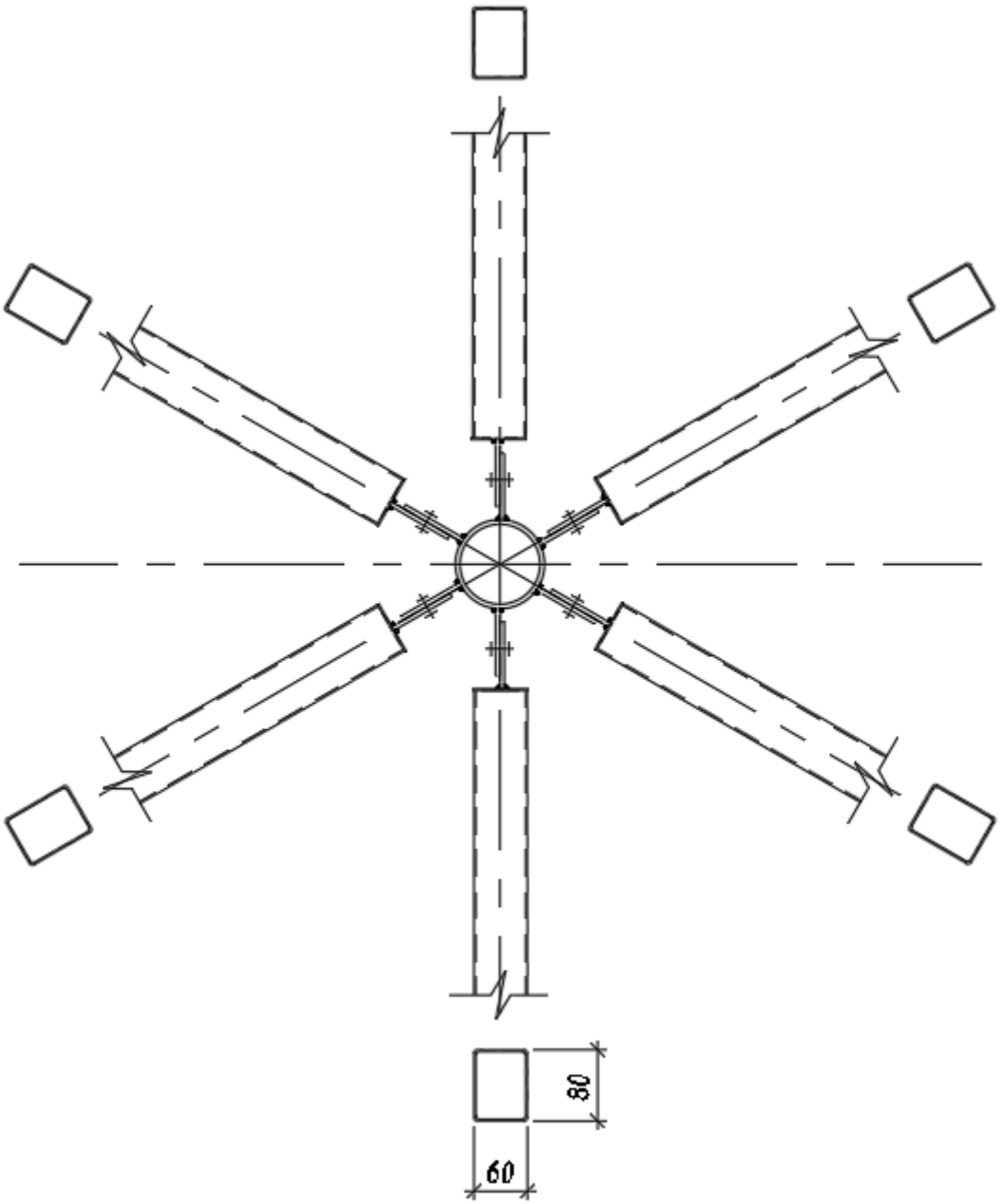


Рисунок А.5 – Узел 2А (1:10)

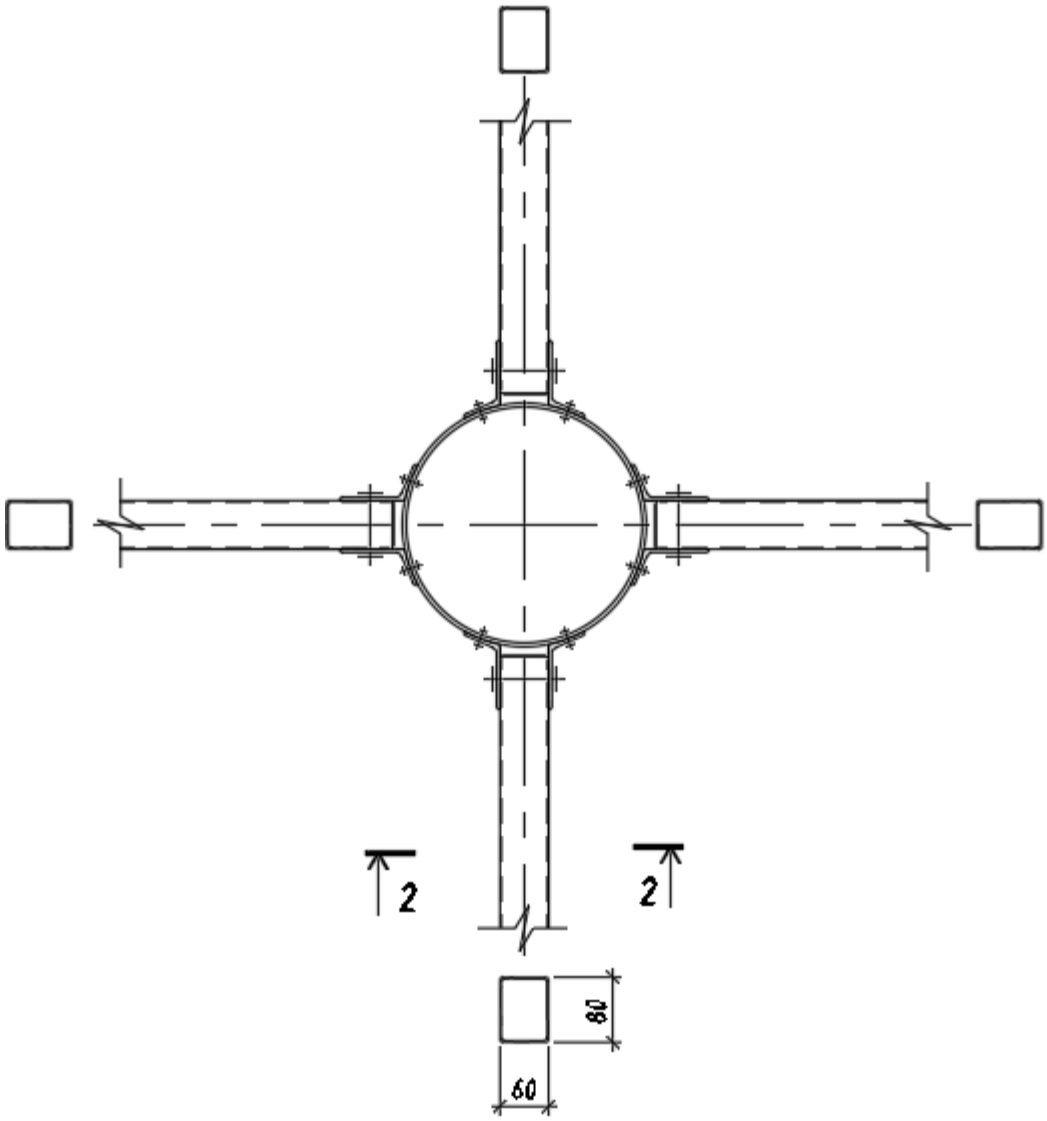


Рисунок А.6 – Узел 1Б (1:10)

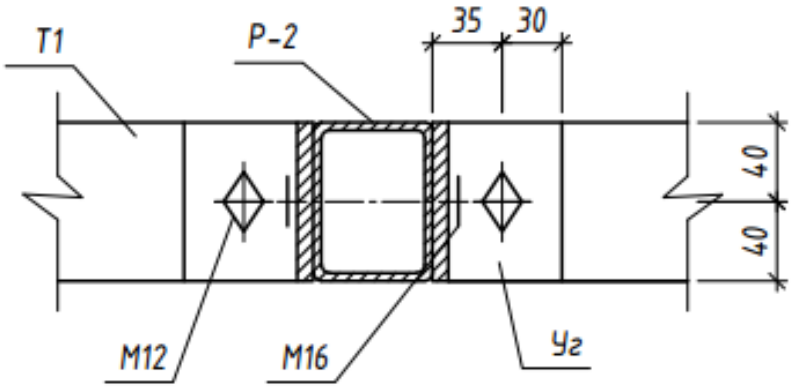


Рисунок А.7 – Разрез 2-2 (1:5)

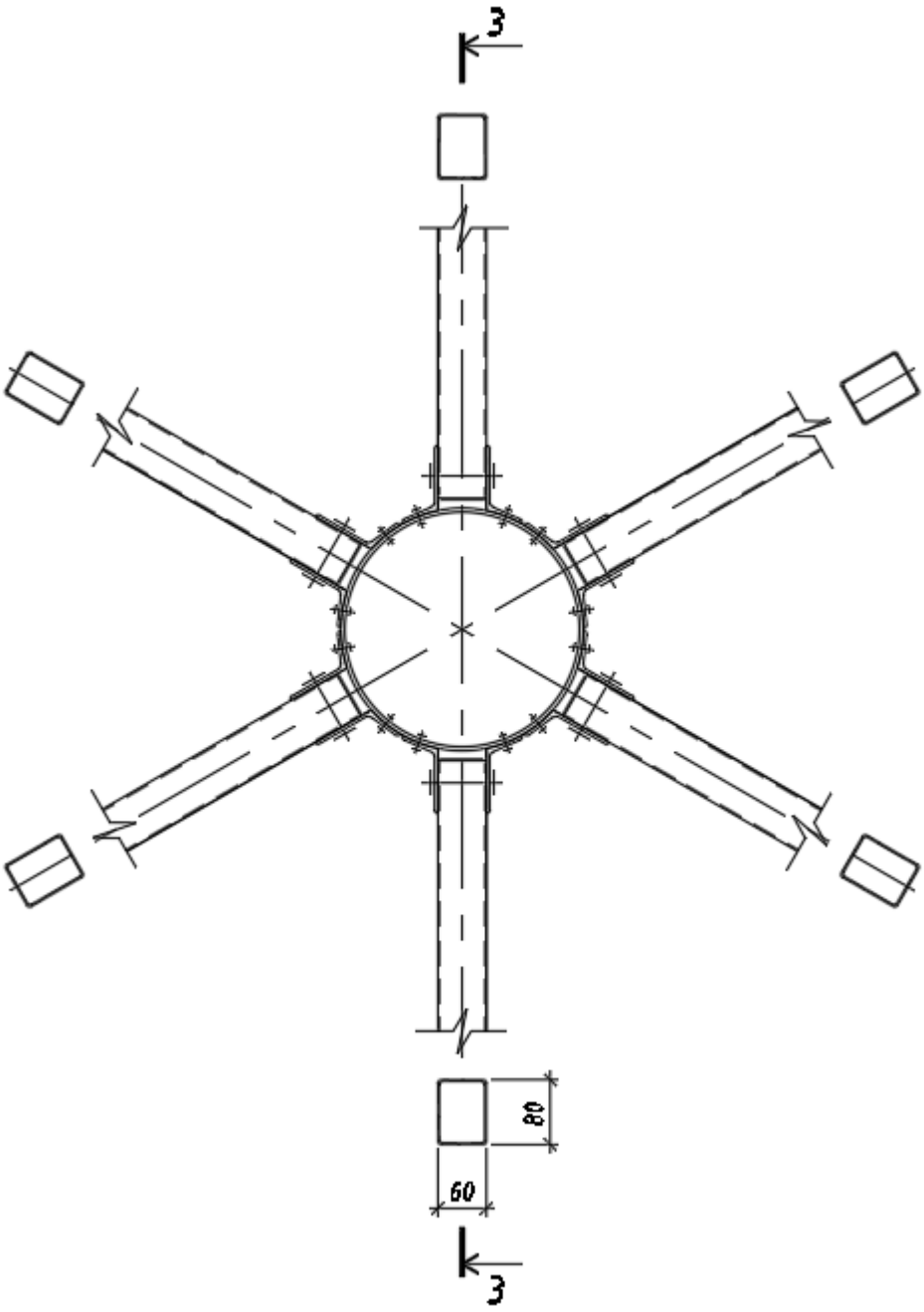


Рисунок А.8 – Узел 2Б (1:10)

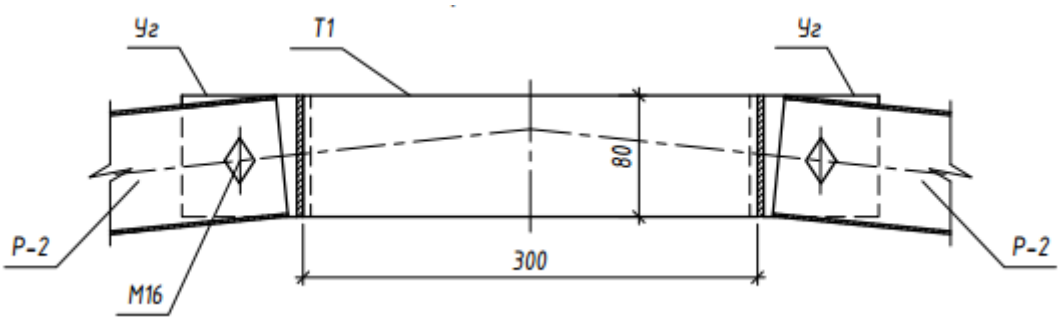


Рисунок А.9 – Разрез 3-3 (1:5)

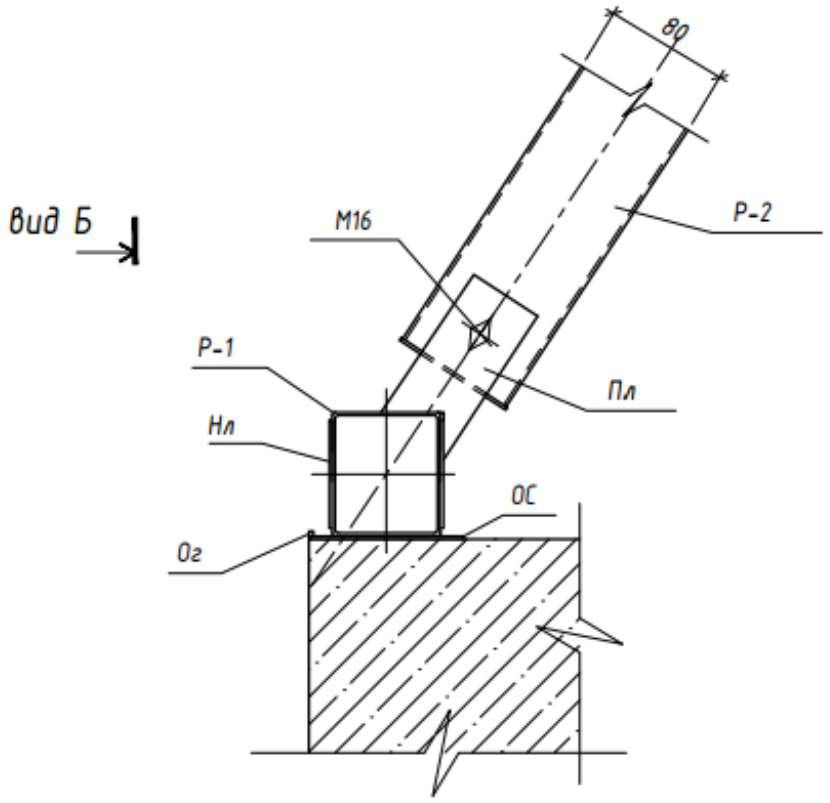


Рисунок А.10 – Узел 3 (1:5)

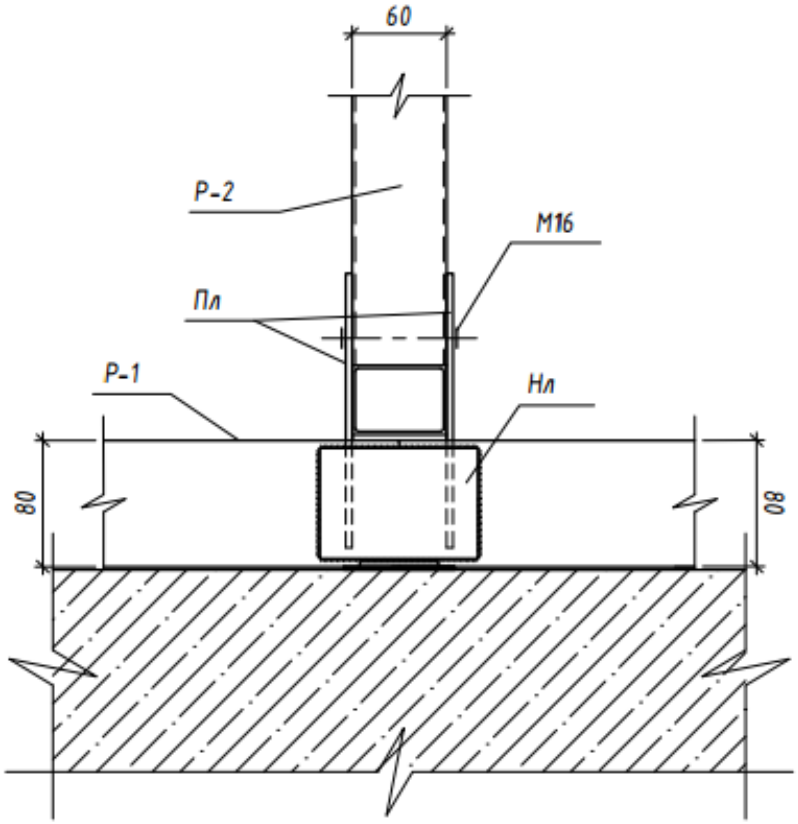


Рисунок А.11 – Вид Б (1:5)

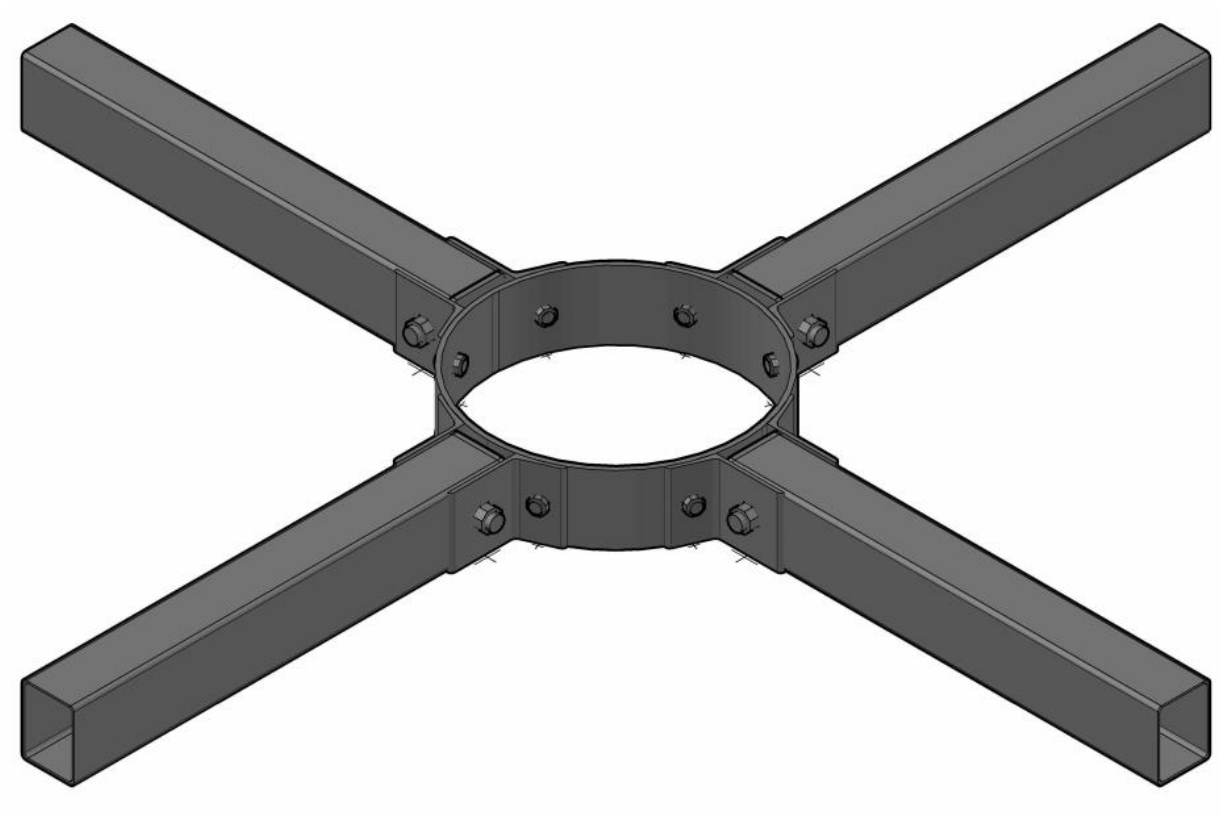


Рисунок А.12 – 3D модель узла 1Б

Рисунок А.13 – 3D модель узла 2Б

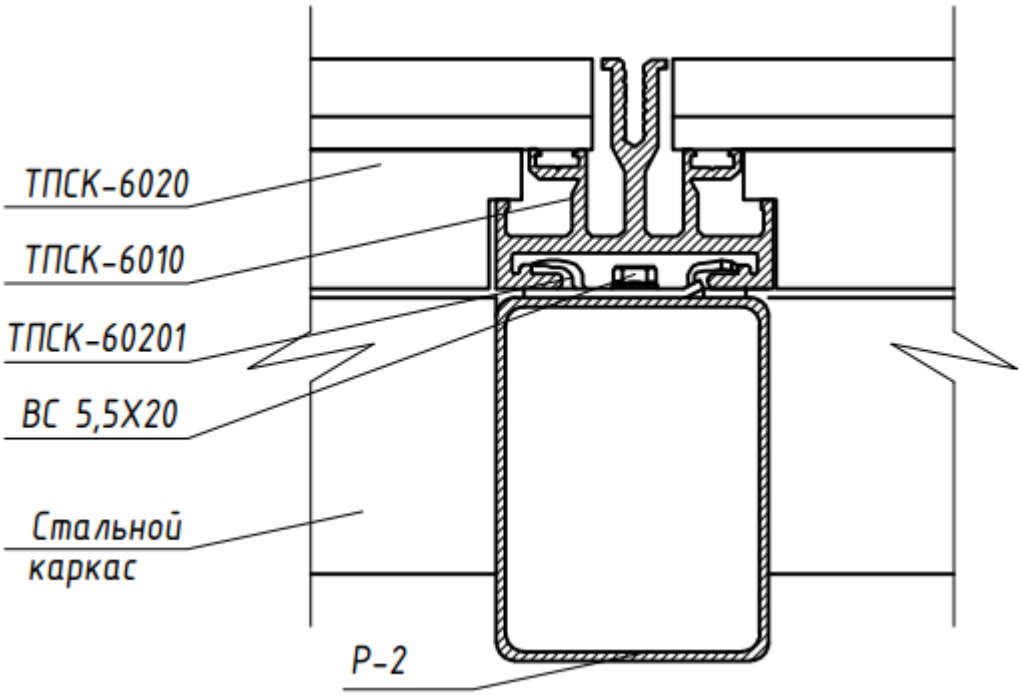


Рисунок А.14 – Узел крепления стеклопакет к конструкциям купола (1:5)

Условные обозначения

Р1 – Профиль прямоугольный гнутый замкнутый сварной 80х60х2 (Элементы каркас купола)

Р2 – Профиль прямоугольный гнутый замкнутый сварной 80х70х3 (Элементы опорного кольца)

Т1 – Труба

М16 - Высокопрочный болт диаметр 16

М12 - Высокопрочный болт диаметр 12

Пл – Стальная пластина

ОС – Опорный столик

Нл – Накладка

Ог – Ограничитель перемещения

Уг – Уголок

Узлы соединения алюминиевого купола

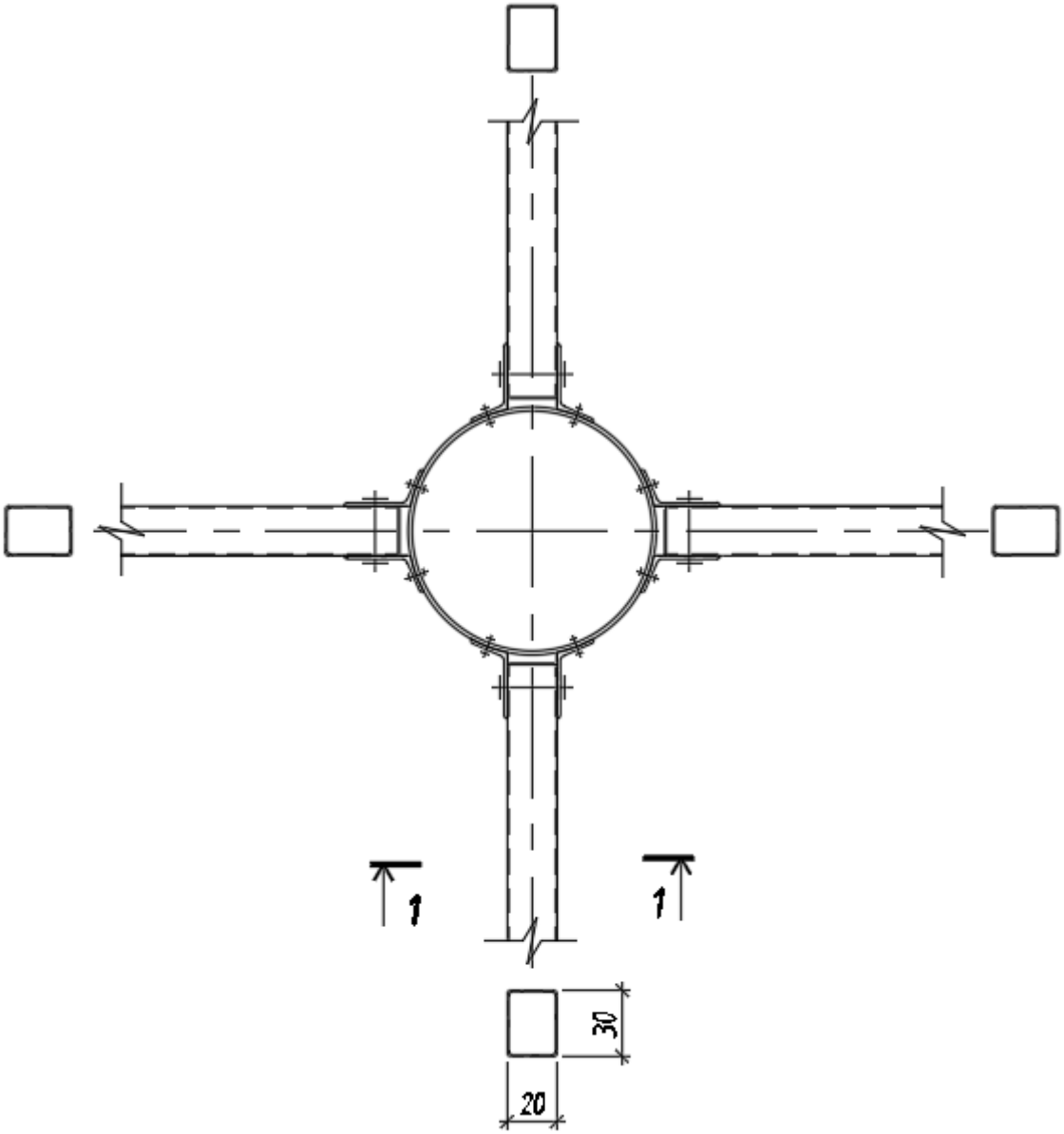


Рисунок А.15 – Узел 1 (1:10)

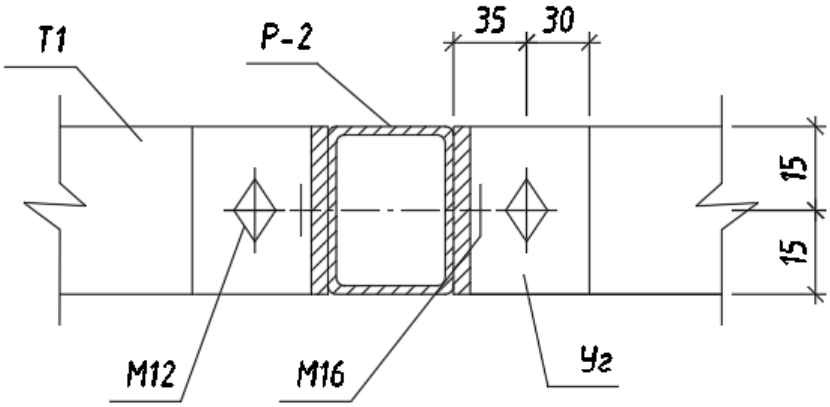


Рисунок А.16 – Разрез 1-1 (1:5)

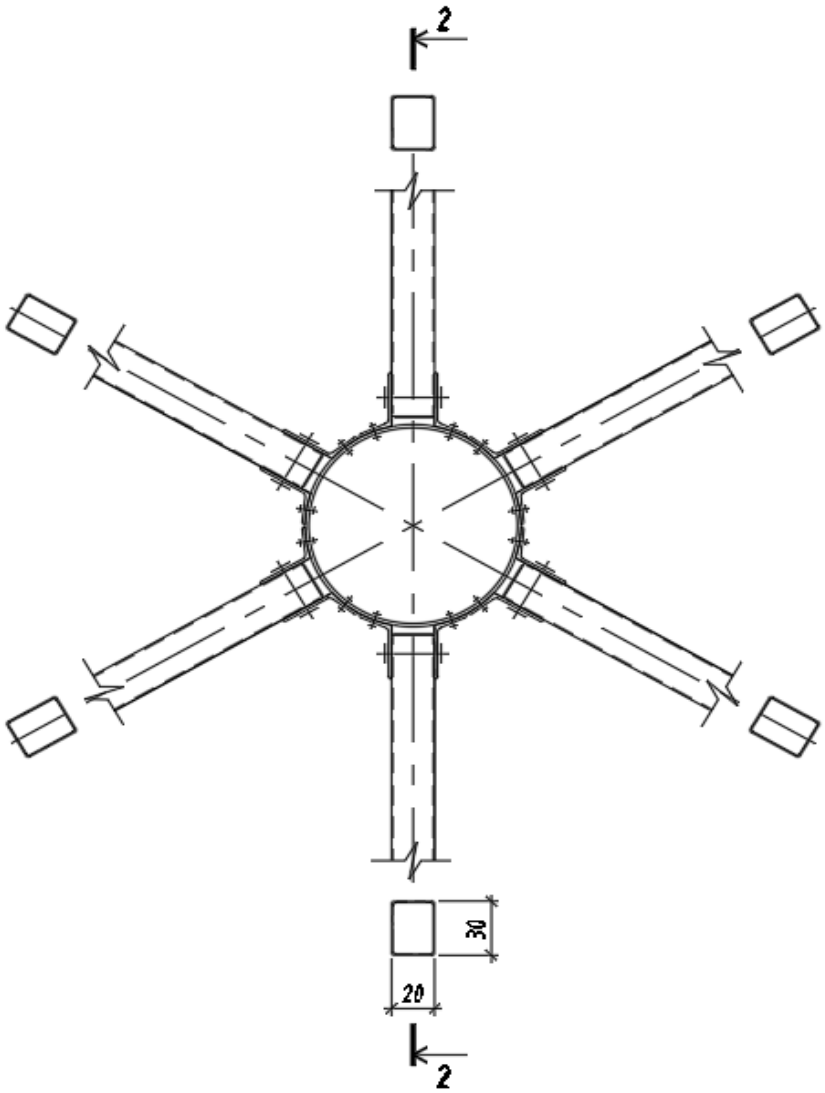


Рисунок А.17 – Узел 2 (1:10)

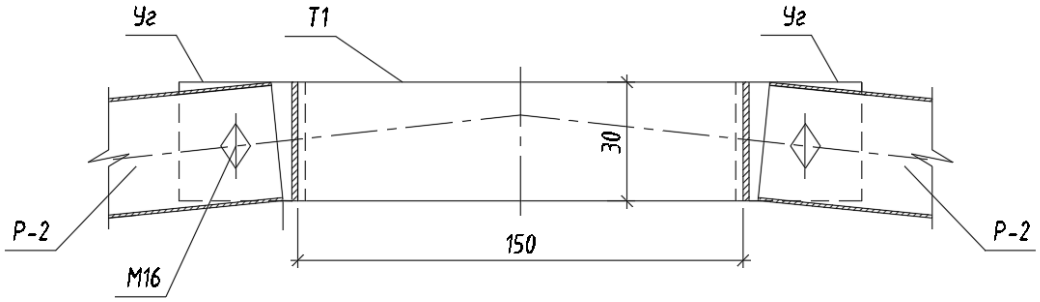


Рисунок А.18 – Разрез 2-2 (1:5)

Условные обозначения:

Р1 – Профили прессованные прямоугольные полосообразного сечения b=30 мм; h=20 мм (Элементы опорного кольца)

Р2 – Профили прессованные прямоугольные полосообразного сечения b=30 мм; h=20 мм (Элементы каркас купола)

Узлы соединения деревянного купола

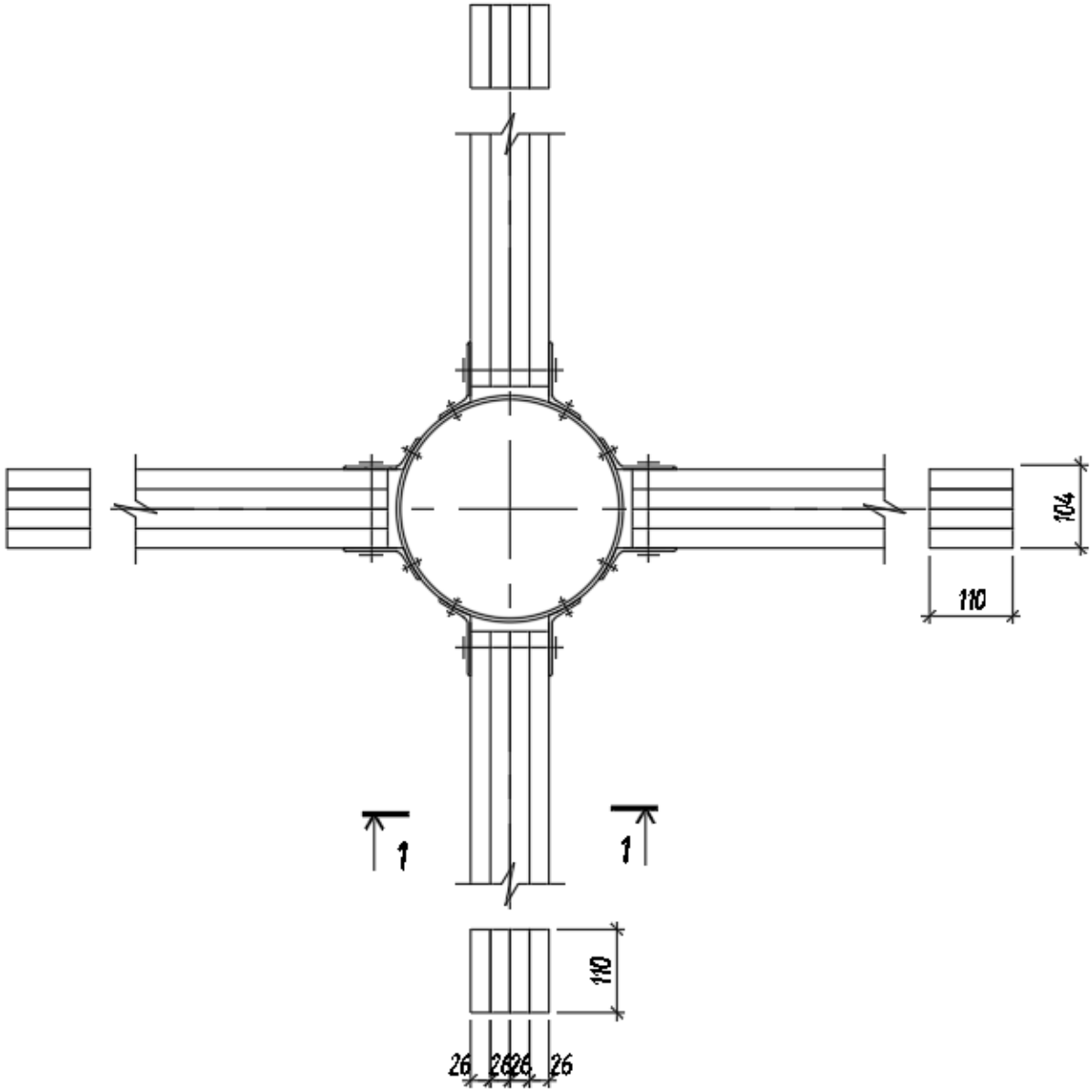


Рисунок А.19 – Узел 1 (1:10)

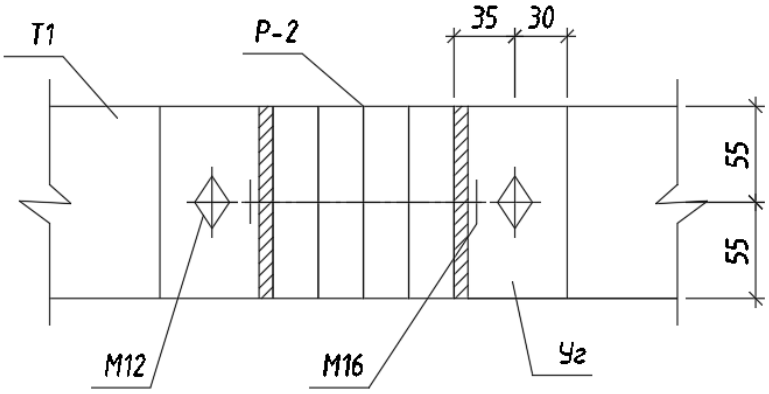


Рисунок А.20 – Разрез 1-1 (1:5)

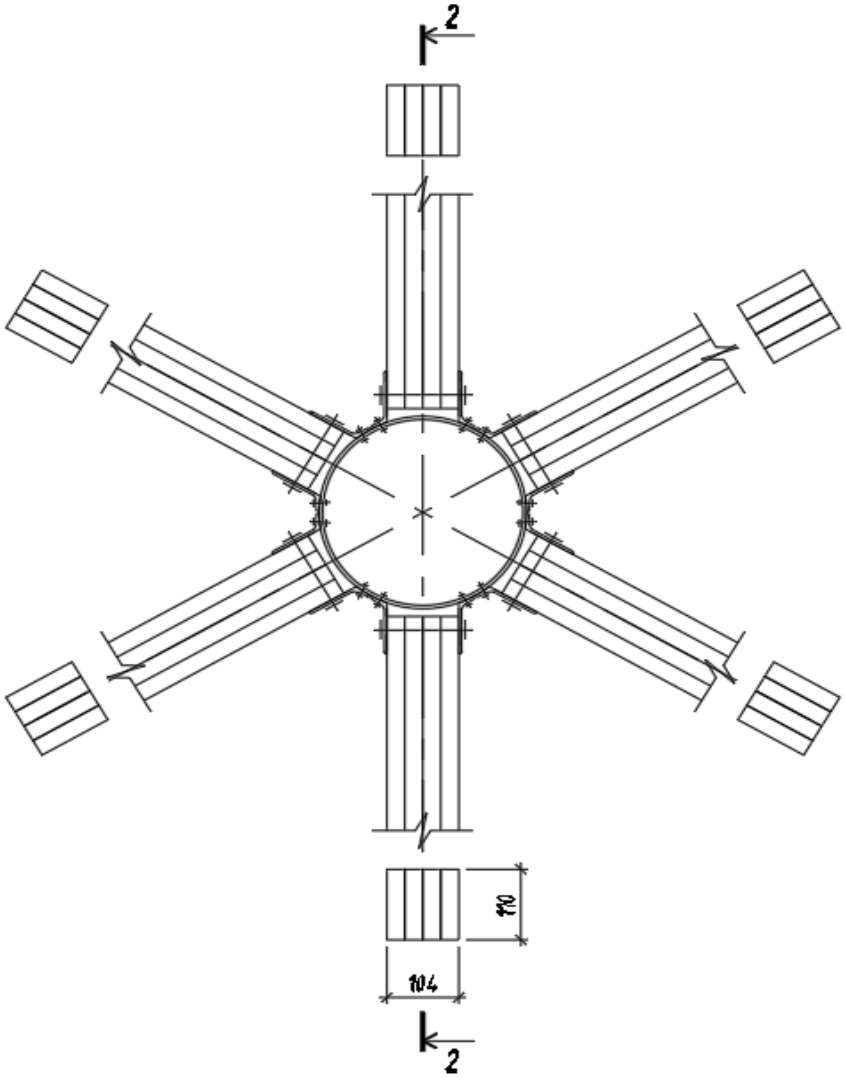


Рисунок А.21 – Узел 2 (1:10)

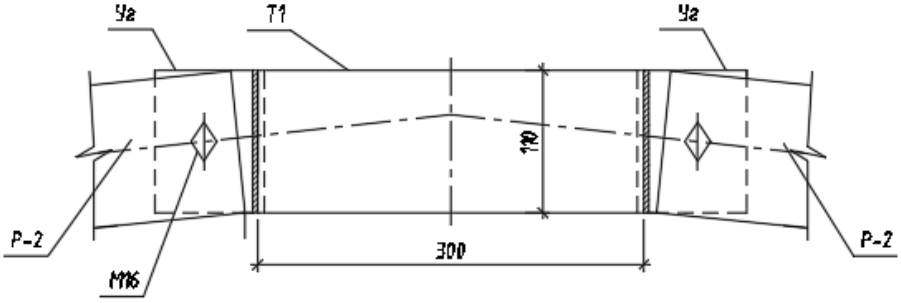


Рисунок А.22 – Разрез 2-2 (1:5)

Условные обозначения

Р1 – Клееная древесина, состоящий из 6 досок сечением 26х110 мм (Элементы опорного кольца)

Р2 – Клееная древесина, состоящий из 4 досок сечением 26х110 мм (Элементы каркас купола)