

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Н. П. ОГАРЁВА»**

(ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва»)

На правах рукописи

Антошкин Василий Дмитриевич

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СБОРНЫХ
СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК**

05.23.01 - Строительные конструкции, здания и сооружения

**Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук**

**Научный консультант, доктор технических наук,
профессор, академик РААСН
Травуш Владимир Ильич**

Саранск – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОБЛАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ...	17
1.1. ПОКРЫТИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕТЧАТЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК.....	17
1.2. ПОКРЫТИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОДЕ- ЗИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК.....	26
1.3. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТ- ЧАТЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК.....	44
1.4. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОДЕ- ЗИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК.....	
1.5. ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖ- НОСТИ КУПОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ	58
Выводы по главе 1.....	62
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СБОРНЫХ СФЕРИЧЕ- СКИХ ОБОЛОЧЕК.....	64
2.1. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СЕТЧАТЫЕ СБОРНЫЕ СФЕРИЧЕСКИЕ ОБОЛОЧКИ С ПЛОСКИМИ ШЕСТИУГОЛЬНЫМИ, ТРЕУГОЛЬНЫМИ И Н- УГОЛЬНЫМИ ПАНЕЛЯМИ.....	66
2.1.1. Первый вариант разрезки на основе сферических совместимых треугольников (сегментов) $r_1-90-90^\circ$	70
2.1.2. Второй вариант разрезки на основе сферических совмести- мых треугольников (сегментов) $r_1-90-90^\circ$	75
2.1.3. Вариант формирования разрезки на основе сферических совместимых треугольников (сегментов) $b-90-90^\circ$	79
2.2. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФОРМЫ СЕТЧАТЫХ СБОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК НА ОСНОВЕ СЕКТОРОВ С ПЛОСКИМИ ШЕСТИУГОЛЬНЫМИ И ТРЕУГОЛЬНЫМИ ПАНЕЛЯМИ.....	86

2.3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФОРМЫ СЕТЧАТЫХ СБОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК НА ОСНОВЕ СЕКТОРОВ С ПЛОСКИМИ (ПИРАМИДАЛЬНЫМИ) ШЕСТИУГОЛЬНЫМИ ПАНЕЛЯМИ.....	94
2.4. ПОБОЧНЫЕ ЭФФЕКТИВНЫЕ ФОРМЫ СЕТЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ СБОРНЫХ ПЛОСКИХ ШЕСТИУГОЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ.....	101
2.4.1. Составные сетчатые сферические оболочки в виде сборных шестиугольных модулей с доборными элементами.....	101
2.4.2. Конструкционно-технологическое формообразование оболочек из сборных плоских шестиугольных и треугольных панелей, размещенных в секторах при экваторах составных сфер	106
2.5. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ СБОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ПЛОСКИХ (ПИРАМИДАЛЬНЫХ) ШЕСТИУГОЛЬНЫХ И ТРЕУГОЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИКОСАЭДРА.	114
2.5.1. Конструктивно-технологическое формообразование сборных сферических оболочек из сборных плоских (пирамидальных) шестиугольных и треугольных панелей на основе икосаэдра.....	115
2.5.2. Перспективные разрезки на основе икосаэдра из треугольных и шестиугольных плоских (или пирамидальных) панелей...	140
2.5.3. Оптимизация расположения опорных узлов сферических разрезов на основе икосаэдра	149
2.6. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ СБОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ СБОРНЫХ ПЛОСКИХ (ПИРАМИДАЛЬНЫХ) ШЕСТИУГОЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИКОСАЭДРА	155
2.7. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СТЕРЖНЕВЫХ ОБОЛОЧЕК КУПОЛОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ВЕСА, МИНИМУМА ТИПОРАЗМЕРОВ И ТРУДОЗАТРАТ.....	166
2.8. КЛАССИФИКАЦИЯ СЕТЧАТЫХ И ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК	169
Выводы по главе 2.....	174

3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СБОР- НЫХ СФЕРИЧЕСКИХ КУПОЛОВ-ОБОЛОЧЕК.....	176
3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ КУПОЛОВ-ОБОЛОЧЕК.	176
3.1.1. Особенности расчетных моделей сборных геодезических куполов-оболочек.....	176
3.1.2. Исследование вариантов конструктивно-технологических решений геодезических куполов.....	178
3.1.3. Исследование напряженно-деформированного состояния геодезических куполов.....	187
3.1.4. Особенности монтажа сборного геодезического купола....	192
3.2. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ КАРКАСНО- ПАНЕЛЬНЫХ ПРЕДНАРЯЖЕННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК	194
3.2.1. Исследование конструктивно-технологических решений сферических оболочек из преднапряжённых панелей.....	194
3.2.2. Исследование конструктивно-технологических решений составных оболочек из преднапряжённых панелей.....	198
3.3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДВУХПОЯСНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК.....	204
3.3.1. Варианты расчетных моделей двухпоясных оболочек.....	204
3.3.2. Исследование конструктивно-технологических решений узловых стыков двухпоясных оболочек из неполных панелей.....	207
3.3.3. Исследование НДС сферических двухпоясных оболочек ...	214
3.3.4. Оценка НДС монтажного состояния двухпоясной оболочки	223
3.4. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СОСТАВНЫХ МОДУЛЕЙ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ	226
3.4.1. Особенности выбора расчетных моделей структурного покрытия	226

3.4.3. Исследование конструктивно-технологических решений сферических структурных модулей.....	232
3.4.3. Выявление резервов несущей способности структур и оптимизация высоты структурной конструкции при заданных пролете и стреле подъема.....	236
Выводы по главе 3.....	244
4.ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ КАРКАСНЫХ ПАНЕЛЕЙ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ И МОДЕЛИ СТАЛЬНОГО КУПОЛА.....	245
4.1.МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	245
4.2.ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННОЙ КАРКАСНОЙ МЕТАЛЛО-ДЕРЕВЯННОЙ ПАНЕЛИ.....	247
4.2.1. Исследование прочности древесины различных пород в условиях повышенной влажности.....	248
4.2.2. Исследование НДС преднапряженных металлодеревянных моделей в условиях навесов г. Геленджик и г. Саранск.....	253
4.2.3. Исследование потерь преднапряжения металлодеревянных моделей в условиях навесов г. Геленджик и г. Саранск.....	258
4.3 ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КУПОЛА.	266
4.3.1. Выбор расчетной модели для численного исследования купола.....	276
4.3.2. Исследование напряженно-деформированного состояния расчетной модели купола.....	272
4.3.3. Проверка устойчивости отдельных элементов и общей устойчивости модели купола как дискретной стержневой системы.....	275
4.3.4. Конструктивный расчет модели стального купола.....	277
4.3.5. Конструкция модели и стенда.....	282

4.3.6. Экспериментальное исследование крупномасштабной стальной модели купола.....	284
Выводы по главе 4.....	295
5. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ТИПОВ СТАЛЬНЫХ И МЕТАЛЛОДЕРЕВЯННЫХ КУПОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ.....	299
5.1. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СБОРНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ КУПОЛОВ.....	299
5.1.1. Предложения по выбору оптимальной схемы разрезки и геометрическому расчету геодезических куполов.....	299
5.1.2. Выбор вариантов конструктивного решения геодезических куполов.....	302
5.1.3. Предложения по повышению надежности сборных геодезических куполов	307
5.2. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ И КОНСТРУИРОВАНИЮ СЕТЧАТЫХ ОДНОПОЯСНЫХ КУПОЛОВ С КАРКАСНЫМИ ПАНЕЛЯМИ.....	309
5.2.1. Выбор вариантов схем сетчатых однополосных куполов с каркасными панелями.....	309
5.2.2. Предложения по выбору вариантов конструктивно-технологического решения.....	310
5.3. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ И КОНСТРУИРОВАНИЮ СЕТЧАТЫХ ДВУХПОЯСНЫХ КАРКАСНЫХ КУПОЛОВ.....	312
5.4. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ СОСТАВНЫХ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ.....	316
5.4.1 Выбор конструктивно-технологического решения составных сетчатых структурных покрытий.....	316
5.4.2 Выбор варианта узловых соединений составных сетчатых структурных покрытий.....	322

Выводы по главе 5.....	323
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	325
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	328
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	350

ВВЕДЕНИЕ

В современных исследованиях в области сферических оболочек наибольшую разработку получили конструкции куполов на основе сеток с треугольными ячейками Шведлера и Чивитта, Мухина-Гвамичавы, а также геодезические системы куполов-оболочек, стержни которых являются ребрами многоугольников, вписанных в сферу, использующих разрезы М. С. Туполева, Р. Б. Фуллера, Г. Н. Павлова, А. Н. Супруна [2, 103, 113-115, 201-205]. При выборе конструктивных схем куполов-оболочек просматривается тенденция разработки и применения уже на стадии формообразования этих покрытий эффективных технологических решений изготовления отдельных элементов, стендовой укрупнительной сборки сегментов оболочек, возведения их с обеспечением заданной точности монтажа покрытия.

Актуальность работы. В общем объеме затрат на возведение зданий с зальными помещениями, перекрываемых различными оболочками, на покрытия приходится их существенная часть – 20 - 30% по материалоемкости и около 30 - 50% по трудоемкости. Поэтому развитие конструктивных форм покрытий в значительной степени определяет прогресс во всей строительной отрасли. И здесь наиболее рациональны сборные оболочки, формируемые из отдельных каркасных панелей и панелей-оболочек с высокой степенью заводской готовности, в том числе из панелей с элементами кровли, что позволяет существенно уменьшать трудовые затраты на строительной площадке, снизить стоимость и сроки строительства. Поэтому разработка конструктивно-технологических форм покрытий, обладающих преимуществами сборных сферических оболочек, изучение их напряженно-деформированного состояния, разработка конструкций узлов, отвечающих новым формам покрытий и соединениям сборных элементов является одной из актуальных задач строительства зданий с зальными помещениями.

Связь работы с государственными научно-техническими программами. Исследования по работе выполнялись в рамках федеральных программ:

Приоритетные направления развития Национального исследовательского университета «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (ПНР-1) – «Энергосбережение и новые материалы» на 2010-2019 г. г., утвержденной приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от «9» июля 2010 г. № 757 в рамках программы «Стратегии научно-технологического развития и национальной технологической инициативы РФ»; программа партии Единая Россия «Развитие малых городов России».

Степень разработанности проблемы. Прогресс в области строительства оболочек неразрывно связан с уменьшением расхода материалов и сокращением трудозатрат на конструкции покрытия и опорного контура, в том числе, при возведении объектов на строительной площадке. В области купольных покрытий наилучшие показатели по указанным критериям имеют сборные сферические оболочки. Об этом свидетельствуют многочисленные примеры их строительства. Использование сборных сферических куполов-оболочек относится, как правило, к уникальным зданиям и сооружениям (спортивные объекты, киноконцертные залы, крытые рынки и т.д.). Применение сборных сферических оболочек в массовом строительстве сдерживается их повышенной трудоемкостью на строительной площадке, которая является следствием низкой степени их индустриализации. Для решения этой проблемы предлагаются конструктивно-технологические решения, основанные на индустриализации их элементов, что определяет новое направление в области сборных сферических купольных покрытий зданий и сооружений.

Цель работы: Исследование и разработка новых типов сборных сферических оболочек покрытий зданий и сооружений, развитие теории их конструктивно-технологического формообразования и разработка на этой основе узлов и соединений сборных элементов, обеспечивающих их безопасную эксплуатацию.

Задачи исследования:

1. Разработка конструкций сборных элементов оболочек с эффективными технологиями изготовления и возведения, отвечающих новым предложенным типам разрезов сборных сферических оболочек.

2. Выбор и реализация геометрической треугольной сети на сфере в качестве новой конструктивно-технологической основы разрезки сферических оболочек на сборные элементы.

3. Определение оптимальных параметров геометрических одноуровневых и двухуровневых треугольных сетей сферических оболочек в виде плоских или пирамидальных панелей, а также в виде структур, обеспечивающих эффективные решения несущих конструкций.

4. Разработка методики автоматизированного построения разбинок сферического купола-оболочки на панели, позволяющей значительно ускорить процесс проектирования сферических оболочек.

5. Формирование комплексной методики экспериментальных и теоретических исследований сферических оболочек из дерева и стали, достоверно отражающей их НДС, а также влияние отдельных факторов на прочность, устойчивость и деформативность, как отдельных элементов покрытий, так и сборных оболочек в целом.

6. Оценка с помощью экспериментальных исследований и математической статистики основных закономерностей напряженно-деформированного состояния крупномасштабных металлодеревянных моделей в зависимости от их геометрических и физических параметров, способов опирания, различных климатических условий.

7. Разработка рекомендаций по совершенствованию методов расчета и конструктивно-технологических решений сборных сферических оболочек из дерева и стали, позволяющих назначить оптимальные параметры покрытий, более точно оценить напряженно-деформированное состояние предложенных

конструкций, снизить трудоемкость проектирования, изготовления и монтажа новых конструкций куполов-оболочек.

8. Обобщение и внедрение в практику строительства результатов выполненных исследований, а также создание научных предпосылок для развития нового направления по совершенствованию сферических оболочек покрытий зданий и сооружений.

Объект исследования - объектом исследования являются покрытия зданий и сооружений в виде сборных сферических оболочек.

Предмет исследования:

- закономерности конструктивно-технологического формообразования сборных сферических оболочек и куполов, разработка конструкций сборных элементов оболочек с эффективными технологиями изготовления и возведения, отвечающих новым предложенным типам разрезов сборных сферических куполов-оболочек.

- оптимизация геометрических и основных технико-экономических параметров конструкций; оценка особенностей напряженно-деформированного состояния каркасных купольных покрытий и отдельных конструктивных частей покрытий в зависимости от механических и физических характеристик материала, геометрических параметров, внешних нагрузок и воздействий.

Методология и методы проведенных исследований. В работе использованы методы теоретического исследования конструктивно-технологических возможностей сборных сферических оболочек; закономерностей оптимального формообразования конструкций купольных покрытий зданий и сооружений; методы экспериментального исследования работы несущих конструкций зданий и сооружений; методы математической статистики; методы строительной и теоретической механики, определяющие напряженно-деформированные состояния конструкций. Достоверность результатов обусловлена физическим и численным экспериментами, а также использованием обоснованных математических моделей и методов и

применением современных апробированных средств измерительной и вычислительной техники. Экспериментальные исследования выполнялись на масштабированных натурных образцах.

Автор защищает:

- новые конструктивные решения сферических оболочек, созданных на основе предложенных автором эффективных разрезов их поверхностей на каркасные плоские или пирамидальные панели, новые конструктивно-технологические решения одно- и двухуровневых куполов-оболочек из укрупненных монтажных панелей с неполным каркасом, а также новые типы узлов сопряжений сборных элементов;

- теоретическое обоснование возможности формирования эффективной треугольной сети с использованием симметрии главных линий сферы и симметрии окружностей, описывающих сферические четырех-, пяти-, и шестиугольники и с применением рациональных опорных сетей;

- варианты оптимизации геометрических параметров треугольных сетей на сфере. В каждом из них критерием оптимальности является минимальное число типоразмеров конструктивных деталей и минимальное число монтажных элементов купола, возможности укрупнительной сборки и предварительного напряжения.

- применение конструктивно-технологических методов образования поверхностей положительной и отрицательной гауссовой кривизны в виде составных сферических оболочек покрытий с высокой степенью индустриализации;

- результаты комплексных теоретических исследований конструкций составных одно - и двухуровневых сферических оболочек покрытий из стали и древесины. Проведенные исследования позволяют выявить закономерности напряженно-деформированных состояний оболочек из конструктивно-анизотропных материалов в зависимости от вида и схем распределения

внешних воздействий, кривизны пролетных конструкций, влияние жесткости и эксцентриситета опор;

- методики определения усилий и перемещений элементов сборных сферических оболочек покрытий, позволяющие учитывать следующие особенности: работу разнородных материалов в элементах конструкции, влияния геометрических несовершенств на местную устойчивость каркасных панелей в куполах-оболочках; оценки перемещений, соответствующих геометрической и физической нелинейности конструкций;

- данные экспериментальных и теоретических исследований металлодеревянных каркасных панелей, составляющих купольное покрытие, и позволяющие учитывать потери преднапряжения конструкций;

- методы по регулированию усилий в составных двухуровневых сборных сферических оболочках покрытий и аналитические зависимости по вычислению основных параметров напряженно-деформированных состояний пролетной конструкции и элементов опорного контура.

Научная новизна работы и значимость полученных результатов

Научную новизну составляют следующие впервые полученные результаты:

- разработаны новые конструктивно-технологические решения сферических оболочек, отвечающих предложенным автором новым типам разрезов поверхности сферических оболочек на сборные элементы с высокой степенью индустриализации, а также новые типы узлов сопряжений сборных элементов;

- теоретически обоснована возможность формирования эффективной треугольной сети с использованием симметрии главных линий сферы и симметрии окружностей, описывающих сферические четырех-, пяти- и шестиугольники и применением рациональных опорных сетей для центров этих окружностей;

- предложены и разработаны конструкции с эффективными технологиями изготовления и возведения, а также проведены теоретические исследования покрытий на основе перспективных разрезов в виде сборных сферических, сетчатых или геодезических куполов-оболочек, образуемых из каркасных плоских или пирамидальных панелей;

- предложены и разработаны конструктивно-технологические решения куполов-оболочек и составных структурных покрытий из плоских неполных каркасных панелей и укрупненных пирамидальных блоков;

- приведены варианты оптимизации геометрических параметров треугольных сетей на сфере. В каждом из них критерием оптимальности является минимальное число типоразмеров конструктивных деталей и минимальное число монтажных элементов купола, возможности укрупнительной сборки и предварительного напряжения;

- проведены комплексные теоретические исследования составных одноуровневых и двухуровневых сферических оболочек покрытий положительной гауссовой кривизны с пролетной конструкцией из конструктивно-анизотропных материалов. Проведенные исследования позволяют выявить 'закономерности напряженно-деформированных состояний оболочек из конструктивно-анизотропных материалов в зависимости от вида и схем распределения внешних воздействий, кривизны пролетных конструкций, влияния жесткости и эксцентриситетов расположения опор;

- апробирована методика определения усилий и перемещений элементов сборных сферических оболочек покрытий, позволяющая учитывать работу разнородных материалов в элементах конструкции, влияние геометрических несовершенств на местную устойчивость каркасных панелей куполов-оболочек; оценку перемещений конструкций, находящихся в области геометрической и физической нелинейности;

- проведены экспериментальные и теоретические исследования металлодеревянных каркасных панелей, составляющих купольное покрытие, позволяющие учитывать потери преднапряжения конструкций;

- определены возможности по регулированию усилий в преднапряженных двухуровневых сборных сферических оболочках покрытий и получены аналитические зависимости по вычислению основных параметров напряженно-деформированных состояний пролетной конструкции и элементов опорного контура.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения, а именно: п.1. «Обоснование, исследование и разработка новых типов несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений; п. 2. «Обоснование, разработка и оптимизация объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий, экономической и конструкционной безопасности на основе математического моделирования с использованием автоматизированных средств исследований и проектирования»; п. 3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности.

Практическое и теоретическое значение диссертации.

Работа 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.

Аппробация. По теме диссертации опубликовано 36 печатных работ. Из них 21 статья в научных журналах России и 5 за рубежом, в том числе 15 публикаций в рекомендованных ВАК изданиях; а также в иностранных базах данных: 5 в SCOPUS и 2 в WEB of SCIENCE; кроме этого, получено 6 авторских свидетельств и патентов.

Материалы диссертации доложены и обсуждены на научно-технических семинарах кафедр "Строительные материалы и технологии", «Здания, сооружения и автомобильные дороги», на научно-технических конференциях в МГУ им. Н.П. Огарева 2012- 2016 г. г.; на международных научно-технических конференциях «МАТЕС» в Париже и в Марракеше (Марокко) 2016- 2017 г. г.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения и пяти глав, заключения, библиографического списка из 212 наименований и приложения, общим объёмом 369 страниц, в том числе основной текст занимает 327 страниц, 195 рисунков, 14 таблиц.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОБЛАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. ПОКРЫТИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕТЧАТЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК.

Геометрической основой формообразования куполов и оболочек являются различные способы разбивки поверхности на сети, состоящие из многоугольных ячеек (треугольных, трапециевидных, гексагональных и пр.). В современной практике куполостроения наибольшее применение получили сетчатые сферические купола на основе сеток с треугольными ячейками, а также геодезические системы куполов, стержни которых являются ребрами многоугольников, вписанных в сферу и, соответственно, два способа членения поверхности сферы: сетчатый и геодезический. Принцип построения куполов на основе сеток с треугольными ячейками заключается в проецировании некоторой плоской сети на поверхность сферы. Для этого сферический купол членят на определенное число одинаковых пространственных секторов или сегментов, каждый из которых разбивается на более мелкие треугольные ячейки. Наиболее простые и универсальные решения получаются при разбиении поверхности купола в виде повторяющихся и совместимых частей сферы.

Формообразование сетчатых и пластинчатых (панельных) куполов-оболочек на поверхности в виде сферы является комплексным процессом. Уже на этой стадии проектирования решаются основные архитектурные, конструктивные и технологические задачи. Таким образом, выбор и расчет геометрической схемы купола является очень ответственной стадией проектирования, так как именно от этого зависит число типоразмеров элементов, конструкция узлов сопряжений, способы изготовления и монтажа элементов и в конечном итоге эффективность конструкции.

В процессе формообразования сетчатого покрытия на поверхности сферы выделяют два этапа: 1) выбор способа разрезки (под термином "разрезка"

понимается способ нанесения на выбранную поверхность сети геометрических линий каркаса, либо панелей купола); 2) расчет координат узлов.

Для сферы очень часто за основу принимают радиально-кольцевую систему разрезки. Суть этой системы заключается в членении поверхности вращения меридиональными и параллельными плоскостями на треугольные (у полюса) и трапециевидные элементы (рис. 1.1). Число типоразмеров треугольных и трапециевидных элементов при этой системе разрезки определяется числом ярусов между параллельными сечениями и зависит от числа меридиональных сечений, а также от формы меридиональной образующей кривой. При формообразовании сферических сетчатых оболочек на плане, близком к прямоугольному или шестиугольному, используют также сеть меридианов, образованную пересечением со сферой двух или трех пучков лучей из меридиональных или произвольных плоскостей с взаимно пересекающимися осями (двух или трехлучевые системы). Как видно из схем рис. 1.1 б и в, число типоразмеров элементов при такой разрезке значительно больше, чем при радиально-кольцевой системе.

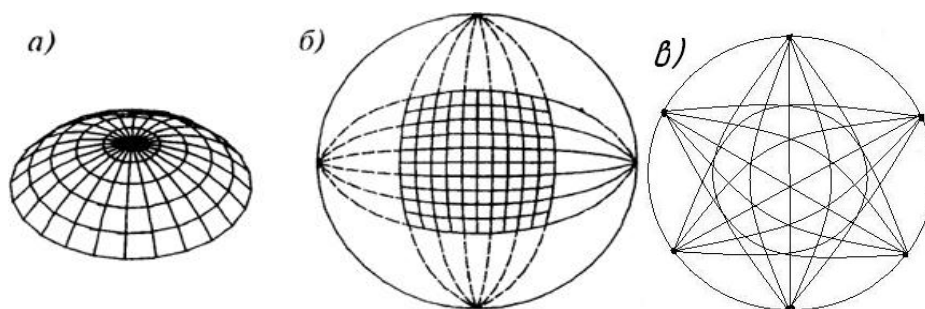


Рис. 1.1. Формирование сетки купола по способу разрезки сферы:

а - радиально-кольцевая разрезка; *б* - разрезка сферы двумя пучками меридиональных плоскостей с взаимно перпендикулярными осями (двухлучевая); *в* - разрезка сферы тремя пучками лучей из меридиональных или произвольных плоскостей с взаимно пересекающимися тремя осями (трехлучевая).

Основными применяемыми в настоящее время схемами построения сетки куполов являются: радиально-кольцевая со связями (купол Шведлера, рис. 1.2 а); звездчатая (купол Фёпля, рис. 1.2 б); схема Чивитта (рис. 1.3 а); схема «Ромб» (рис. 1.3 б) [36, 68, 113-115, 123, 152, 153].

Первичная разбивка так называемой звездчатой системы - меридиональная (рис. 1.2 б). На сферический сегмент наносят сеть меридианов. Каждый полученный участок делят четырехугольными ячейками таким образом, чтобы два противоположных узла ячейки располагались на одном меридиане, а два других - на одной параллели. Звездчатый купол в своей основе имеет равнобедренный треугольник. Здесь в отличие от купола Шведлера (рис. 1.2 а) имеются кольца, но нет ребер. Различная форма конструкции достигается благодаря изменению длин не меридиональных сторон треугольников сетки.

Может быть построено две разновидности сетей, применяемых для звездчатой системы разрезки, - правильная сеть Чебышева и сеть локсодромий (линий, имеющих постоянный угол наклона к меридиану).

При звездчатой разбивке длину всех меридиональных стержней назначают одинаковой, что приводит образующуюся сеть к правильной сети Чебышева. Применение правильной сети Чебышева (рис. 1.2 б, в) приводит к сгущению сетки по мере приближения к полюсу купола. В звездчатой схеме все меридиональные стержни имеют одинаковую длину, длина стержней в кольцевом направлении уменьшается кверху от яруса к ярусу. В меридионально-перекрещивающейся схеме длина всех стержней постоянная. Они образуют сетку ромбических ячеек, называемую правильной сетью Чебышева. Использование сети локсодромий частично устраняет этот недостаток, однако значительное уменьшение длины боковых сторон треугольников также вызывает сгущение сетки (рис. 1.2, в). В звездчатой системе с применением сети Чебышева длина стержней вдоль линий сети постоянна, хотя изменение углов между стержнями приводит к тому, что число узловых элементов равно числу ярусов. При локсодромной разрезке, наоборот, узловые элементы могут быть одного типоразмера, а число типоразмеров стержней, расположенных вдоль линий сети, может быть равно числу ярусов.

Система Чивитта устраняет основной недостаток звездчатой системы - сгущение сетки. Первичная разбивка - меридиональная. Основание каждого

полученного сектора делят на определенное количество равных участков, а затем проводят кольцевые сечения, число которых равно числу членений основания. Каждое кольцевое сечение делят на равные части, число которых в каждом последующем сечении, считая от основания сектора, уменьшают на единицу (рис. 1.2).

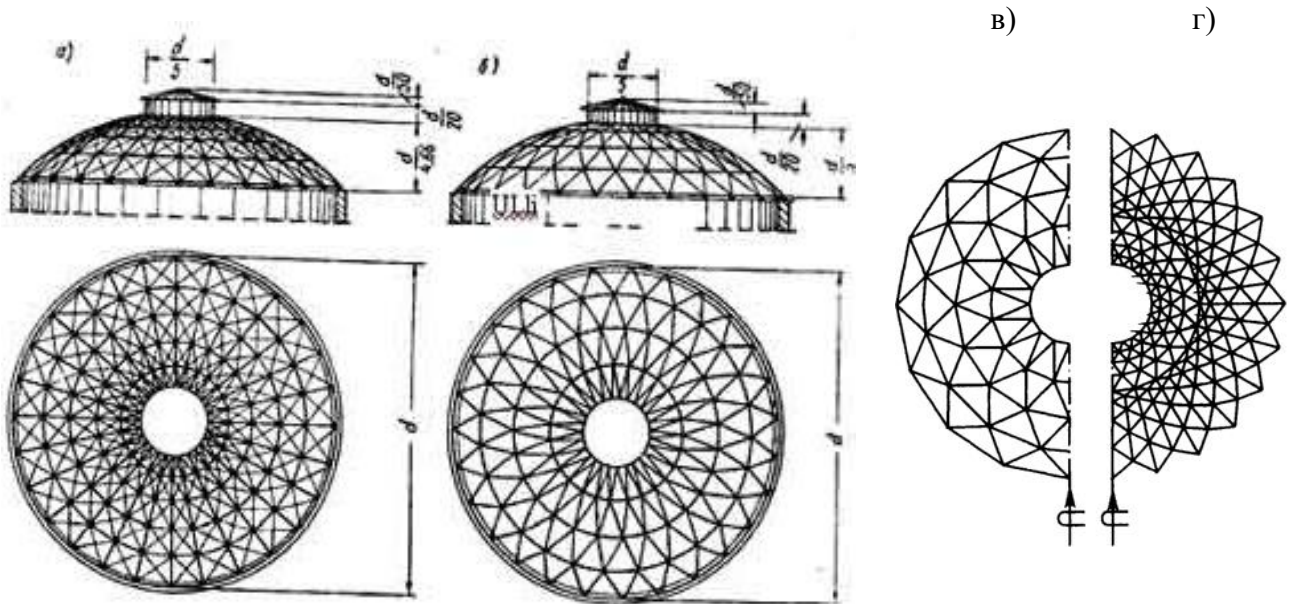


Рис.1.2. Схемы куполов: а — купол И. В Шведлера; б — звездчатый; в- звездчатая система на основе сети Чебышева; г - на основе сети локсодромий.

Полученные точки соединяют и таким образом получают сеть треугольников, основание которых вдоль каждого яруса, как и в звездчатой системе, равны. Однако образованные таким способом треугольники в отличие от звездчатой схемы неравносторонние, поэтому число их типоразмеров соответствует квадрату числа членений (ярусов). В системе Чивитта (рис. 1.3) все узлы яруса лежат в одной горизонтальной плоскости, что позволяет при разбивке купола проектировать одинаковыми расстояния между кольцами или длину кольцевых элементов в одном ярусе. Система Чивитта может быть представлена как сомкнутые на сфере треугольные сети секторов с вершинами, состоящие из множества точек пересечения трех пучков параллельных плоскостей и поверхности сферы. Сектора состыкованы из сферических треугольных сетей по оси симметрии сектора, каждая половина из которых

образована пучком плоскостей, параллельных одной и второй границе сектора, и пучком, состоящим из кольцевых плоскостей. Поэтому формообразование круглых в плане покрытий по данной системе решается достаточно просто, с круговым опорным кольцом.

Наиболее ранней примененной, известной с прошлого века, геометрией поверхности сетчатого купола, является схема Шведлера (рис. 1.2) [113]. Самый большой купол этой системы построен в 1955 г. в Шарлотте (США) пролетом 101,8 м, высотой 34,м [113-115].

Хорошие результаты при решении задач снижения числа типоразмеров и диапазона варьирования углов в конструировании дает использование схемы Чивитта (рис.1.5,е). В этой схеме все узлы яруса лежат в одной горизонтальной плоскости, число ячеек в каждом ярусе увеличивается от центра к краю в арифметической прогрессии [113-115,127, 216]. По схеме Чивитта с 12 секторами построены купольные покрытия в Хьюстоне (США) пролетом 195,6 м /13/ и Новом Орлеане (США) пролетом 207,3 м[65, 110, 112,113-115].

Также много примеров осуществленных куполов со звездчатой разбивкой. Осуществлены купола, пролетами от 18,3 м /290/ до 93,5 м, разработан проект купола пролетом 275 м [113]. Звездчатая схема может быть выполнена и в другом варианте (рис. 1.5, г) [113-115]. Сущность этой системы **"Ромб-1"** заключается в первичном меридиональном делении купола на сектора с последующим членением каждого сектора на ромбовидные ячейки путем нанесения правильной сети Чебышева. Если в звездчатой схеме противоположные узлы ячейки сети расположены на меридианах или соответственно на параллелях, то в данной системе линии сети Чебышева различных направлений располагаются вдоль боковых сторон сектора. Ромбическая сеть, показанная на рис. 1.3, построенная на основе правильной сети Чебышева, отличается равенством длин стержней, расположенных в меридиональном направлении. В результате такой разбивки получается достаточно равномерная сеть из равнобедренных треугольников, число

типоразмеров которых приблизительно в два раза меньше, чем в системе Чивитта. Система "Ромб-1" применена, в частности, при проектировании купола диаметром 65 м в Душанбе (рис. 1.4).

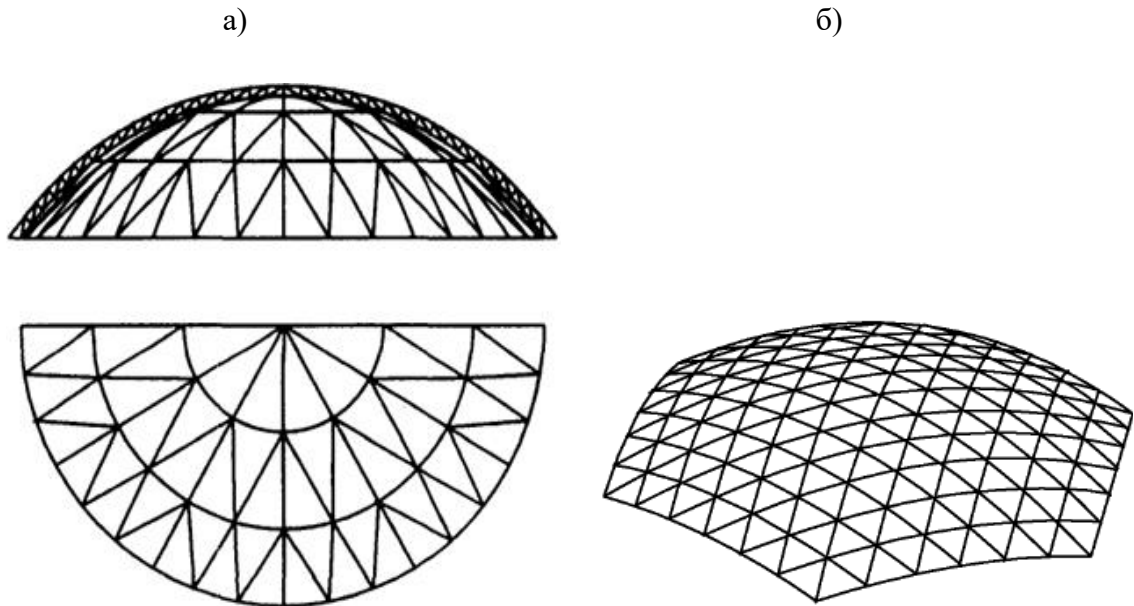


Рис. 1.3. Переход к сомкнуто-лучевым разрезкам: а - система Чивитта; б – система «Ромб-1» на основе сети Чебышева.

В отличие от звездчатой системы и системы Чивитта, основания секторов ромбического купола не совпадают с кольцевыми сечениями и образуют пространственную (неплоскую) кривую [113-115, 123]. Система может быть представлена как сомкнутые на сфере треугольные сети секторов с вершинами из множества точек пересечения трех пучков параллельных плоскостей и поверхности сферы.

Каждый сектор образован двумя пучками плоскостей, параллельных одной и второй границе сектора, и пучком, состоящим из кольцевых плоскостей. Поэтому формообразование круглых в плане покрытий по данной системе решается относительно сложно.

Б. Г. Мухин, А. С. Гвамичава, Н. Царапкин и Г. Г. Зедгинидзе [31] в 1987 году получили авторское свидетельство СССР на купольное покрытие из плоских панелей (рис.1.5). Сборная сферическая оболочка состоит из шестиугольных разнотипных марок панелей 3, собранных из двух

состыкованных по длинной стороне 4 трапеций 5 и 6. Боковые стороны трапеций 7 для панелей всех марок равны. Основания панелей 8 имеют убывающую длину от центра, при этом панели сопряженных меньшими основаниями трапеций образуют одинаковые ряды 9 разнотипных марок.

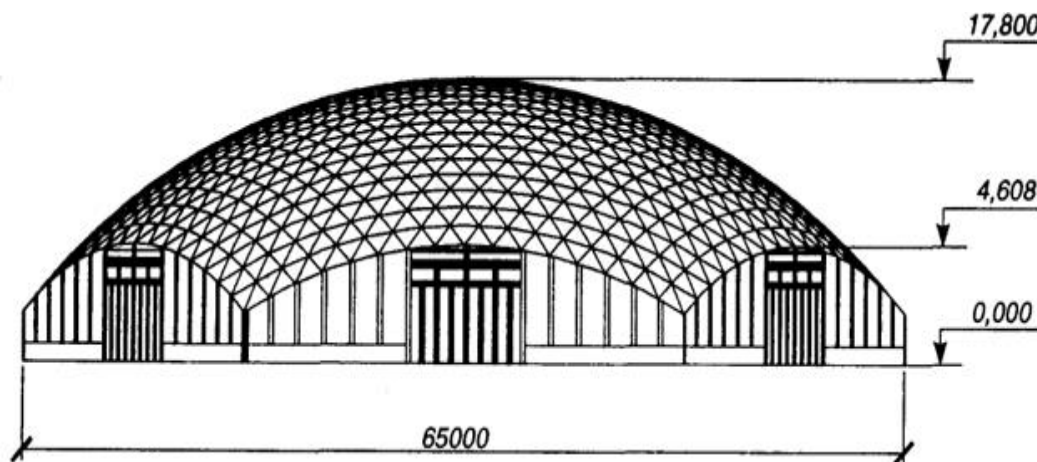


Рис. 1.4. Купол диаметром 65 м в Душанбе (разрезка системы "Ромб-1").

Сборные элементы этого купола в отличие от известных симметричны и могут выполняться из двух плоских трапециевидных панелей.

Двухлучевые системы и сомкнутые лучевые системы применяются в основном для пологих сферических куполов. Однако отдельные варианты разрезов позволяют получать вспарушенные купольные покрытия, а имеющиеся вырезы в схемах треугольных сеток могут быть использованы для организации входов, въездов и световых ограждений (рис.1.5).

С точки зрения методики проектирования геометрия радиально-кольцевого членения поверхностей чрезвычайно легка для применения. Геометрия меридионально-кольцевого членения поверхностей не требует при проектировании сложных вычислительных операций и потому доступна любому проектировщику. Именно из-за простоты членения поверхностей можно объяснить тот факт, что во всех системах САПР имеются библиотечные данные в основном по меридионально-кольцевым куполам. Сетчатые купола по конструктивному выполнению могут быть односетчатыми (однослойными) и двухсетчатыми (двухслойными). Каркасы односетчатых куполов могут формироваться из стержней с различным типом сечения. Наиболее

распространенным типом сечения стержней является трубчатое, как наиболее экономичное по расходу материала. Применяются, но значительно реже, другие типы сечений. Каркасы двухсетчатых куполов формируются из стержней составного сечения, выполненных по типу ферм с параллельными поясами. Пояса могут иметь тавровое или Н-образное сечение. Соединительная решетка располагается в одной или двух плоскостях, последнее относится к случаю мощных широких поясов.

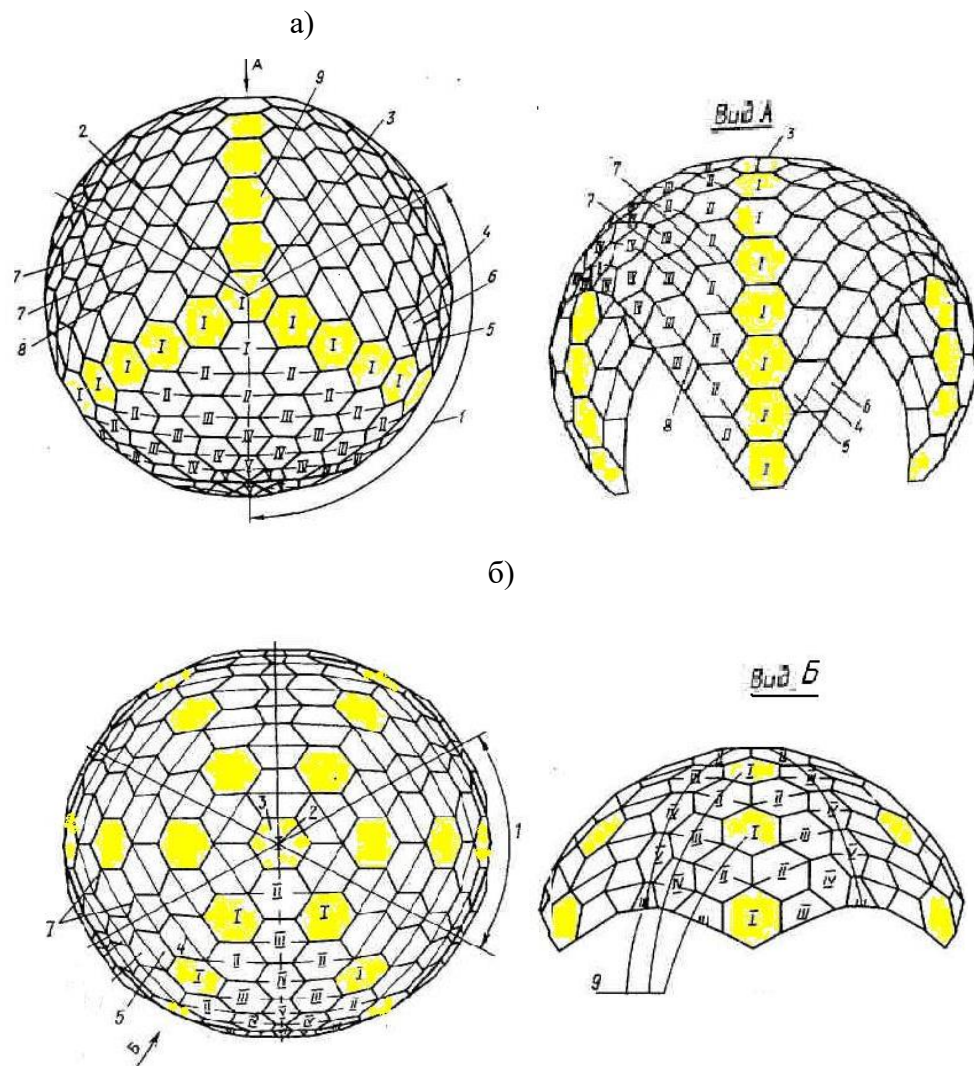


Рис. 1.5. Разрезка сомкнутых секторов сферы двумя пучками центрально-лучевых плоскостей двух направлений и одним пучком параллельных плоскостей: а - сомкнутая трехлучевая, б - сомкнутая шестилучевая.

Существенными конструктивно-технологическими недостатками меридионально-кольцевых схем разбивки являются очень мелкие ячейки в

зенитной части купола, а также большое количество типов элементов разбивки, варьирование углов соединения элементов практически от 0 до 180 градусов. Геометрия проектирования трехлучевого и сомкнуто-лучевого членения сферических поверхностей относительно трудна для реализации. Она требует при проектировании сложных вычислительных операций, но, учитывая развитие компьютерных технологий, сейчас эта геометрия также доступна проектировщику. Существенными конструктивно-технологическими недостатками трехлучевых и сомкнуто-лучевых схем разбивки являются наличие многих панелей всевозможных направлений по отношению к поверхности сферы, а также большое количество типов элементов разбивки.



Рис. 1.6 «Сферическая оболочка» Сивчука Н.А.

К достоинствам этих схем относится возможность их применения на любой поверхности вращения или комбинации нескольких поверхностей вращения [113-115, 123] и сравнительно небольшое количество типоразмеров элементов. Эти качества позволяют выбрать общую форму покрытия и геометрические характеристики каркаса, оптимально удовлетворяющие требованиям функционального назначения здания, экономичности, а также достаточно просто решить схему каркаса и обеспечить удобство монтажа.



Рис. 1.7. Купол Чивитта с ромбическими панелями широтной раскладки диаметрами 60 м (расход алюминия 16 кг/м^2) и 72 м (расход алюминия $18,6 \text{ кг/м}^2$), имеющие местные стержневые усиления (СССР).

Для возведения куполов, запроектированных по меридионально-кольцевым и сомкнуто-лучевым схемам применяют известные методы укрупнительной сборки элементов, монтажа конструкций по лесам, подращиванием или наращиванием, как правило, треугольных панелей.

1.2. ПОКРЫТИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК.

В отличие от сетей радиально-кольцевого и сомкнуто-лучевого построения, где размеры ячеек в полюсной и экваториальной части значительно отличаются друг от друга, геодезические треугольные сети, даже при очень большом числе членений, имеют относительно малое число типоразмеров элементов (рис.1.8-1.10). Геодезической разбивкой принято называть членение поверхности сферы путем проведения взаимно пересекающихся геодезических линий на предварительно выделенных типовых участках в виде сферического треугольника (рис.1.11, 1.30). Заметим, что геодезической линией на сфере называют окружность с радиусом, равным радиусу сферы. Типовые участки в виде треугольников обычно образуются путём центрального проецирования на сферу граней правильных многогранников, чаще всего для этой цели используются грани

икосаэдра. В результате такого проецирования на сфере образуются равносторонние сферические треугольники, называемые треугольниками Мебиуса.

Геометрия геодезических сетевых разбивок появилась всего 50 лет тому назад. Первые же попытки конструирования геодезических оболочек показали, что купола невозможно проектировать без заранее рассчитанных параметров сетевых разбивок – координат узловых точек и тригонометрических параметров.

В 1947 году Р. Б. Фуллер начал разрабатывать конструкцию «геодезического купола», представляющего собой полусферу, собранную из тетраэдров. Эта конструкция оказалась очень эффективной при том, что она позволяет перекрывать большие пространства практически без ограничений по площади, но еще более ее экономическая целесообразность возрастает пропорционально размеру, также она обладает очень хорошими характеристиками прочности: может выдерживать порывы ураганного ветра до 210 миль/ч.

Первый **геодезический** купол Фуллера, имевший 18 м в диаметре, был построен в Woods Hole, Массачусетс для местного ресторана в 1952 г. [123, 201, 204].

В 50-х годах в США было построено более 300 малопролётных радарных куполов [125] с числом граней только до 720, В радарных куполах применялись преимущественно 320-гранные разбивки. К 1953 году относится возведение Фуллером первого крупного гражданского здания покрытия павильона фирмы Форда в Дирборне, пролётом 30 м и весом 8,5 тонн. Геометрической основой купола является всё та же 320-гранная разбивка.

В 1959 г. Фуллер построил купол для Американской национальной выставки в г. Москве (рис.1.8), проходившей в Сокольниках [130, 201, 204]. Покрытие выполнено в виде ромбических алюминиевых листов.

Купольный дом, предложенный Фуллером в 1963 году целиком из пластмасс, выглядит как очень большой футбольный мяч, т.е. 180-гранник (рис. 1.9). Он был задуман как "открытое" жилище с 7-футовыми круглыми отверстиями, предусмотренными проектом в качестве окон, дверей, накопителей солнечной энергии и турбин ветряков. Конструкционной особенностью является то, что сама поверхность собирает дождевую воду в особый резервуар.



Рис. 1.8. Купол Р. Фуллера для американской национальной выставки 1959 года в Москве.

В 1960 году Фуллером был возведен геодезический купол "Климатрон" высотой 21 м, используемый как оранжерея ботанического сада, и выполненный в алюминиевых конструкциях (рис.1.10). От покрытия к покрытию Фуллер предлагает все новые и новые методы укрупнения элементов куполов и новые приемы их сборки (рис.1.11-1.13).

Для своих конструкций Фуллер разработал сложные узлы соединения элементов однослойного купола, позволяющие изменять угол наклона элементов в двух плоскостях (рис.1.11, 1.13).



Рис. 1.9. Купол Моноhex Фуллера.

Самым известным сооружением Фуллера является павильон США на Всемирной выставке в Монреале 1967 г. «Ехро-67» (рис.1.12).



Рис.1.10. Сент-Луис, США. Геодезический купол «Климатрон».

Трёхчетвертной шаровой купол в Монреале выполнен полностью стержневым. Шестиугольные выпуклые панели из акрилового стекла вставлены в шестиугольные ячейки внутреннего контура.

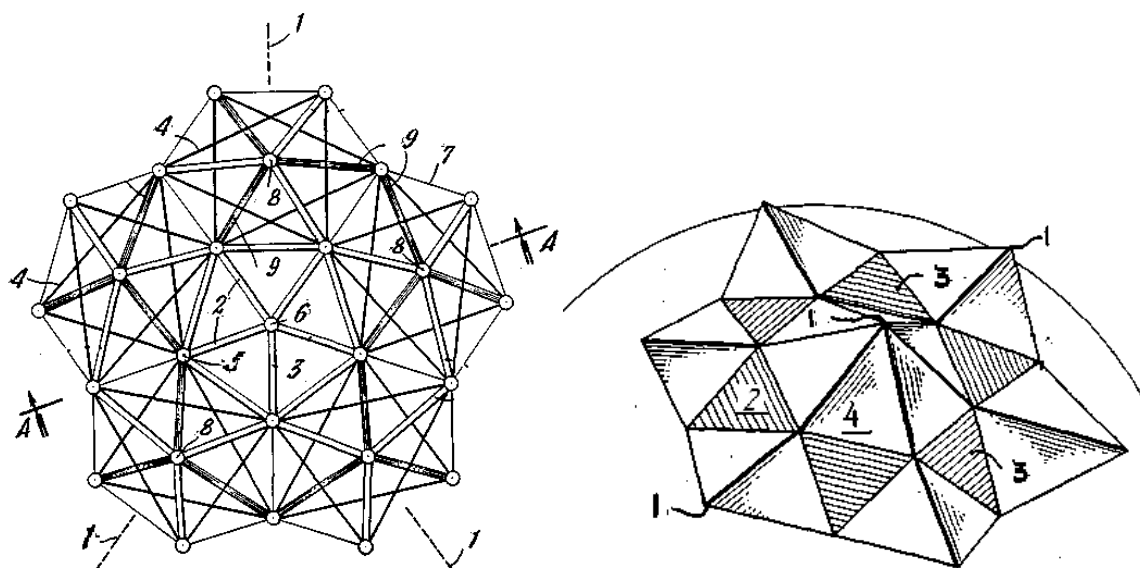


Рис. 1.11. Монтажные элементы, предложенные для купола Фуллера.

Верхняя часть купола спроектирована на основе геодезической сети, а нижняя часть имеет радиально-кольцевую схему



Рис. 1.12. Выставочный павильон Фуллера в Монреале (диаметр 75 м).

Однако в своих конструкциях он использовал более простые решения узлов, например узлы, запатентованные Джанет Б. Джонсон и Деннис О. Джонсон в 1979 году (рис.1. 14).

В геометрической схеме другого купола Фуллера в Батон Руже применена исключительно мелкаячеистая 38880-гранная сеть. Узловые точки тоже расположены на трёх сферических уровнях. Ограждение - в виде шестиугольных пирамид в пределах нижних двух сферических уровней (рис.1.11). Применённая сеть даёт 13 типов пирамидальных элементов, но сборка купола в Батон Руже производилась из деталей не в виде отдельных пирамид, а в виде укрупнённых элементов. Последние образованы путём разрезания по линиям, соединяющим вершины шести пирамид, расположенных вокруг центральной пирамиды. При такой разрезке общее число типов элементов уменьшается на единицу.

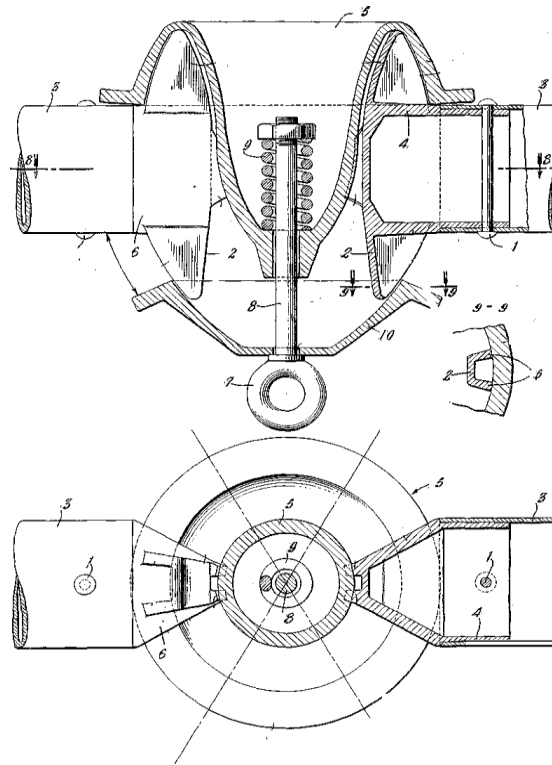


Рис. 1.13. Узлы крепления купола Р.Б. Фуллера.

Купол в Батон Руже - цельносварной. Разрезка деталей такова, что стыковка и сварка производилась не по линиям ендов, а по линиям, расположенным на боковой грани пирамид. Для точной стыковки к краям листов приваривались с верхней стороны короткие стержни. Входя за края листов, они точно фиксировали местоположение листа в плоскости грани. Схождение швов возможно только при точном координатном положении деталей по всему ярусу,

что достигалось путём манипуляции монтажными шестами. Длина таких листов была более 30 метров.

Наибольшая трудность при сборке больших куполов - это получение плотного примыкания краёв листов. Расчётные допуски должны быть минимальными и с самого начала монтаж должен быть точным. При возведении следующего аналогичного купола (в Вуд Ривере) был принят другой метод сборки и другое конструктивное решение. Верхний его контур представляет собой гексагональную сеть, образованную путём соединения стержнями вершин шестигранных пирамид. Для проектирования купола применена та же «38880-гранная» сеть, но дополненная гексагональной сетью верхнего контура. Сборные детали - в виде шестигранных пирамид.

Сборка купола производилась способом «сверху - вниз». Сначала на стойках-лесах монтировался участок зенитной части почти на треть пролёта, затем к краям купола были прикреплены полотнища из нейлоновой ткани. Последние усилены радиально расположенными тросами, закреплёнными в центральной части здания. Таким путём внутреннее пространство изолировалось, в него при помощи вентиляторов нагнетался воздух и под его давлением смонтированная часть купола поднималась вверх. Монтаж всех деталей при этом способе производилось на уровне земли ярус за ярусом. После завершения сборки оболочки купол весом 570 тонн был опущен на опорное кольцо.

Пропорциональные характеристики всех названных куполов одинаковые - все они представляют собой сегмент сферы, составленный из пяти больших типовых треугольников. Разница лишь в том, что в первых двух куполах краевым контуром являются арочные линии типовых треугольников, а два последних купола опираются на круговые опорные кольца - просвет между нижними линиями типовых треугольников и опорным кольцом заполнен продолжением оболочки купола.

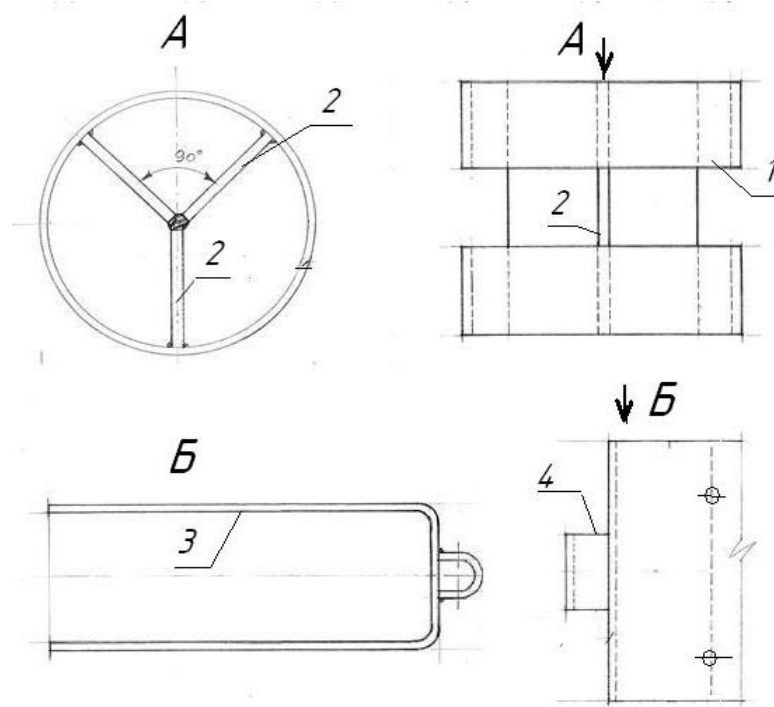


Рис. 1.14. Узел соединения элементов купола.

Известно, что в икосаэдральных сетях, при ориентации на зенит одной из пятиугольных ячеек, ни один кольцевой ряд не может лежать в горизонтальной плоскости. Поэтому при сочетании в одном куполе двух видов сетей - меридионально-кольцевой и геодезической, необходимо устроить переходный ярус. В монреальском куполе такой переходный ярус устроен на уровне 10-го ряда ячеек. Идея о эффективности такого сочетания двух видов разбинок была высказана Р. Б. Фуллером в 1960 г. в одном из его патентов [130, 201, 204].

При проектировании куполов больших пролётов группа Фуллера пользовалась только указанными двумя видами сетевых разбинок. Здесь следует указать, что в зарубежной печати до сих пор нет исчерпывающих сведений о геометрических основах этих куполов.

«Геодезические купола» получили большое распространение, они продолжают использоваться и сейчас в крупных общественных сооружениях, например: «Проект Эдем» (рис.1.15).

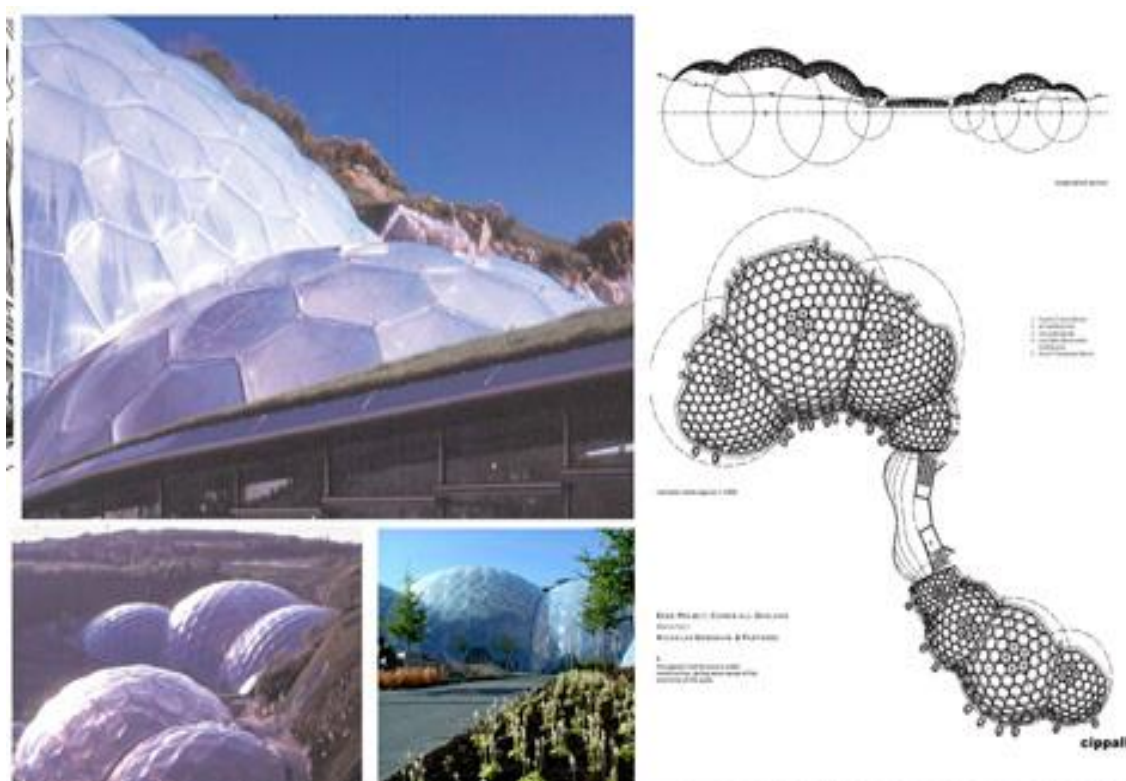


Рис. 1.15. Узел соединения элементов купола, построенного 2002 г. $D = 125$ м. Корнуэлл, Англия. Архитектор Николас Гримшоу. Гряда куполов ботанического сада “Эдем”. Структура фирмы “Меро”, расход стали 24 кг/м².

Всего было построено около трехсот тысяч «геодезических куполов», они широко используются как ангары, склады, эксплуатируются как жилища в местах со сложными погодными условиями (купол на Южном полюсе, рис. 1.16).



Рис. 1.16. Купол американской станции Амундсена-Скотта в Антарктиде.

В стеклянном куполе (на стальном каркасе) в Антарктике использованы узлы соединения стальных элементов по типу узла «Цейсс» (рис. 1.15-1.18).



Рис. 1.17. Узлы соединения элементов купола в Антарктиде.

Самый большой геодезический купол в мире, построенный в 1997 году [113], достигает 188 метров в диаметре (рис.1.19). Он находится в японском городе Нагоя. Высота сооружения 67 метров. Купол — это крыша стадиона, способного вместить 40 тысяч человек.

Первый отечественный **кристаллический** (геодезический) купол - крытый ток в одном из подмосковных колхозов возведён М. С. Туполевым в 1949 году [113,131,176]. Купольное покрытие собрано из треугольных деревянных щитов. По обрешётке сборных щитов, укладывалась кровля из деревянной дранки. Для сферических куполов большой высоты рационально использование симметрии правильных многогранников икосаэдра и додекаэдра. Они имеют десять тройных осей вращения и шесть зеркально-поворотных осей десятого порядка. Предложено большое количество вариантов построения сферических сетей с использованием симметрии правильных многогранников.

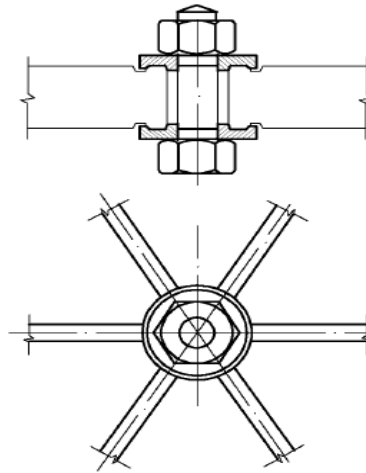


Рис. 1.18. Узел соединения элементов купола системы «Цейсс».

Основой построения по способу Туполева является усеченный икосаэдр, состоящий из двенадцати правильных пятиугольников и двадцати правильных шестиугольников. Вершины и центральные точки всех граней, спроецированные на сфере, при соединении образуют исходный 180-гранник. Полученные равнобедренные треугольники двух видов далее могут быть разбиты дугами больших окружностей на более мелкие грани (рис.1.20).

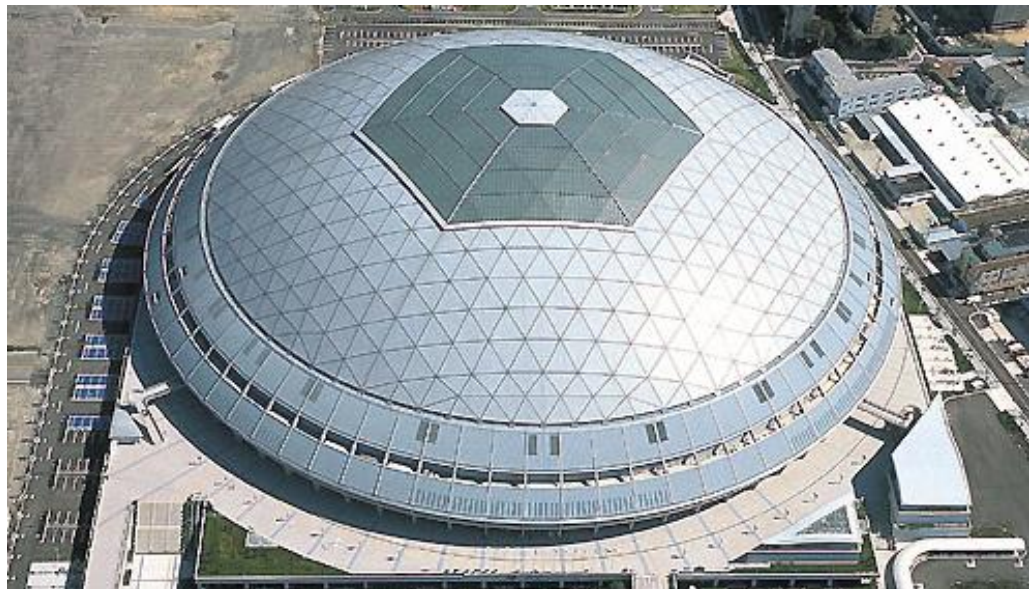


Рис. 1.19. Геодезический купол 188 метров в диаметре в японском городе Нагоя.

Аналогичную конструкцию имеют спроектированные в 50-х годах покрытия манежа в Москве и кинотеатра «Юность» в Загорском районе Подмосковья (1961 г.) [175, 176]. Геометрической основой этих куполов

является 180-гранная сетевая разбивка, полученная путём; разделения на одинаковые треугольники граней усеченного икосаэдра и центрального проецирования их на поверхность сферы.

Эта сетевая разбивка впервые была применена А. А. Журавлёвым при проектировании кафе в г. Северодонецке в 1966 году [79-87]. Такая же сеть является геометрической основой сетчатого купола с тентовой оболочкой пролётом 43 метра (рис. 1.21), возведённого в 1968 году в международном лагере под Казанью по проекту «Союзспортпроекта» [93, 130].

В 60-е годы М. С. Туполевым совместно с И. Гохарь-Хармандаряном, М. Мышкисом, А. Поповым, и Ю. Смирновым был спроектирован ряд интересных купольных сооружений пролетом до 160 м, но они, к сожалению, не были осуществлены в натуре [176].

Каждая сферическая треугольная грань 180-гранника разделена на четыре треугольника. Все линии разбивки являются участками больших кругов(отрезками главных окружностей, центры которых совпадают с центром сферы). Так можно получить 720-гранник, вписанный в сферу. В начале 50-х годов М.С. Туполевым были впервые опубликованы параметры икосаэдральные 720-гранной разбивки, полученные путём деления пополам высот равнобедренных треугольников 180-гранной сети [176].

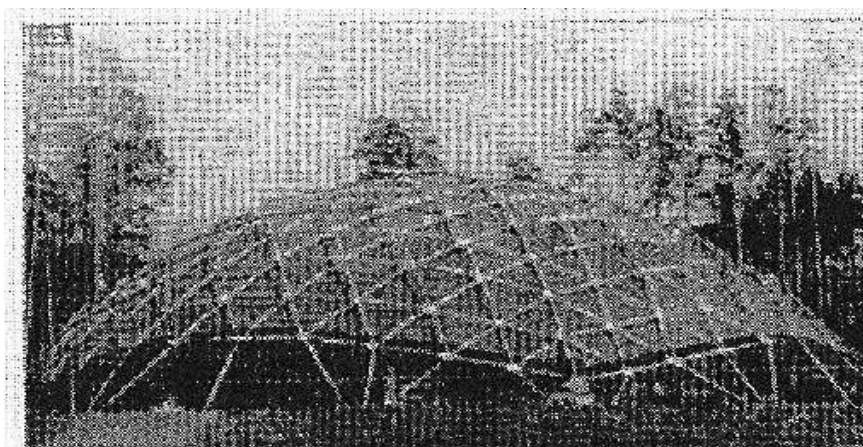


Рис. 1.20. Купол в международном лагере под Казанью.

В 1968 году М. С. Туполев совместно с Ю.А. Морозовым опубликовал параметры ещё одной разновидности 720-гранной сети. Способ образования

сети подобного вида был опубликован раньше, в 1965 году, проф. В. В. Ермоловым при описании способа получения 500-гранной разбивки [162], Обе эти сетевые разбивки получены путём деления грани икосаэдра на одинаковые треугольники и центрального проецирования их на поверхность сферы.

Следует отметить, что в первоначальный период внедрения геодезических оболочек геометрические параметры куполов рассчитывались вручную. Это было вполне возможным, так как на типовом участке купола в виде сферического прямоугольного треугольника Шварца находится небольшое число треугольных ячеек (рис. 1.21). Также вполне возможно выполнить вручную и чертежи сетевых разбивок. Используя рассчитанные параметры, изготавливался точный макет купола, с помощью которого разрабатывались монтажные варианты купольных зданий.

Автоматизация проектирования оболочек, а именно, программированный расчёт геометрических параметров, сыграли решающую роль в эволюции геодезических куполов - теперь стало возможным с большой точностью рассчитывать многоячеистые сетевые разбивки.

Фаза частичной автоматизации процесса проектирования оболочек протянулась на довольно большое время, вплоть до появления методов программирования с графическим выводом информации. Эта первая фаза захватывает период 80-годов и даже 90-е годы. Так, например, к 1973 году относится строительство в г. Истре купола пролётом 32 метра по проекту института ЦНИИПроектстальконструкция [115]. Авторы его - В. А. Савельев и И. В. Ломбардо (рис. 1.21 а). Геометрической основой купола является новый вариант 720-гранной сети, полученный путём деления пополам всех рёбер 180-гранной сети М. С. Туполева.

Ещё одна разновидность 720-гранной сети применена при проектировании зала птичника Киевского зоопарка пролётом 24 м, построенного в 1977 году (автор В. А. Михайлов, рис.21 б). В 1969 году Р. Я.

Бессонова, Е. А. Попова и А. М. Стволов опубликовали в Перми схему сетевой разбивки, основанной на применении икосододекаэдра [113-115]. Икосододекаэдр сначала превращается в 80-гранник путём разделения пятиугольных граней на одинаковые треугольники, а затем, путем центрального проецирования средних точек рёбер 80-гранника на сферу и при их соединении разбивочными линиями образуется 320-гранная сеть.

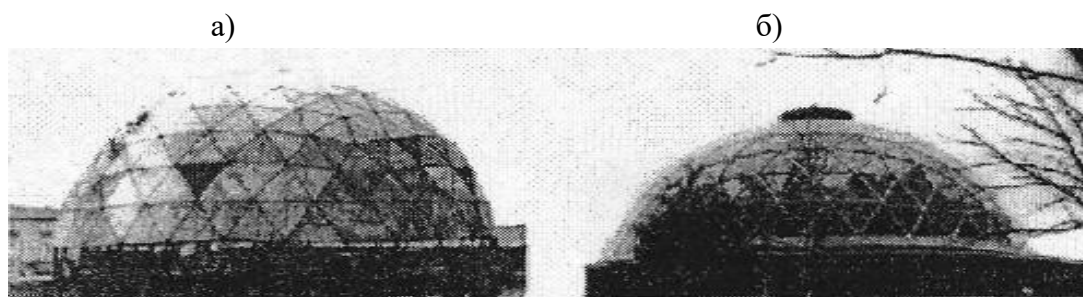


Рис.1.21. Купола на основе 720-гранных сетевых разбивок Туполева

Ряд схем сетевых разбивок, но без их расчета, предложен в 1969 - 72 г. г. А. Н. Косолаповым - путём деления рёбер икосаэдра пополам, способ преобразования грани икосаэдра с помощью медиан и способ с использованием плосконосого додекаэдра [103]. Схемы некоторых рассмотренных им сетевых разбивок доведены до четвёртой стадии членения, начиная от исходного типового участка. В них количество типов граней возрастает очень быстро по мере увеличения стадий членения, Так, при делении рёбер икосаэдра пополам уже на четвёртой стадии членения (т.е. в 1280-гранной сети) образуется 15 типов граней, а затем количество их будет возрастать лавинообразно. Исследования А. Н. Косолапова представляют интерес в теоретическом плане, они способствуют уяснению существа проблемы в области поиска сетевых разбивок. Из его работы можно сделать вывод, что способов геодезической разбивки может быть бесконечное множество, каждый из которых образует сети с определённым количеством типов граней (добавлю: и типов рёбер, и типов узловых точек), что необходим метод ограничения бесконечного множества способов разбивки для того, чтобы использовать один тип сети для данного конкретного случая проектирования

купола. Это особенно важно при подборе сетевых разбивок с очень большим количеством ячеек (скажем, до 20-40 тысяч ячеек), необходимых для проектирования большепролётных оболочек.

С использованием указанных разрезов и новых конструктивно-технологических решений построены: выставочный павильон ВДНХ СССР диаметром 21м (рис.1.22), здание водно-оздоровительного корпуса пансионата «Березки» Госстроя СССР пролетом 40 м, покрытие лаборатории «Искусственный небосвод» (1982 г.) Научно-исследовательского института строительной физики диаметром 27,8 и высотой 15,35 м и другие [113- 1151. [176]. Для указанных куполов также использовался узел, приведенный на рис. 1.22.

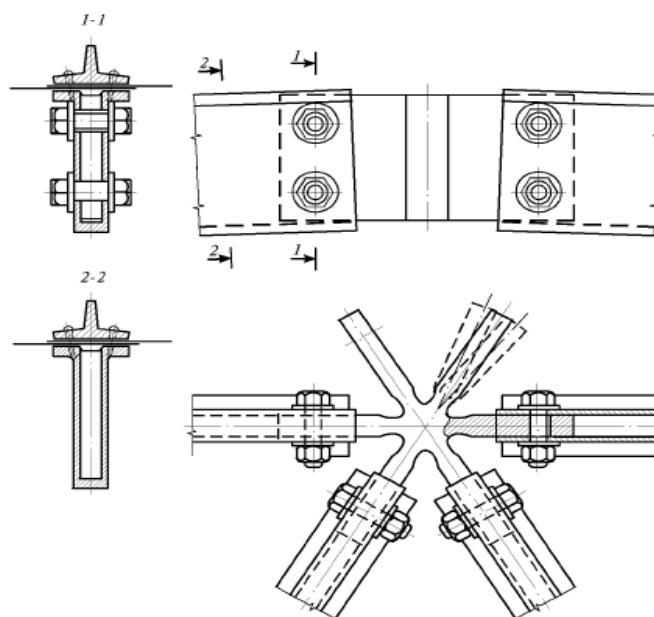


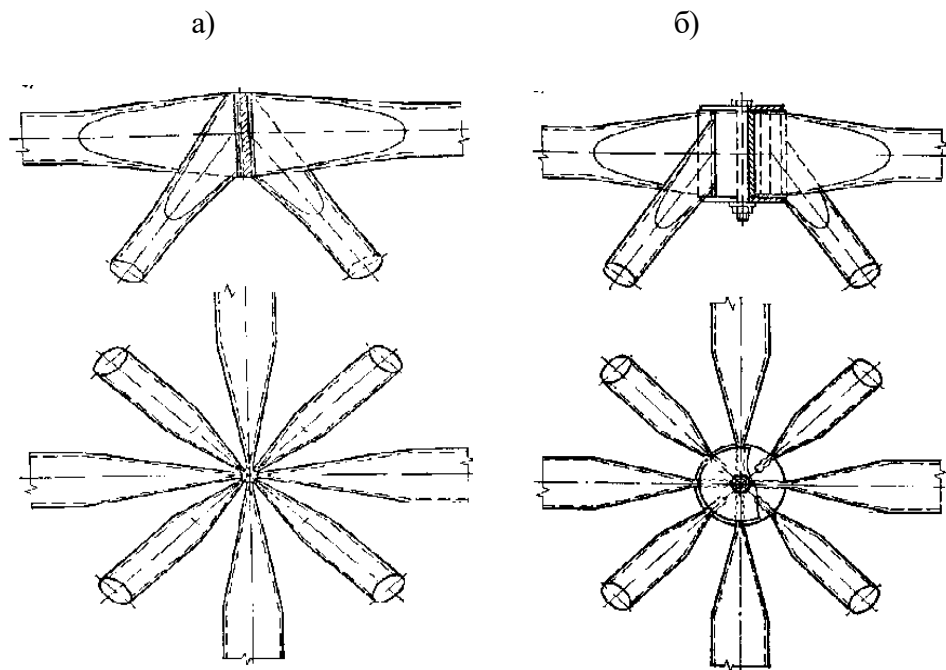
Рис.1.22. Узел соединения стержней каркаса алюминиевых сетчатых оболочек

Стержни купола присоединяются с помощью болта, установленного в одно из заранее выполненных отверстий пяти- или шестилепестковой узловой детали, второе отверстие выполняется по месту. Люфт в 2 - 3 мм обеспечивает возможность поворота стержня по лучу узловой детали на требуемый угол.

При монтаже до завершения сборки всего каркаса болты не затягивают и, как только все элементы купола установлены и конструкция приняла проектную геометрическую форму, производится контролируемое натяжение

болтов. Поверх стержней каркаса укладывают треугольные алюминиевые листы толщиной 1,0-1,2 мм, являющиеся кровельным покрытием.

Для большого числа сходящихся элементов купола наиболее простым и экономичным является узел, выполняемый ванной сваркой, предложенный в институте ЦНИИСК. Узел для стальных стержней купола типа «Берлин» также предназначен для большого числа стержней, но его сборное решение не дает равнопрочное со стержнями соединение на стыках (рис. 1.23).



1.23. Узел соединения стержней сетчатых оболочек: а) ЦНИИСК ; б) «Берлин».

В Новочеркасском политехническом институте в 70-е годы XX века А.А. Тумасовым [68] был изобретен и запатентован узел соединения трубчатых стержней ПСК (рис. 1.24 а, б, в). Такой узел позволяет довести до максимума степень заводской готовности ПСК, перевозить их элементы в упакованном виде, снизить трудозатраты при монтаже. Кроме этого доступен демонтаж и повторный монтаж конструкций, что особенно актуально для временных и сезонных сооружений.

Узел состоит из прижимных дисков, в которых имеется центральный стяжной болт, а между дисками радиально в плане расположены стержни со сферическими головками.

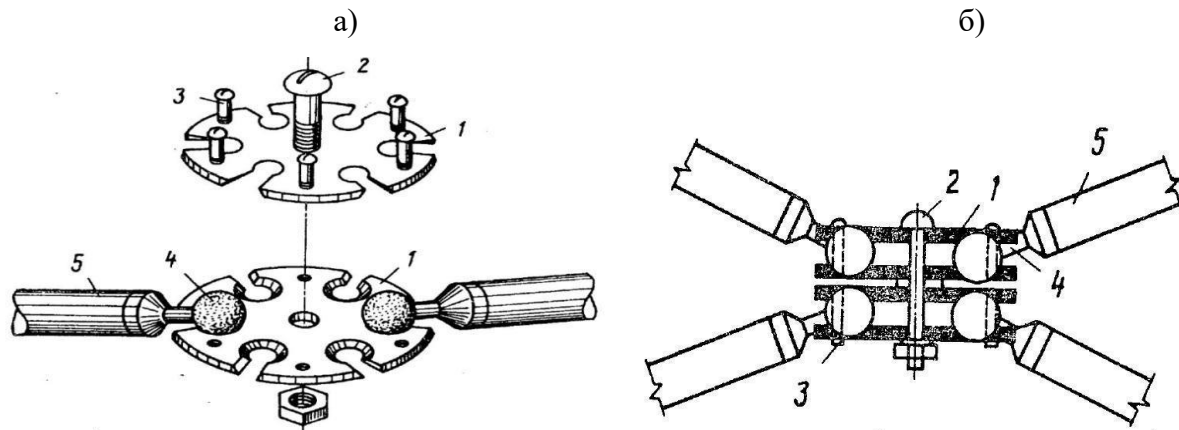


Рис. 1.24. Узел А. А. Тумасова и др.: а) – вид узла, 1 – прижимные диски; 2 – центральный болт; 3 – фиксирующие болты; 4 – сферические наконечники; 5 – стержень; б) – узел двухпоясной оболочки, разрез

Разбивки системы «П», позволяющие проектировать оболочки с минимумом числа типов плоских симметричных и асимметричных шестиугольных элементов (рис. 1.25) предложены Г. Н. Павловым в 1970 г. И применены при строительстве складского здания в Нижнем Новгороде [130-132,152,156].

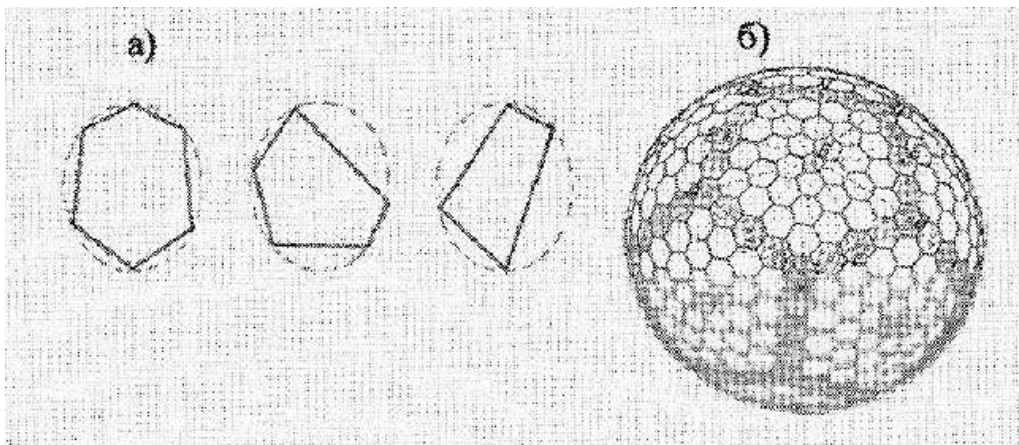


Рис. 1.25. Разбивки системы «П»: а - панели оболочки со сгибами, б - общий вид оболочки

Разбивки система «ПР», позволяющие проектировать оболочки из симметричных шестиугольных плоских элементов с допуском определенного числа элементов со сгибами (рис. 1.26) были предложены Г. Н. Павловым в 1972 г. при строительстве павильона на Верхневолжской набережной в Нижнем Новгороде [113-115,130-132,156].

Кроме предложенных разбинок, Г. Н. Павловым систематизированы разбинок других авторов («Р», «С», «И» и т.п.) - всего пять системообразующих разбинок. Учитывая, что все они могут быть составлены из треугольных или ромбовидных монтажных панелей отнесем их к одному типу разрезов. Сюда можно отнести разбинок «М», полученные итерационными методами оптимизации Д. Б. Миряевым. Таким образом, разбинок системы «Р», «С», «И», «М», позволяют проектировать оболочки с минимумом числа типов сборных элементов в виде отдельных стержней . треугольных и ромбовидных панелей (рис. 1.33). Применялись эти разрезы в практических и исследовательских целях многими авторами [113-115, 131, 193-198, 201-205].

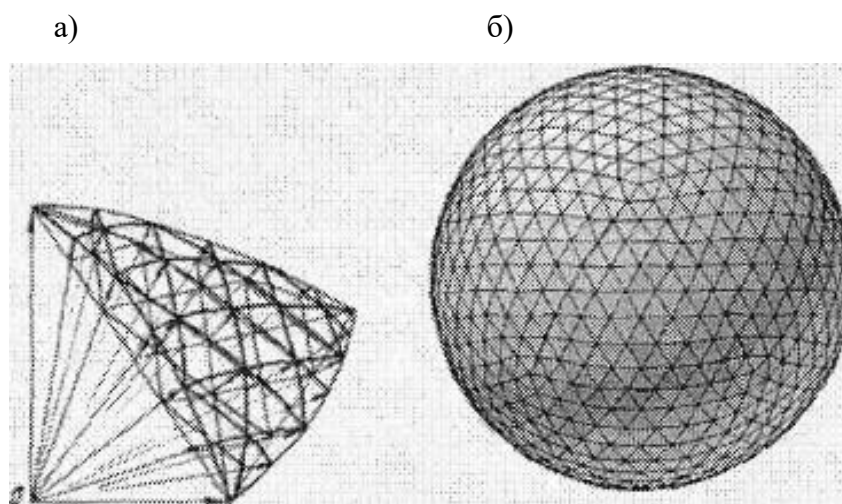


Рис 1.26. Разбинок системы «ПР»: а) фрагмент сквозной оболочки; б) общий вид оболочки.

Следует отметить, что все системообразующих разбинок могут быть икосаэдральными, октаэдральными или тетраэдральными разбинками, в соответствии с принятыми для расчёта видами исходного типового сферического прямоугольного треугольника Шварца. Кроме того, каждая из системообразующих разбинок будет иметь двойственные подсистемы нескольких видов и совместно образуют двухпоясные (двухуровневые) системы. Таким образом, геодезические купола по конструктивному выполнению могут быть одноуровневые и двухуровневые. Каркасы одноуровневых куполов могут формироваться из стержней с различным типом сечения. Наиболее

распространенным типом сечения стержней является трубчатое, как наиболее экономичное по расходу материала. Применяются, но значительно реже, другие типы сечений. Каркасы двухуровневых куполов формируются из стержней составного сечения, выполненных по типу ферм с параллельными поясами. Пояса могут иметь трубчатое, тавровое или Н-образное сечение. Соединительная решетка располагается в одной или двух плоскостях, последнее относится к случаю мощных и широких поясов. Соединительная решетка также применяется с расположением в плоскости поясов, либо с произвольным расположением.

Указанными выше авторами не ограничивается круг исследователей геодезических оболочек в нашей стране. Вплоть до 90-х годов у нас имелись сведения о сетевых разбивках, имеющих не более 960 граней на полной сфере, в то время как в США уже в конце 50-х и в начале 60-х годов были построены геодезические купола пролётом до 115 метров на основе очень мелкоячеистых сетевых разбивок (38800 граней на поверхности полной сферы) [204].

При проектировании большепролётных геодезических куполов появляется проблема разработки такой разновидности сетевой разбивки, которая давала бы возможность проектировщику конструировать большепролётные покрытия с наименьшим (оптимальным) числом типов сборных деталей купола.

1.3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТРЕУГОЛЬНЫХ СЕТЕЙ СЕТЧАТЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Анализ современного куполостроения позволяет сделать выводы, что большинство схем построения сетчатых куполов условно можно разделить на две группы: 1 - системы, обладающие осевой симметрией и состоящие из определенного числа одинаковых зеркально симметричных секторов; 2 - системы, в которых использована симметрия правильных многоугольников, позволяющая обеспечить разбивку сферы, используя часть ее в виде сегмента, так называемого треугольника Шварца.

В первую группу входят широко известные и распространенные в строительной практике меридионально-кольцевые схемы (купола Шведлера, Фёппля и т.п.), а также лучевые и смешанно-лучевые схемы (схема Чивитта, ромбическая схема на основе правильной сети Чебышева, схема Мухина-Гвамичавы и т.п.) [22, 23, 31, 113-115].

Существенными недостатками меридионально-кольцевых схем разбивки являются очень мелкие ячейки в зенитной части купола, а также большое количество типов элементов разбивки (граней, рёбер и узлов). Схема Чивитта лишена этого недостатка. Она состоит из нескольких секторов, каждый из которых равномерно разбит на треугольные ячейки. Число секторов может приниматься любым, в пределах от 6 до 12 (рис. 1.27 а - е). В этой схеме, также как и в звездчатой, все узлы яруса лежат в одной горизонтальной плоскости, однако их число увеличивается от центра к краю в арифметической прогрессии. Число различных стержней и узлов в этой схеме значительно превышает аналогичные показатели звездчатой схемы, она менее выразительна, но позволяет отказаться от центрального кольца, упростить и унифицировать узловые соединения.

Для подъемистых куполов часто используют комбинацию двух сеток - звездчатой и Чивитта. Эти схемы разрезов можно считать переходными к лучевым и смешанно-лучевым схемам. Ромбическая сеть (рис. 1.28) – лучевая схема построения сетчатого купола на основе правильной сети Чебышева. Число циклически повторяющихся граней-секторов может быть различно. Отличительной особенностью является равенство длин стержней, расположенных в направлении меридиана. Стержни, расположенные в кольцевом направлении, имеют разные длины. Чебышевскими называют сети с равносторонними четырехугольными ячейками [113-115, 122]. Положение произвольно ориентированной сети, наложенной на криволинейную поверхность можно описать совокупностью координат ее узлов. Представим, что в евклидовом пространстве, центр сферы совмещен с началом координат.

Сеть Чебышева принято ориентировать на поверхности так, чтобы исходные направления отрезков дуг располагались по взаимно ортогональным геодезическим линиям. Начинать накладывать сеть удобно с точки зенита, координаты которой $X=0$, $Y=0$, $Z=R$, где R – радиус сферы.

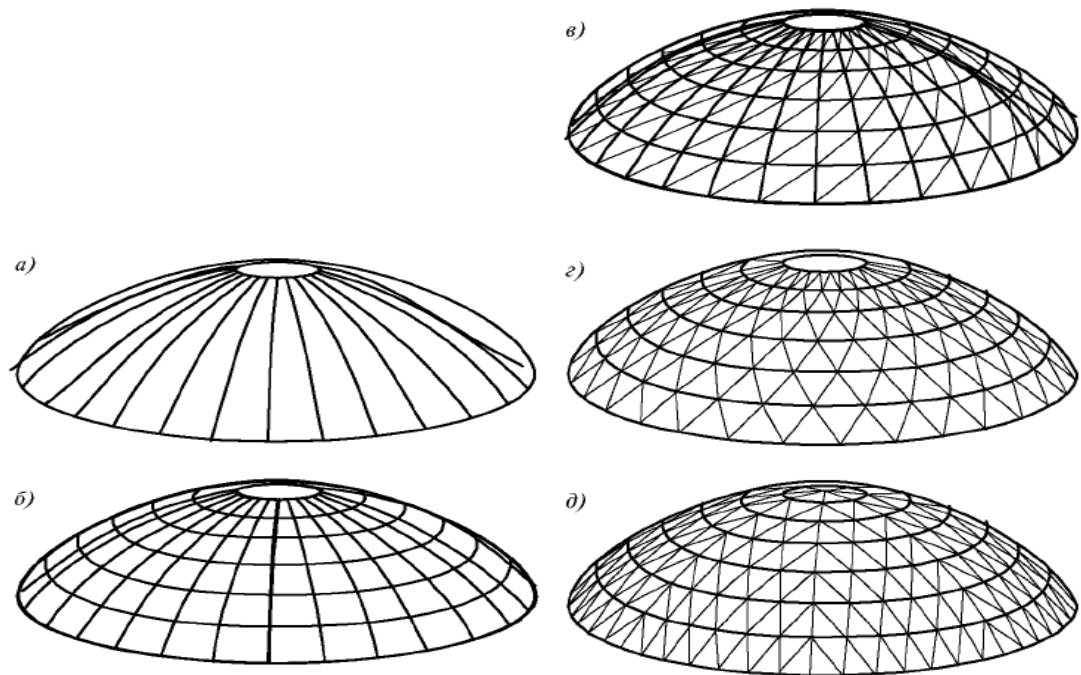


Рис.1.27. Схемы сетчатого купола, основанные на геометрии: а - ребристых куполов; б – ребристо-кольцевых куполов; в – разрезок Шведлера; г – разрезок Фёппля и Чебышева; д – разрезки Чивитта.

Совмещаем нити сети с направлениями меридиан в плоскостях XOZ и YOZ , являющихся геодезическими линиями на сфере. Координаты узлов сети, размещенных на этих меридианах, можно вычислить по формулам (1):

$$x_{i,j} = y_{i,j} = R \cdot \sin(i-1)\alpha; \quad z_{i,j} = z_{i,j} = R \cos(i-1)\alpha; \quad (1.1)$$

где i и j – порядковые номера узлов сети по направлениям меридиан вдоль осей X и Y , в точке зенита их значения равны 1;

$$\alpha = \frac{\pi}{2(n-1)}$$

– величина дуги между узлами сети в радианах; n – количество узлов сети Чебышева на осевом меридиане.

Задачу вычисления координат узлов сети на сфере, расположенных между осевыми меридианами, можно сформулировать как последовательное отыскание координат четвертых узлов пространственно-криволинейных равносторонних четырехугольников ячеек сети, по известным координатам двух смежных узлов. Заметим, что на сфере равенство длин дуг означает и равенство их хорд.

При формообразовании сферических сетчатых оболочек на плане, близком к прямоугольному или шестиугольному, используют также сеть меридианов, образованную пересечением со сферой двух или трех пучков лучей из меридиональных или произвольных плоскостей с взаимно пересекающимися осями (двух или трехлучевые системы).

Эти схемы построения образует наиболее равномерную сеть. Все линии стержней плавно переходят друг в друга, следуя кривизне конструкции, что позволяет рекомендовать ее для покрытий общественных зданий, требующих наиболее выразительного архитектурного оформления интерьера.

Эффективным методом построения сетчатых поверхностей вращения является метод наклонных образующих [113-115,122]. Наклонной образующей может быть любая кривая на заданной поверхности вращения, не лежащие в одной плоскости с осью вращения. Важным частным случаем является плоская кривая. Если две такие кривые на поверхности вращения, наклоненные в разные стороны, вращать с постоянным угловым шагом, то точки пересечения кривых образуют узлы искомой сети (рис. 1.28, б). Этим методом можно формировать покрытия как из отдельных стержней, так и из укрупненных панелей.

Для образования поверхности пологих оболочек в практике также используют сетки с квадратными или треугольными ячейками, какие показаны

для сводов. В отличие от сводов, поверхность которых образуют путем изгиба плоской сетки, пологие оболочки получают проецированием плоских сеток на заданную криволинейную поверхность.

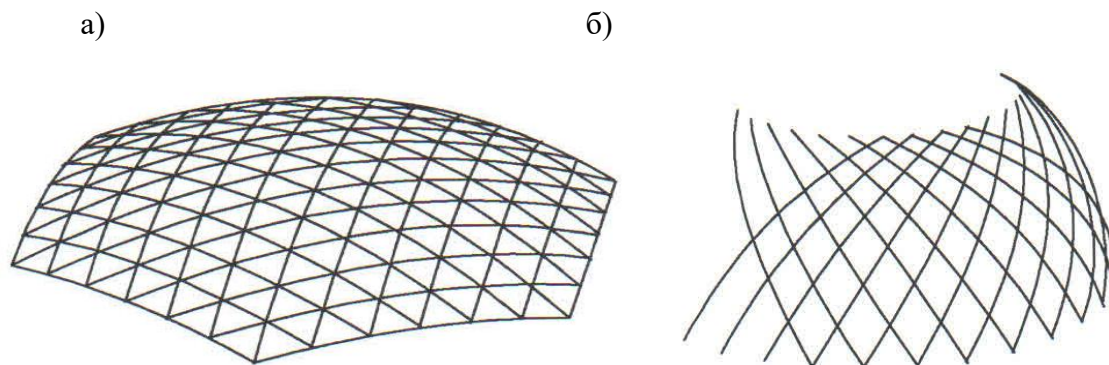


Рис.1.28. Схемы сетчатого купола, основанные на геометрии: а - правильной сети Чебышева; б - образование сетчатой поверхности вращением наклонных образующих.

Купола-оболочки на основе системы Мухина-Гвамичавы выкраивают из сферы, первичную разбивку которой производят по геодезическим линиям, проведенным через вершину секторов. Таким образом, эта сетчатая сферическая оболочка образуется благодаря линиям трех направлений, которые составляют между собой 60° или 120° . Получается сеть из почти полностью плоских правильных шестиугольников и шестиугольников, составленных из плоских трапеций.

Анализ геометрических схем приведенной группы сетчатых куполов показывает, что звездчатая разбивка наилучшим образом может представлять основные особенности геометрии куполов. К достоинствам схемы звездчатых куполов также относится возможность ее применения на любой поверхности вращения или комбинации нескольких поверхностей, сравнительно небольшое количество типоразмеров, простота и наглядность геометрического расчета. Добавив к этому, что звездчатые купола достаточно часто применяются в современном строительстве, можно сделать вывод о том, что в качестве расчетной эталонной модели для исследования куполов первой группы можно принять сферический звездчатый купол, либо купола сомкнуто-лучевой

системы Мухина-Гвамичавы (рис 1.5).

Результаты исследований указанных авторов, а также ещё сравнительно небольшой опыт практического проектирования и строительства сетчатых куполов и оболочек, должен стать исходной базой последующих теоретических исследований.

1.4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТРЕУГОЛЬНЫХ СЕТЕЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Геодезической разбивкой принято называть членение поверхности сферы путём проведения взаимно пересекающихся главных (геодезических) линий на предварительно выделенных типовых участках. Заметим, что геодезической линией на сфере называют окружность с радиусом, равным радиусу сферы (большая или главная окружность). Типовые участки в виде сферических прямоугольных треугольников (треугольники Шварца) обычно образуются путём центрального проецирования на сферу граней правильных многогранников. В эту группу треугольных сетей на сфере входят геодезические (способ разбивки Фуллера), кристаллические (способы разбивки Туполева, Павлова, Миряева) купола и их многочисленные модификации [103. 113-115, 118, 118, 131, 201-204].

В отличие от сетей меридионально-кольцевого построения, где размеры ячеек в полюсной и экваториальной частях резко отличаются друг от друга, геодезические сети, даже при очень большом числе ячеек, визуально сохраняют свойство равногранности исходных многогранников - размеры ячеек сети в пределах типового участка отличаются друг от друга не столь резко. При этом существенно уменьшается количество типов элементов разбивки.

Первые же попытки практического применения геодезических сетей выявили две её существенные особенности: 1) композиционно-пластические характеристики куполов, проектируемых на их основе, резко отличаются от куполов на традиционной геометрической основе, 2) многовариантность геометрических построений.

С появлением любой новой геометрической основы появляются новые формы купольных сооружений. Если на существующей геометрической основе с её ограниченными возможностями было создано большое разнообразие композиций куполов, то любая новая геометрия откроет еще большее разнообразие форм покрытий. Однако, при реализации нового направления проектирования куполов и оболочек возникают существенные теоретические трудности. Это вызвано тем, что характеристики геодезических сетевых разбивок предопределены исходными геометрическими параметрами правильных многогранников. Так как существует много приёмов разбивки, соответствующих разным конструктивным видам куполов, необходимо иметь не разрозненные и случайные данные о геометрии разбивок, а полную их совокупность по всем видам сетей в диапазоне практически приемлемых типов.

В настоящее время основными сдерживающими факторами в области проектирования куполов являются:

- чрезвычайно малое количество информации о теоретической разработанности их геометрической основы, неразработанность методик выбора сетей для конкретных случаев проектирования оболочек;

- кроме таблиц параметров сетевых разбивок или координат узловых точек необходимы оптимальные геометрические схемы или доступные и понятные методы оптимизации геометрических и технических параметров сборных покрытий.

Первые публикации о параметрах геодезических сетей принадлежат профессору Московского архитектурного института М. С. Туполеву (1951 г.) и американскому инженеру Р. Б. Фуллеру (1952 г.). Публикации сведений о геометрических параметрах сетей имеются в работах В. В. Ермолова, А. Н. Косолапова, В. А. Савельева, И. В. Ломбарде, А. А. Журавлёва, Ю. А. Морозова, Г. М. Голова, Н. А. Гоголевой, В. Ф. Ярьско, Р. Я. Бессоновой,

Е. А. Поповой, А. М. Стволова, Т. Тарнаи, Дж. Клинтона, и др., а в виде принципиальных схем - в работах Р. Б. Фуллера, В. Е. Михайленко, В. С.

Обуховой, А. Л. Подгорного, Д. Ж. Эммериха, З. С. Маковского, Н. Нушина, Г. Рюле, Р. Ле Риколе, Е. П. Пиньеро, И. Г. Гохарь-Хармандаряна, Д. М. Гарфункеля, А. Л. Зандберга, А. М. Гинзбурга и др.

Как уже известно, основой построения по способу Туполева является усеченный икосаэдр. Вершины и центральные точки всех граней икосаэдра, спроецированные на сфере, при соединении образуют исходный 180-гранник. Полученные равнобедренные треугольники двух видов далее могут быть разбиты дугами больших окружностей на более мелкие грани (рис.1.21). Основа и полученные дальнейшим дроблением граней на треугольники многогранники имеют вершины, которые могут быть описаны как множество точек на сфере, описанных различными радиусами из вершин и середин ребер правильных сферических пятиугольников и шестиугольников или от осей, проходящих через эти точки сферы. М. С. Туполев эти купола назвал «кристаллическими» [9,103,117,130, 131,175,176]. В литературе закрепился вариант названия «геодезические». Икосаэдр с размером стороны треугольника «а» описывается сферой с радиусом $R =$
 $= 0,9510564a$. Заполнение сферических равносторонних треугольников может быть различным, соответственно внешний вид поверхности купола и образ сооружения в целом получают различное эстетическое звучание (рис. 1.29).

Главные проблемы возникают при проектировании куполов больших пролётов, здесь в процессе многократного увеличения стадий членения, лавинообразно возрастает количество типов деталей. Так, например, некоторые разновидности 2880-гранных сетей дают число типов граней до 30 и более, а в 24000-гранных сетях число типов граней доходит до 300 [130,175,176].

Одна из сетевых разбивок, оптимальная для проектирования большепролётных куполов, была разработана Р.Б. Фуллером в конце 50-х годов. Эта сеть позволяла достичь наименьшего числа типов треугольных и ромбовидных сборных деталей купола по сравнению с другими видами сетей. [130, 201, 204, 205].

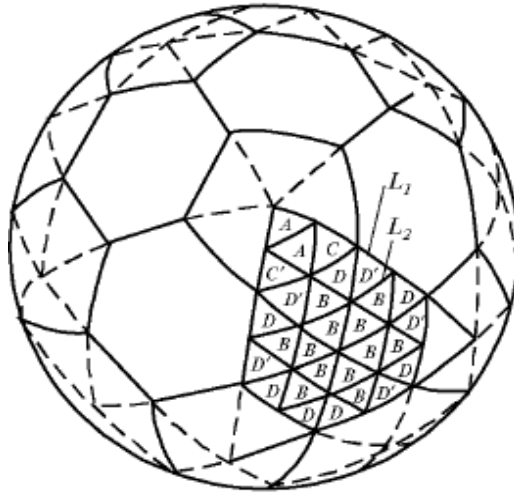


Рис.1.29. Один из способов получения сетевых разбинок поверхности сферы на основе усеченного икосаэдра в виде кристаллической сети Туполева

На рисунке 1.30 показаны принципы построения одноконтурного геодезического купола, начиная от простого додекаэдра, состоящего из 12 правильных пятиугольников. Суть способа заключается в описывании додекаэдра сферой и последующем дроблении на 60 одинаковых сферических равнобедренных треугольников (рис. 1.30). Основа и, полученные дальнейшим дроблением граней на треугольники многогранники, имеют вершины, которые могут быть описаны как множество точек на сфере, описанных различными радиусами из вершин и середин ребер правильных сферических пятиугольников или от осей, проходящих через эти точки сферы. У равнобедренных треугольников А слева и справа пристраиваются одинаковые треугольники В и т.д. С увеличением числа членений, число типоразмеров увеличивается линейно. Линии разбивки в пределах каждого исходного треугольника образованы дугами больших окружностей и являются геодезическими линиями на сфере. Общее число граней равно $60 m^2$; число типоразмеров панелей, типоразмеров стержней и число вершин многогранника, соответственно равны, $2m - 1$, $2m$, $2m$ (m - числа членений исходного треугольника, так называемого треугольника Шварца).

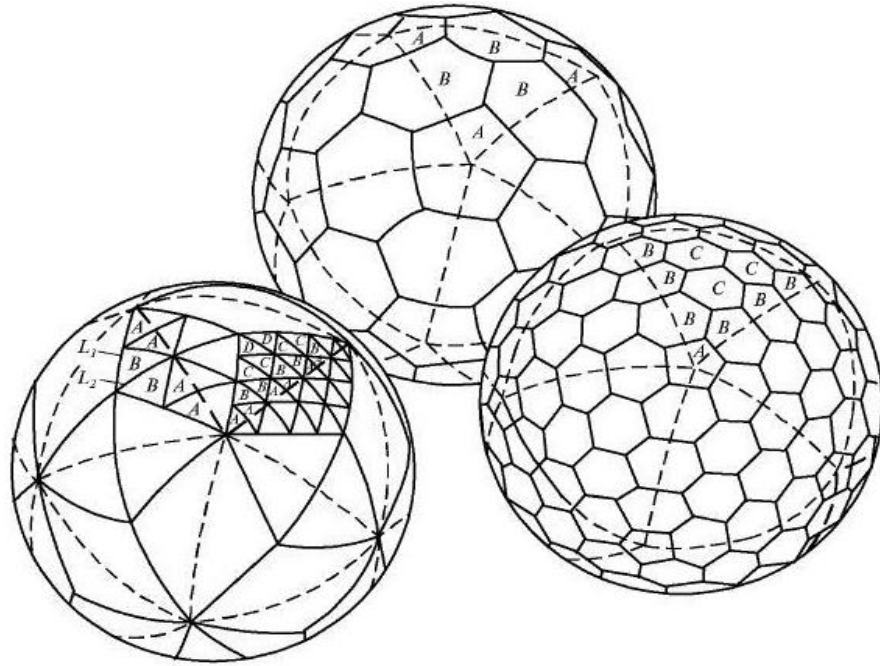
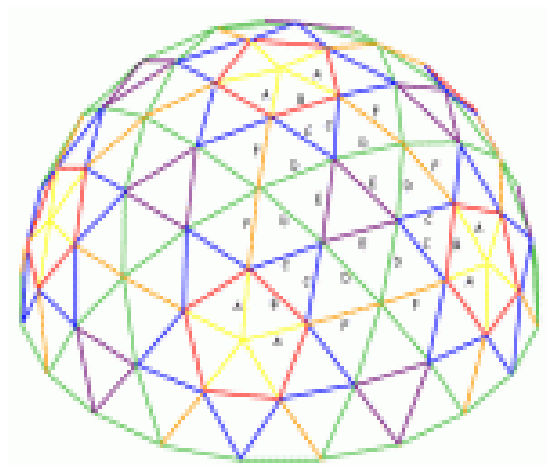


Рис.1.30. Один из способов получения сетевых разбинок поверхности сферы на основе додекаэдра в виде геодезической сети Фуллера.

В те же годы Р.Б. Фуллером была предложена сетевая разбивка, оптимальная для конструирования куполов, собираемых из деталей в виде шестигранных пирамид. Однако, в этом методе недостатком было многообразие форм укрупненных элементов и использование опорных элементов, не лежащих в одной плоскости.

Кроме одноконтурных существуют двухконтурные купола, в которых пространство между контурами используется для технических нужд или для размещения утеплителя и т.д. Первые два двухконтурных купола с укрупненными элементами были спроектированы на основе 8640-гранной сети. В куполе «Климатрона», например, нижний контур имеет треугольную сеть, а верхний — гексагональную (рис. 1.10). Последняя образована путём использования линий разбивки нижнего контура. В угловых точках гексагональной ячейки поставлены стойки и верхние концы стоек соединены гибкими стержнями со средней точкой гексагонального участка нижнего контура, где сходятся вершины шести треугольников. Треугольные панели из акрилового стекла подвешены к узлам нижнего контура.

В то же время большое количество куполов было выполнено Фуллером в виде 320-гранников, которые далеки от оптимальных по числу типоразмеров (рис. 1.31).



Ребра	Коэффициенты	Количество для 1/2
A	0,25318	30
B	0,29524	30
C	0,29453	60
D	0,31287	70
E	0,32492	30
F	0,29859	30
4-х конечный коннектор		20
5-ти конечный коннектор		6
6-ти конечный коннектор		65

Рис. 1.31. Разбивка 320-гранника Фуллера

Выше было показано, что всё разнообразие известных до 2000 года конструктивных решений геодезических оболочек представлено А.Н. Супруном и Г. Н. Павловым в их работах [131-133,156] пятью системообразующими приёмами разбивки поверхности сферы. Следует отметить, что все пять системообразующих разбивок могут быть икосаэдральными, октаэдральными или тетраэдральными разбивками, в соответствии с принятыми для расчёта видами исходного типового треугольника Шварца. Кроме того, каждая из системообразующих разбивок будет иметь двойственные подсистемы нескольких видов, позволяющие выполнять купола двухпоясными. Вся совокупность рассматриваемых систем разбивки будет образовывать сложную структуру, которую Павлов [131-133] отобразил графически в виде схемы (рис. 1.32). При этом каждую конкретную разбивку сферы на элементы внутри некоторой системообразующей разбивки он обозначает, как N - M, где N - общее число элементов на сфере, M — условное обозначение подсистемы разбивки. Например, «17280 - P» (разбивка системы P на 17280 треугольных граней), «2880 - P1» (разбивка подсистемы P1 на 2880 треугольных граней), «720 - П1 (разбивка подсистемы П1 на 720 треугольных граней) и т. п.. Заметим, что N не может быть произвольным целым числом, т.

к. последовательное измельчение треугольника Мёбиуса или Шварца в каждой системе разбивки приведет к смещению границ типовых сферических треугольников. Эти, наиболее используемые из разбивок, включены Г.Н. Павловым в базу данных системы автоматизированного проектирования геодезических оболочек. Общим для геодезических куполов является то, что размеры элементов каркаса (решетки) отличаются по длине друг от друга незначительно. Эта особенность рассматриваемых сетей используется в выводе формул для определения усилий в стержневом сетчатом куполе приближенным методом статической эквивалентности [12, 13, 104, 130, 156, 175, 176, 201-205 и др.], в котором предполагается, что ячейки решетки близки к равностороннему треугольнику.

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ КУПОЛОВ И ОБОЛОЧЕК

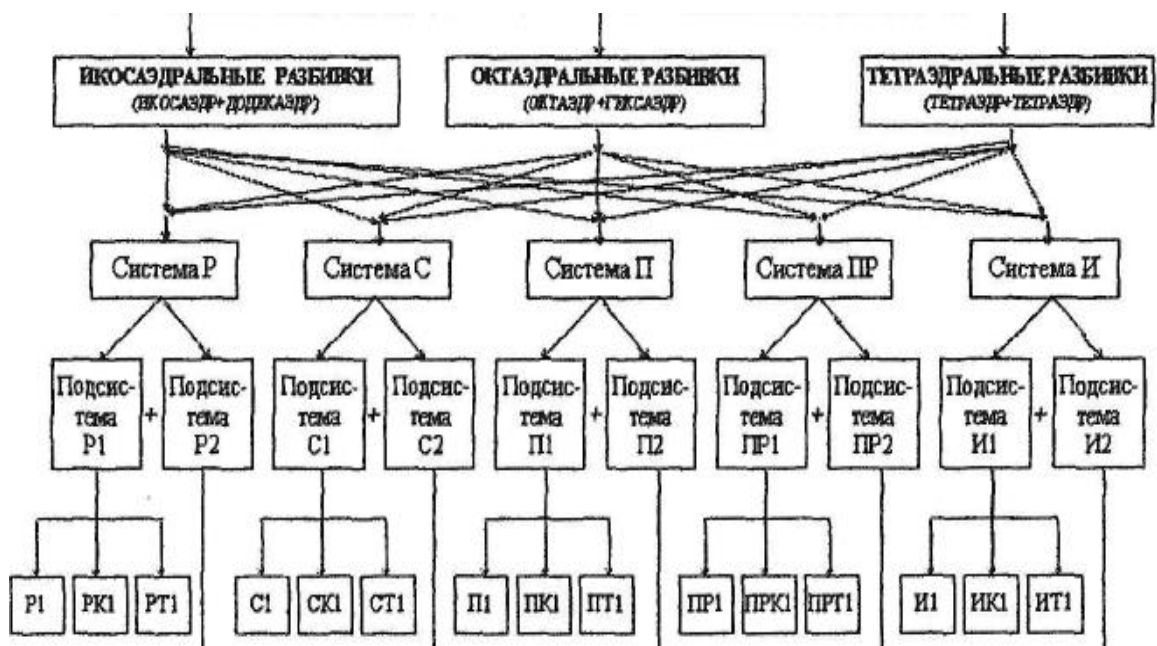


Рис. 1.32. Классификация системообразующих геодезических разбивок.

Предположение о равной длине и равных сечениях элементов сетчатого купола используется и в работах при статическом расчете и определении массы куполов, с целью упрощения и сокращения времени автоматизированных расчетов. Два допущения о равных длинах и сечениях всех стержней в куполе приводят к условной геометрической схеме с идеализированной сетью, состоящей из равносторонних треугольников (купола с равномерной треу-

гольной решеткой), которую и принимают в качестве расчетной модели для куполов второй группы. В композиционном отношении треугольники Шварца — икосаэдральный и октаэдральный, — однотипны, они являются прямоугольными сферическими треугольниками. Вследствие этого любая сеть, полученная на одном треугольнике Шварца, имеет соответственное отображение на другом треугольнике и сети разрезов отличаются только количественными значениями параметров. Отсюда, Павлов делает вывод, — следует, что алгоритм геометрического расчета параметров разрезов, составленный для конкретной системы, можно применять, используя определение параметров сетей на соответствующем треугольнике Шварца. Многогранники геодезической или кристаллической разрезки имеют оси симметрии (вращения и зеркально поворотные), поэтому для вариантов построения сферических сетей достаточно выполнить разрезку только внутри сегментов граней (сферический треугольник Мёбиуса), составляющих одну шестую часть грани икосаэдра или октаэдра. Разрезки, предложенные Павловым, можно представить как множество точек на сфере, описанных главными окружностями с различными радиусами из центра сферы, либо окружностями с различными радиусами, параллельными ребрам граней икосаэдра, додекаэдра или октаэдра, от соответствующих из осей симметрии.

Применяя собранные и систематизированные А.Н. Супруном и Г. Н. Павловым [131-133,156] методики, в Нижегородском архитектурно-строительном университете разработаны автоматизированные средства решения указанной проблемы в системе ArchiCAD, дополненной специальными библиотечными элементами. Библиотечные элементы предоставляют возможность воспользоваться любой из следующих четырех систем разбивки оболочки:

- одноконтурная система из плоских шести- и пятиугольников (система «П» — рис. 1.33 а, б);

- одноконтурная система из шести- и пятиугольников, в число которых для уменьшения количества типоразмеров введено несколько неплоских элементов (система «ПР» — рис. 1.30, 1.33. в);
- двухконтурная система, состоящая из пяти- и шестигранных пирамид, вершины которых соединены стержнями (система «Р» — рис. 1.28, 1.33 г);
- двухконтурная система с трехгранными пирамидами, вершины которых также соединены стержнями (система «С» — рис. 1.33 в, г).

В каждой системе разбивки пользователь может выбрать один из двенадцати вариантов разбивки, различающихся числом деления полной сферы на элементы. Для систем «П» и «ПР» указанное в таблице число треугольных граней означает суммарное число треугольников, составляющих шести- и пятиугольные элементы. На рис. 1.34 показано несколько примеров выведенных на экран фрагментов оболочек в виде одной секции (треугольника Мебиуса — типового элемента разбивки полной сферы на 20 одинаковых секций), двух секций, пяти секций и произвольно выбранной на сфере схемы.

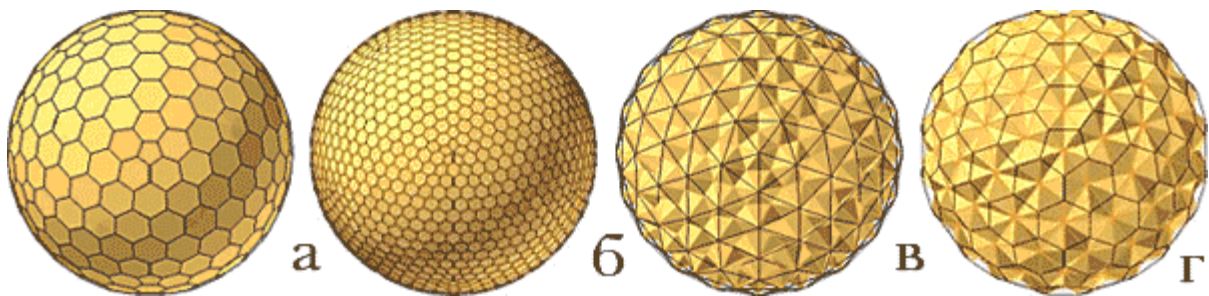


Рис. 1.33. Варианты разбивки поверхности сферы на элементы.

Результаты исследований указанных авторов, а также ещё сравнительно небольшой опыт практического проектирования и строительства геодезических куполов и оболочек, являются исходной базой последующих теоретических исследований.

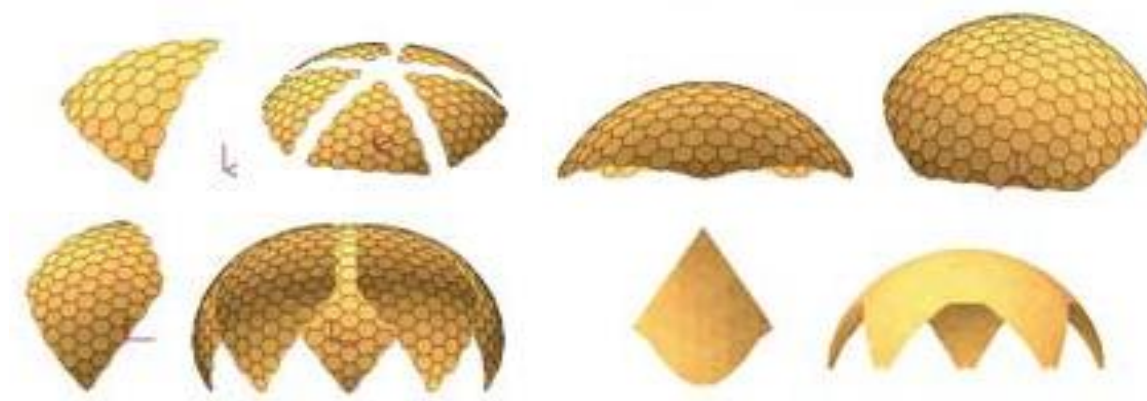


Рис. 1.34. Примеры вывода на экран фрагментов оболочек.

Суммируя сказанное выше, можно выделить три существенных фактора, объясняющих, почему в нашей стране геодезические купола строились мало:

- в отличие от традиционных куполов радиально-кольцевого членения, проектирование современных сетчатых куполов невозможно без заранее вычисленных геометрических параметров эффективных монтажных элементов;
- практическое отсутствие систематизированных и обобщённых сведений о геометрии многоячеистых сетевых разбинок на эффективные монтажные элементы, а также полное отсутствие теоретических обоснований разрезок с плоскими фигурами и размерами больше треугольника или ромба;
- существенной особенностью геометрии сетевых разбинок является многообразие архитектурных предложений и недостаток эффективных вариантов конструктивно-технологических решений куполов.

1.5. ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КУПОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

Задача оптимизации треугольной геометрической сети на сфере по критерию минимума материала несущих элементов уже ставилась многими авторами [2, 44, 65, 68, 90, 94, 118, 122, 127, 141, 173, 183, 184, 186, 190-192 и т.д.].

В работе А.Н. Раевского и Л.А. Раевского рассмотрено использование методов математического программирования при выборе целевой функции и составлении условий задачи оптимизации пространственных рамных систем с

учетом требований реального проектирования [15,120]. Целевой функцией служит выражение для объема (массы) материала конструкции.

Следует выделить работы Молева И.В. и Молевой Р.И. основанные на результатах численного исследования закономерности изменения массы сетчатых куполов [120, 121]. В качестве целевой функции авторами принята функция массы сетчатого купола, в качестве ограничений - условия прочности и жесткости. Для решения задачи оптимизации авторы использовали итерационный метод, в основе которого лежит прямой расчет конструкции и получение информации о состоянии системы, что позволяет выполнить коррекцию всего массива искомых параметров - площадей всех элементов.

И.В. Молевым установлено, что у сетчатых куполов всех типов увеличение пролета вызывает нелинейное увеличение их массы. Нелинейный характер этой зависимости обуславливается влиянием конструктивного коэффициента и ограничениями по минимально возможной площади сечения элементов и предельной гибкости. Получена аналитическая зависимость массы конструкций купола от величины пролета, которая представлена в виде

$$g=k g_0 - l/l_0 \quad (1.2)$$

где $g_0 \sim$ показатель массы купола пролетом l_0 , g —то же пролетом l ; k —коэффициент, учитывающий нелинейность изменения массы конструкций при изменении величины пролета.

На основе многовариантных расчетов выявлены параметры, влияющие на величину коэффициента k у куполов различного типа, и получены его количественные значения. Выполненные в работе исследования показали, что оптимальное значение стрелы подъема зависит от многих факторов: пролета, нагрузки, количества элементов и стоимости ограждающих конструкций покрытия. Тем не менее, общая тенденция такова: увеличение пролета и нагрузки вызывает увеличение значения оптимальной стрелы подъема. Установлено также, что количество элементов стержневого сетчатого купола существенно влияет на характеристики массы. Показатель массы купола в

зависимости от указанных параметров изменяется в широком диапазоне, и значение g оптимального варианта может отличаться от наихудшего в несколько раз.

И. В. Молевым рассмотрены также закономерности изменения массы при изменении величин постоянных и временных (снеговой и ветровой) нагрузок. При изменении нагрузки показатель массы изменяется наиболее интенсивно у пологих куполов. Для каждого значения стрелы подъема характерно следующее: изменение массы системы с изменением нагрузки более интенсивно происходит у куполов с большим количеством ярусов и меньшим значением числа сторон. Анализ полученных результатов показывает, что зависимость масса - нагрузка может быть принята линейной.

Необходимо отметить также работы Гайдарова Ю.В., Зотовой Н.Г., Козьминой В.К., посвященные выбору оптимальной высоты сетчатых куполов и сводов, а также трехслойных оболочек вращения [42, 43]. В этих работах целевой функцией является стоимость конструкций, а ограничения — условия прочности. В качестве варьируемого параметра принята стрела подъема.

В работах П. М. Варвака, А. С. Дехтяря, Л. Б. Котовой, Х. П. Узакова рассматриваются покрытия в виде металлических куполов [67, 68, 70, 99-101]. Для этих конструкций в качестве целевой функции выбрана масса конструкций.

Задача оптимизации треугольной геометрической сети на сфере по критерию минимума типоразмеров элементов также уже ставилась многими авторами различных систем сферической разрезки [2, 44, 65, 68, 90, 94, 122, 127, 141, 154, 162]. Во всех случаях решений находилась одна или несколько схем разрезок сферы с использованием, в основном, осей симметрии в виде главных линий (линий больших окружностей сферы), линий параллельных сечений сферы, а также совместимости частей граней правильных многогранников. Так Миряев Б. В. и ряд ученых Пензенского архитектурно-строительного университета предложили итерационную оптимизацию схем сетчатых куполов, образованных на основе икосаэдра [117, 118].

Теоремы с доказательствами оптимального расположения сферических четырехугольников предложены еще в древнеиндийских трактатах. Сферический шестиугольник, вписанный в окружность, можно представить как два четырехугольника с заданными сторонами и он имеет максимальную площадь тогда, когда вписан в окружность. Данное направление активно развивается рядом зарубежных ученых, а в России Новосибирской школой [2,199, 200].

О оптимальном расположении шестиугольников, вписанных в окружности на выпуклой поверхности, исходя из критерия минимальных длин элементов, говорят утверждения и доказательства венгерского ученого - доктора Ф. Тота. В своей работе он приводит варианты оптимального заполнения поверхностей кругами [2, 190, 200].

Оптимизация купольных конструкций рассматривалась в известном справочнике «Современные пространственные конструкции» [162]. Автор раздела Э. З. Жуковский принимает в качестве целевой функции приведенные затраты. Аналитическая аппроксимация целевых функций дает возможность определить минимум однопараметрических функций методами классической математики. Накладывая при этом ограничения на деформативность конструкции, автор решает условно экстремальную задачу нахождения оптимальных значений целевых функций и управляемых параметров исходя из условий прочности и деформативности сооружения.

На основе анализа расчетных схем сетчатых куполов В. А. Савельевым [154, 155] выполнены диаграммы равновесных состояний при различных комбинациях неравномерности загрузки узлов и начальных несовершенств формы. Выявлены вторичные точки, связанные со скачкообразным изменением характера деформирования и, возникновением кососимметричных форм потери устойчивости. Было подтверждено приведенное в работе [155] высказывание .С.Вольмира о том, что путем создания искусственных начальных отклонений узлов от идеальной сферической формы в направлении, соответствующем

предполагаемому выпучиванию или противоположном, может быть достигнуто существенное увеличение критических нагрузок. Предложена методика, позволяющая производить проверку устойчивости шарнирно-стержневых оболочек с учетом, как начальных отклонений узлов, так и прогибов стержней. Главной особенностью поведения сжатых стержневых систем при больших перемещениях является неоднозначность решений. При двух степенях свободы и одном варьируемом параметре перемещения установлена возможность возникновения одновременно трех форм равновесных состояний. Отмечено, что при переходе к расчетной схеме реальной конструкции и увеличении количества независимых параметров в десятки и сотни раз анализ форм равновесия систем значительно усложняется.

Выводы по 1 главе

1. В зарубежном куполостроении в последние годы наибольшее распространение получили сетчатые и геодезические металлические или деревянные купола, что связано с применением специального оборудования, причем многие зарубежные фирмы специализируются на изготовлении одного типа конструкций, постоянно его совершенствуя.

2. В отечественном куполостроении также применяются сетчатые и геодезические купола, однако в отечественной практике строительства последнего периода предпочтение отдается ребристым и ребристо-кольцевым куполам с решетчатыми связями, изготовление которых не требует специального оборудования отличающегося от оборудования для изготовления традиционных плоскостных конструкций.

3. Осуществленные сферические оболочки в основе геометрического построения каркаса имеют две группы разбивок поверхностей с использованием меридионально-кольцевой схемы и геометрии правильных многоугольников. Приобретенный опыт по формообразованию сетчатых поверхностей дает возможность ставить задачи оптимальных или рациональных

конструктивно - технологических решений сферических оболочек а также вопросы их теоретического обоснования..

4. В экспериментальных исследованиях по прежнему неизученными являются вопросы влияния сборки куполов из укрупненных блоков и панелей на НДС этих несущих систем. Требуют более детального натурного исследования влияния жесткости опорных конструкций и значения эксцентриситетов на опорах. Также недостаточно изучено влияние изменения влажности древесины на величины НДС и возможности предварительного напряжения.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СБОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Задача оптимизации треугольной геометрической сети на сфере по критерию минимума типоразмеров элементов, как уже было отмечено, ставилась многими авторами различных систем сферических разрезов [2, 44, 65, 68, 90, 94, 118, 122, 127, 141, 162, 166-168 и т.д.] Во всех случаях решений находилась одна или несколько схем разрезов сферы с использованием, в основном, осей симметрии в виде главных линий (линий больших окружностей сферы), линий параллельных сечений сферы, а также совместимости частей граней правильных многогранников. Различные математические школы [2, 44, 65, 68, 90, 94, 118, 122, 127, 141, 162, 166-168 и т.д.] убедительно доказали, что оптимальной треугольной сетью на плоскости является сеть из равносторонних треугольников, которые комбинируются в разные сочетания правильных шестиугольников, которые, в свою очередь, могут быть описаны сетью пересекающихся окружностей (охвачены все треугольники) или касающихся окружностей (регулярно через один треугольник, см. рис. 2.1 а, б). Также было доказано, что если между такими системами на плоскости и на другой поверхности существует проекционная связь, то спроецированная треугольная сеть также будет оптимальной по критерию длин сторон треугольников.

Очевидно, что размещение на сфере правильных и неправильных шестиугольников, вписанных в окружности, т.е. фигур плоских или шестиугольников (пирамид), составленных в свою очередь из плоских треугольников (рис. 2.1 а, б) с минимальными размерами ребер, дает оптимальное решение треугольной сети на сфере. К тому же такая сеть образована на основе окружностей минимальных радиусов, т.е. окружностей на сфере, полученных при касании трех смежных окружностей, центры которых находятся на наименьшем расстоянии друг от друга [4-14,17-19].

Сферический шестиугольник можно представить как два четырехугольника с заданными сторонами и он имеет максимальную площадь

тогда, когда вписан в окружность. Шестиугольные панели, вписанные в окружности с минимальными радиусами (т.е. касающиеся), будут иметь минимальные размеры и максимальные площади при заданном числе граней треугольной сети сферы. Т.е. элементы сети в виде радиусов будут иметь минимальную длину, так как представляют собой кратчайшие расстояния между центрами окружностей, а контуры, вписанные в окружности, также будут иметь минимальные размеры. Образование правильных шестиугольников в этой сети возможно как частный случай. Таким образом, для каждого варианта резки оптимальное решение по минимуму материала (длины элементов) – это размещение шестиугольников, вписанных в окружности, причем в первом оптимальном варианте смежные три окружности касаются друг друга. Оптимизация треугольной геометрической сети на сфере по критерию минимума типоразмеров элементов может быть представлена размещением в системе неправильных шестиугольников, вписанных в окружности минимальных размеров, максимума правильных шестиугольников, например, в совместимых сферических треугольниках (сегментах) с радиально кольцевой основой, в секторах с одной вершиной в центре; а также в совместимых сферических треугольниках (сегментах) правильных многогранников (икосаэдра, октаэдра и тетраэдра) с использованием всевозможных опорных сетей для центров окружностей и со схемами разрезов, показанных на рис. 2.1, 2.2.

Кроме вариантов применения свойств симметрии главных и параллельных линий окружностей сферы, в подобных разрезках должны быть реализованы возможности центральной симметрии окружностей [5, 6] и эффективной опорной сети центров окружностей.

2.1. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СЕТЧАТЫЕ СБОРНЫЕ СФЕРИЧЕСКИЕ ОБОЛОЧКИ С ПЛОСКИМИ ШЕСТИУГОЛЬНЫМИ, ТРЕУГОЛЬНЫМИ И N-УГОЛЬНЫМИ ПАНЕЛЯМИ

Как сказано выше в практике строительства имеются многочисленные примеры применения для пологих куполов, в основном, систем сферической разрезки Шведлера, Чивитта, правильной сети Чебышева, а также, комбинированной разрезки из сферических секторов и сегментов с образованием максимального числа плоских шестиугольников.

Недостатком всех их является в большей части поэлементное изготовление конструкций, невозможность, как правило, укрупнительной сборки и применения преднапряжения. Почти все разрезки указанных авторов имеют определенную зависимость числа типоразмеров ребер треугольной сети от числа членений и относительную простоту геометрического построения.

Но необходимо иметь в виду, что современные программные средства позволяют ставить задачи оптимизации, начиная от формообразования с возможностями 3D-проектирования и завершая сферой высоких технологий изготовления и возведения покрытий и зданий в целом.

В данной работе предлагается конструктивно-технологический подход для всех стадий создания только одной, но чрезвычайно сложной системы, какой является сборное сферическое покрытие. Для начала в виде оптимизационной задачи можно было бы представить зависимости числа типоразмеров ребер треугольной сети на сфере от числа и способа членений в разрезках, зная, что наиболее простые методы разбиения сферы треугольной и шестиугольной сетью ведут к возможному упрощению следующих задач строительства. Однако простые методы на стадии формообразования могут приводить также и к неэффективным конструктивно-технологическим решениям на стадии возведения конструкций. В этой работе предложено формирование треугольной сети на купольной сфере путем образования правильных и неправильных плоских шестиугольников или пирамидальных

шестиугольников с плоским основанием у пирамид. Чем больше правильных шестиугольников, тем более оптимальна треугольная сеть по критерию минимума длин элементов, по простоте конструкции и технологичности решений. [6, 9, 127, 128]. Таким образом, для каждого варианта разрезки предлагаемым методом – оптимальное решение по минимуму длины элементов (приблизленно - веса), – это сеть из треугольников, образующихся из шестиугольников, вписанных в окружности, причем каждые смежные три окружности касаются друг друга (иногда немного пересекают друг друга), т.е. находятся на кратчайшем расстоянии.

Предложенная оптимизация треугольной геометрической сети на сфере по критерию минимума типоразмеров элементов может быть представлена как «постооптимизация» и решена размещением в системе неправильных шестиугольников, вписанных в окружности минимальных размеров, максимума правильных шестиугольников, например, в повторяющихся и совместимых сферических треугольниках (сегментах) $360/n-90-90^\circ$ со схемами разрезки, показанными на рисунках 2.1, 2.2, а и б. Причем, кроме известных вариантов применения в разрезках свойств симметрии главных и параллельных линий сферы, в подобных разрезках должны быть реализованы возможности центральной симметрии окружностей. Рассмотрим первые два варианта разрезки с наиболее простым математическим описанием [134]. Сборная сферическая оболочка (рис. 2.1 а, б) содержит соединенные между собой 2-п угольные 1, шестиугольные панели 2, между которыми расположены треугольные 3 панели, с углами 4, лежащими на сфере. 2-п угольные 1, шестиугольные 2 и треугольные 3 панели, одинаковым образом расположены внутри сегментов 5, составляющих n-ю часть сферы. На противоположных вершинах 6 сферы расположены многоугольные панели в виде 2n-угольных панелей 1. Ребра 7 2n-угольных панелей 1, расположенные по границам 8 сегмента 5, совмещены с одним ребром шестиугольных панелей 2. Внутри сегментов 5 расположены шестиугольные панели 2 с углами 4, описанные

окружностями из центров 9 панелей. При этом смежные шестиугольные панели 2 соединены между собой по одним углам 4 в одной из точек пересечения окружностей, по другим в точке касания окружностей. Панели одинакового радиуса с центрами на середине сегментов 5, а также панели на осях симметрии сегментов 5 выполнены в виде правильных шестиугольников (окрашены серым цветом).

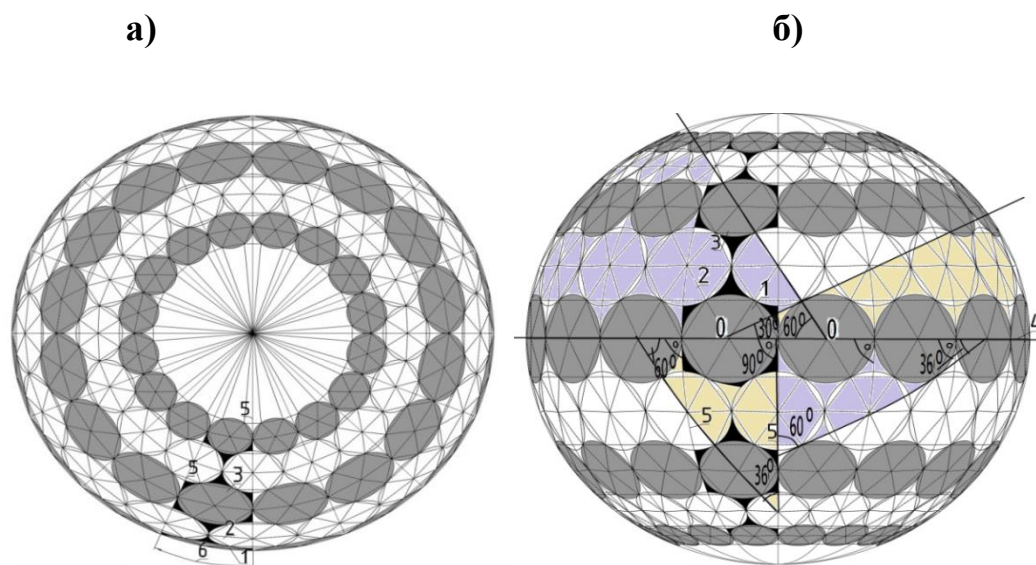


Рис. 2.1. Геометрическая сеть на сфере из шестиугольников, вписанных в окружности, на основе сферических совместимых треугольников (сегментов) $r_1-90-90^\circ$: а – вид сверху, б – вид сбоку; 1 – шестиугольники (правильные шестиугольники – серым цветом) первого ряда у внутреннего угла 90 градусов; 2, 3 – тоже второго и третьего ряда, соответственно; 4 и 5 границы секторов 6 из двух сферических треугольников(сегментов); О – вершины возможных секторов; $36, 60, 90^\circ$ – углы возможных повторяющихся сферических сегментов геодезических разрезов.

Для другого варианта в сборной сферической оболочке (рис. 2.2 а, б) на середине сегментов 5 расположены ребра треугольных панелей 3, панели одинакового радиуса с центрами на одной границе сегментов выполнены в виде правильных шестиугольников на другой в виде неправильных шестиугольников (выделяемый сегмент имеют черную окраску треугольных вставок).

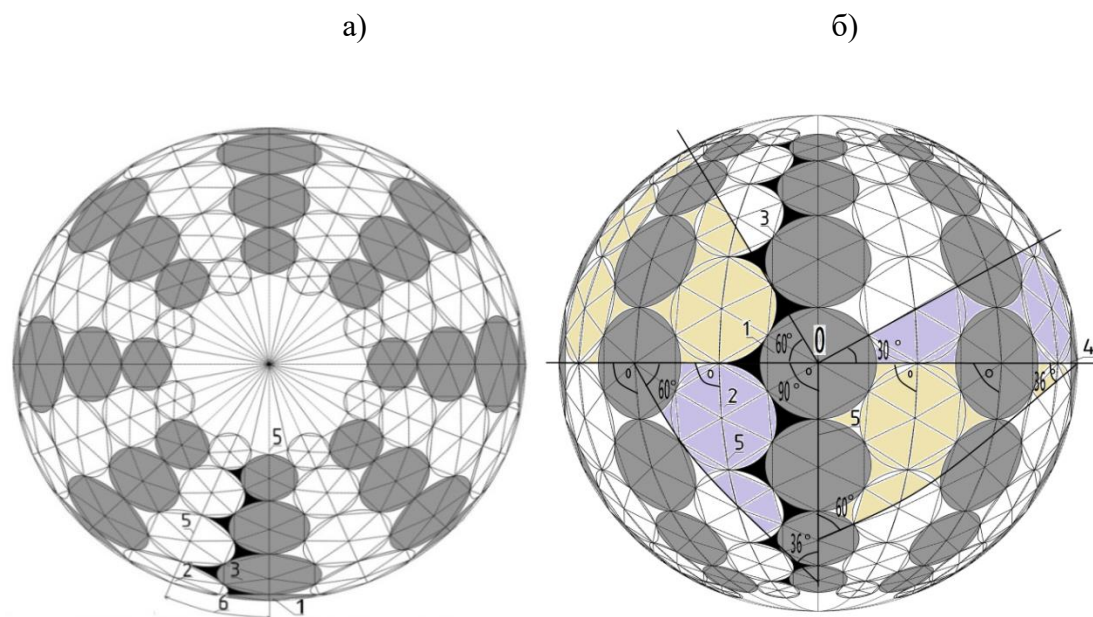


Рис. 2.2. Геометрическая сеть на сфере из шестиугольников, вписанных в окружности, на основе сферических совместимых треугольников (сегментов) $b-90-90^\circ$: а – вид сверху, б – вид сбоку; 1 – шестиугольники (правильные шестиугольники – серым цветом) первого ряда у внутреннего угла 90 градусов; 2, 3 – тоже второго и третьего ряда, соответственно; 4 и 5 границы секторов b из двух сферических треугольников (сегментов); О – вершины возможных секторов; 36, 60, 90° – углы возможных повторяющихся сферических сегментов геодезических разрезов.

Предложенные схемы (рис. 2.1, 2.2) простейших разбинок сферы (вместе со схемой рис. 2.28) реализуют максимально возможное заполнение поверхности правильными шестиугольниками (более 50%). Это распределение шестиугольников может быть использовано при реализации конструктивно-технологического подхода в разрезах секторов, а также разрезах на основе правильных многогранников. На схемах (рис. 2.1 б, 2.2 б) показаны половины секторов 60° и 120° , а также совместимые (повторяющиеся) сферические треугольники (сегменты) правильных многогранников (икосаэдра, октаэдра и тетраэдра) с использованием радиально-кольцевых опорных сетей для центров окружностей, в которых правильных шестиугольников может быть только меньше, в силу искажений на границах этих секторов и сегментов (это теоретически и при большом числе разбиений). Зависимость числа

типоразмеров элементов треугольной сети от количества правильных или близких к правильным шестиугольникам сферических фигур показана на рисунке 2.24 в разделе классификации разрезов. Пирамидальные (сферические) правильные шестиугольники имеют 2 типоразмера и число осей симметрии более 3. Шестиугольные пирамиды, имеющие две оси симметрии – три типоразмера и, наконец, неправильные пирамиды, не имеющие равных сторон основания – 7 типоразмеров. Отсюда видно, почему оптимальными будут разрезки с максимумом правильных шестиугольных пирамид.

Использование указанных окружностей для построения геометрической сети из треугольников и шестиугольников позволяет на 5 –30% снизить число типоразмеров монтажных элементов купола, по сравнению с известными разрезками, получить при необходимости плоские шестиугольные панели, а также воспользоваться конструктивными преимуществами предварительного напряжения.

2.1.1. Первый вариант разрезки на основе сферических совместимых треугольников (сегментов) r_1 -90-90°.

Разрезки могут быть выполнены несколькими способами. Рассмотрим первый способ. Для формирования разбивки треугольной сети на сфере используем повторяющийся сегмент, равный половине сектора с размером дуги на экваторе r_1 . Наша задача - определить положения центров O_2 и O_3 и т. д. для шестиугольников неравных радиусов в указанном сферическом треугольнике-сегменте с размерами сторон-дуг r_1 -90-90 (рис. 2.1).

Из рисунка 2.3 видно, что оптимальная треугольная сеть на сфере получается, если эти треугольники составляют правильные или неправильные сферические шестиугольники, вписанные в окружности наименьшего радиуса и размещенные в повторяющихся и совместимых сферических треугольниках r_1 -90-90° сферы, где r_1 – сторона этого совместимого треугольника и, одновременно, радиус окружности в виде полярного угла первого ряда

шестиугольников [17, 134]. На первом этапе определяем центры шестиугольников второго ряда, вписанных в окружности максимально возможных радиусов, при условии, что эти окружности только касаются друг друга в одной точке.

Первый этап алгоритма геометрического расчета – определение положения центра O_2 для шестиугольников неравных радиусов в сферическом треугольнике $r_1-90-90^\circ$ у внутреннего угла 90 градусов (рис. 2.1). Используя соотношения Непера [17, 35, 206], составим (рис. 2.3 а), систему уравнений (2.1):

$$\cos 2A = \operatorname{tg} r_1 / \operatorname{tg} (r_1 + r_2); \quad (2.1)$$

$$\sin C = \sin r_2 / \sin (r_1 + r_2),$$

где r_2 - радиус окружности в виде полярного угла второго ряда шестиугольников; a и b - катеты в виде полярных углов прямоугольных сферических треугольников; $2A$ и C , соответственно, внутренние углы на сфере для окружностей первого ряда шестиугольников; B и $2D$, соответственно, внутренние углы на сфере для окружностей второго ряда шестиугольников. Заменим $2A = 90 - C$, $\sin C = \cos 2A$ и, выполняя подстановки в уравнения (2.1), получим:

$$\operatorname{tg} r_1 / \operatorname{tg} (r_1 + r_2) = \sin r_2 / \sin (r_1 + r_2);$$

$$\sin r_2 / \sin (r_1 + r_2) = \sin r_1 \cos(r_1 + r_2) / \cos r_1 \sin(r_1 + r_2);$$

$$\sin r_2 \cos r_1 = \sin r_1 \cos(r_1 + r_2);$$

$$\sin r_2 \cos r_1 = \sin r_1 (\cos r_1 \cos r_2 - \sin r_1 \sin r_2);$$

$$\sin r_2 \cos r_1 = 0,5 \sin 2r_1 \cos r_2 - \sin^2 r_1 \sin r_2;$$

$$\sin r_2 (\cos r_1 + \sin^2 r_1) = 0,5 \sin 2r_1 \cos r_2;$$

$$\sin^2 r_2 (\cos r_1 + \sin^2 r_1)^2 = 0,25 \sin^2 2r_1 \cos^2 r_2;$$

$$\sin^2 r_2 (\cos r_1 + \sin^2 r_1)^2 = 0,25 \sin^2 2r_1 (1 - \sin^2 r_2);$$

$$\sin^2 r_2 (\cos^2 r_1 + \sin 2r_1 \sin r_1 + \sin^4 r_1 + 0,25 \sin^2 2r_1) = 0,25 \sin^2 2r_1;$$

$$\sin^2 r_2 = 0,25 \sin^2 2r_1 / (\cos^2 r_1 + \sin 2r_1 \sin r_1 + \sin^4 r_1 + 0,25 \sin^2 2r_1). \quad (2.2)$$

Проведем замену $x = \sin r_2$ и решая уравнение (2.2), получим

$$x_{1,2} =$$

$$= \pm \sqrt{0,25 \sin^2 2r_1 / (\cos^2 r_1 + \sin 2r_1 \sin r_1 + 0,25 \sin^2 2r_1 + \sin^4 r_1)} \quad (2.3).$$

Далее на конкретных примерах рассмотрим определение положений центров шестиугольников различных рядов.

Пример

Для сферического треугольника со внутренними углами 10-90-90° и

$r_1 = 10^\circ$, определяем положение центра O_2 из уравнения второй степени (2.3), тогда $x = 0.16929923028$; $r_2 = 9.74707733457^\circ$ и углы, соответственно, $B=30.927407069$, $2A=60.581166600557$, $C=29.418833399$, $D=61.411172557$.

Второй этап алгоритма геометрического расчета – определение положения центра O_3 для шестиугольников неравных радиусов в сферическом треугольнике r_1 -90-90 у произвольного (второго) внутреннего угла. Третий ряд шестиугольников будет иметь положение, определенное по схеме на рисунке 2.3 б. Составим (см. рис. 2.3 б) систему уравнений (2.4):

$$\cos 2A = \operatorname{tg} r_2 / \operatorname{tg} (r_2 + r_3); \quad (2.4)$$

$$\sin C = \sin r_3 / \sin (r_2 + r_3), \quad 2A + E = 90 - C;$$

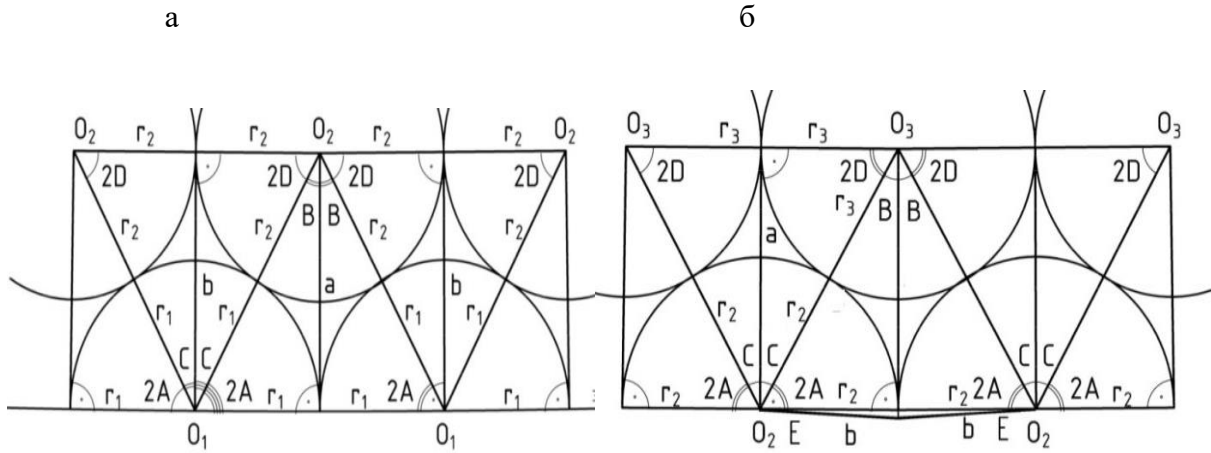


Рис. 2.3. Определение центров для шестиугольников неравных радиусов в сферическом треугольнике r_1 -90-90° : а - определение центра O_2 для шестиугольников у внутреннего угла 90 градусов; б - определение центра O_3 для шестиугольников неравных радиусов в сферическом треугольнике r_1 -90-90° у произвольного внутреннего угла.

где r_3 - радиус окружности в виде полярного угла третьего ряда шестиугольников; b и a - катеты в виде полярных углов прямоугольных сферических треугольников, которые здесь расположены в точках касания окружностей; $2A$ и C , соответственно, внутренние углы на сфере для окружностей второго ряда шестиугольников; B и $2D$, соответственно, внутренние углы на сфере для окружностей третьего ряда шестиугольников; E - угол приращения до 90о суммы углов $2A$ и C второго ряда шестиугольников.

Подставим $2A+E=90-C$, и получим $\sin C = \cos(2A+E)$. Выполняя дальнейшие подстановки, получим:

$$\frac{\operatorname{tg} r_2}{\operatorname{tg}(r_2+r_3)} \cdot \cos E - \sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{tg} r_2}{\operatorname{tg}(r_2+r_3)}\right)^2} \cdot \sin E = \frac{\sin r_3}{\sin(r_2+r_3)}, \quad (2.5)$$

$$k = \operatorname{tg} E \Rightarrow$$

$$\frac{\operatorname{tg} r_2}{\operatorname{tg}(r_2+r_3)} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+k^2}} - \sqrt{1 - \left(\frac{\operatorname{tg} r_2}{\operatorname{tg}(r_2+r_3)}\right)^2} \cdot \frac{k}{\sqrt{1+k^2}} = \frac{\sin r_3}{\sin(r_2+r_3)} \Rightarrow$$

$$\frac{\operatorname{tg} r_2}{\sqrt{1+k^2}} - \sqrt{(\operatorname{tg}(r_2+r_3))^2 - (\operatorname{tg} r_2)^2} \cdot \frac{k}{\sqrt{1+k^2}} = \sin r_3 \cdot \sqrt{1 + (\operatorname{tg}(r_2+r_3))^2}$$

$$a = \operatorname{tg} r_2, x = \operatorname{tg} r_3 \Rightarrow$$

$$\left((a^2 + \sqrt{1+a^2} \cdot \sqrt{1+k^2})^2 - (1-a^4) \cdot k^2 \right) x^2 - 2a \left((1+a^2)k^2 + a^2 + \sqrt{1+a^2} \cdot \sqrt{1+k^2} \right) x - a^2 = 0. \quad (2.6)$$

Пример

Для сферического треугольника со внутренними углами 10° - $2A^\circ$ -($2A+E$) $^\circ$, где $E = 2,3385796^\circ$; $r_2 = 9,747077^\circ$; $b = 9.7550459^\circ$, определяем положение центра O_3 из уравнения (2.6):

$$1,05820779x^2 - 0,3647179x - 0,02950799 = 0; \text{ и } r_3 = 7,3933486^\circ.$$

Третий этап – определение положения центров O_4 , O_5 и т.д. для шестиугольников неравных радиусов в сферическом треугольнике r_1 - 90° - 90° . Эти данные определяем, используя уравнение (2.6). Положения нечетных рядов шестиугольников не меняется, но радиус описанных окружностей можно изменять для формирования правильных шестиугольников нечетных рядов.

Далее нечетные радиусы поворачиваем до образования правильных шестиугольников, чтобы затем корректировать положение четных рядов шестиугольников и определяем для них один усредненный радиус. Таким образом, можно заполнить сегменты и сферу полностью шестиугольниками, половина из которых правильные.

На **четвертом** этапе рис. 2.3 б определяем центры шестиугольников четных рядов, вписанных в окружности минимально возможных радиусов, т.е. при условии, что эти окружности пересекают друг друга в точках узлов с окружностями смежных нечетных рядов правильных шестиугольников.

2.1.2. Второй вариант разрезки на основе сферических совместимых треугольников (сегментов) r_1 -90-90°.

Для формирования разбивки треугольной сети на сфере вторым способом используем также повторяющийся сегмент, равный половине сектора с размером дуги на экваторе r_1 . Задача такая - определить положения центра O_2 и O_3 и т. д. для шестиугольников неравных радиусов в сферическом треугольнике r_1 -90-90 у произвольного (второго) внутреннего угла (рис. 2.1). Задача будет решаться графо-аналитическим способом. Это возможно потому, что центры вспомогательных окружностей «больших» шестиугольников совпадают с центрами окружностей, описывающих «малые» шестиугольники (рис. 2.4).

Первый шаг данного алгоритма геометрического расчета – определение аналитически с использованием уже найденных уравнений (2.2, 2.3) сферической тригонометрии положения центра O_2 в сферическом треугольнике r_1 -90-90 у внутреннего угла (рис. 2.4). Это необходимо для определения графически (или аналитически) положений центров O_2 и O_3 и т.д. для шестиугольников неравных радиусов r_1 и r_2 с использованием вспомогательных окружностей «больших» шестиугольников r_{11} , r_{22} (рис. 2.4).

После определения положения второй окружности строим окружности больших шестиугольников r_{11} , r_{22} , точки их пересечения находятся на меридианах. Эти точки симметричны относительно дуг, соединяющих центры окружностей. Положение точек пересечения окружностей больших шестиугольников позволяет построить все последующие окружности r_{33} , r_{44} и т.д. и, таким образом, определить положение центров окружностей малых шестиугольников r_3 и r_4 и т.п.

Второй шаг - определение центра O_3 для шестиугольников неравных радиусов в сферическом треугольнике r_1 -90-90 у произвольного(второго) внутреннего угла.

Положение второго ряда шестиугольников не меняется, но радиус описанных окружностей можно изменять для формирования правильных шестиугольников первого ряда.

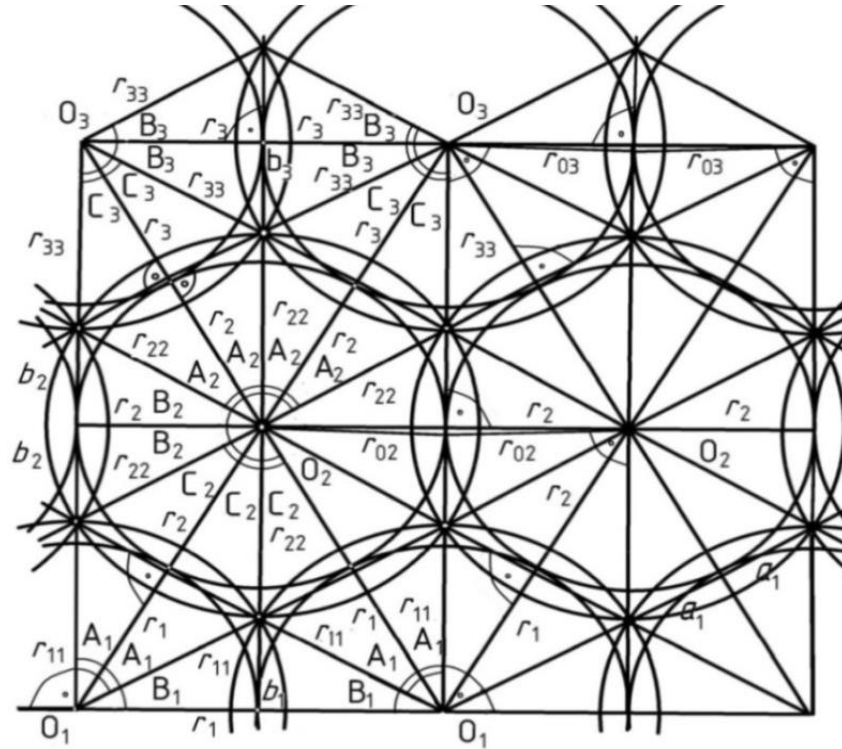


Рис. 2.4. Определение центров O_2 и O_3 для шестиугольников неравных радиусов в сферическом треугольнике $r_1-90-90^\circ$ у внутреннего угла 90 градусов.

С учетом изменений третий ряд шестиугольников будет иметь положение, определенное по схеме на рисунке 2.4, где r_3 - радиус окружности в виде полярного угла третьего ряда шестиугольников; r_2 - радиус окружности в виде полярного угла второго ряда шестиугольников; b_2 и a_2 - катеты в виде полярных углов прямоугольных сферических треугольников, которые здесь образованы большими окружностями r_{22} и r_{33} . A_2+B_2 , C_2 и B_2 , соответственно, внутренние углы на сфере образованные дугами, связывающими окружности второго и третьего рядов шестиугольников; A_3+B_3 и, соответственно, внутренние углы на сфере для окружностей третьего ряда шестиугольников; E_2 - угол сферического превышения 90° для суммы углов A_2+B_2 и C_2 второго ряда шестиугольников.

Более простые зависимости при определении центров имеют окружности для вписания больших шестиугольников, каждые смежные три из этих окружностей имеют общую точку на сторонах совместимого сегмента. Малые касающиеся окружности, образованные из общих центров получаются с радиусами несколько большими, чем требуется на величину E_2 (угол превышения, для O_3 и E_3 - для O_4).

Если принять превышение $E_2/2$ для O_2 , т.е. использовать при определении центров второго ряда увеличенный радиус r_{02} , то получим положение центров окружностей в совместимом сегменте, позволяющее разместить правильные шестиугольники, которые требуют увеличения размеров смежных окружностей для обеспечения их минимального пересечения. Приближение дает точность вычисления в не менее 4 значащих цифр для первых пяти рядов с избытком. Можно применить итерационный метод для оптимизации при расчете на ЭВМ и вводить значение углов предыдущего расчета, достигая таким образом нужной точности. Во всех случаях проводим проверку положения центров методом триангуляции.

Пример. Для сферического треугольника со внутренними углами $10-2A-2A+E^\circ$, где $E = 2.9346314^\circ$ и $r_2 = 9.5638949^\circ$; $r_{02} = 9.5762211^\circ$, определяем положение центра O_3 (см. рис. 2.4-2.5) из уравнения Непера [206], $x = 0.16614739$; и $r_2 = 9.56389495^\circ$; $r_{02} = 9.57622113^\circ$.

Тогда углы, соответственно $A_1+B_1=60.2528797^\circ$, $A_1=29.7471203^\circ$,

$$B_1 = 30.5057594^\circ; \cos(C_2+B_2) = \operatorname{tg} r_2 / \operatorname{tg} (r_1+r_2); (B_2+C_2)= 61.6980655^\circ;$$

$$C_2 = (90-E-B_2)/2 = (90 - 2.93463142 - 30.4614997)/2 = 28.3019345^\circ;$$

$$C_2+B_2 = 58.7634341^\circ; r_1+r_2=17.999471869^\circ; r_3 = 8.4355769^\circ;$$

$$B_1 = 60.2528797 - 29.7471203 = 30.5057594^\circ; r_{11} = 11.5662002^\circ.$$

Принимаем $r_2 = r_{02} = 9.5762211$; тогда $A_1+B_1=60.2751889^\circ$; $A_1 = 29.7248111^\circ$; $b_2 = 9.56315668$; $E_2 = 3.02125448$; $C_2=31.2155454^\circ$; $2A_2=56.3885819^\circ$;

$B_2 = 30.5901636^\circ$; $C_2 + B_2 = 61.8057090^\circ$; $A_2 = 28.19429095^\circ$, $r_3 + r_2 = 18.008339^\circ$; откуда $r_3 = 8.4321183^\circ$.

Распределение представляет теоретическую основу для размещения максимального числа окружностей одного радиуса. Учитывая касания трёх смежных окружностей с образованием между ними треугольной панели, сначала определяем радиусы нечетных рядов правильных шестиугольников, затем определяем новые положения центров нечетных рядов. Для примера, приведенного на рисунках 2.3-2.4, положения центров пяти рядов шестиугольников показаны на рисунках 2.5 а, б, здесь также приведены сами чередующиеся ряды панелей из правильных шестиугольников и неправильных.

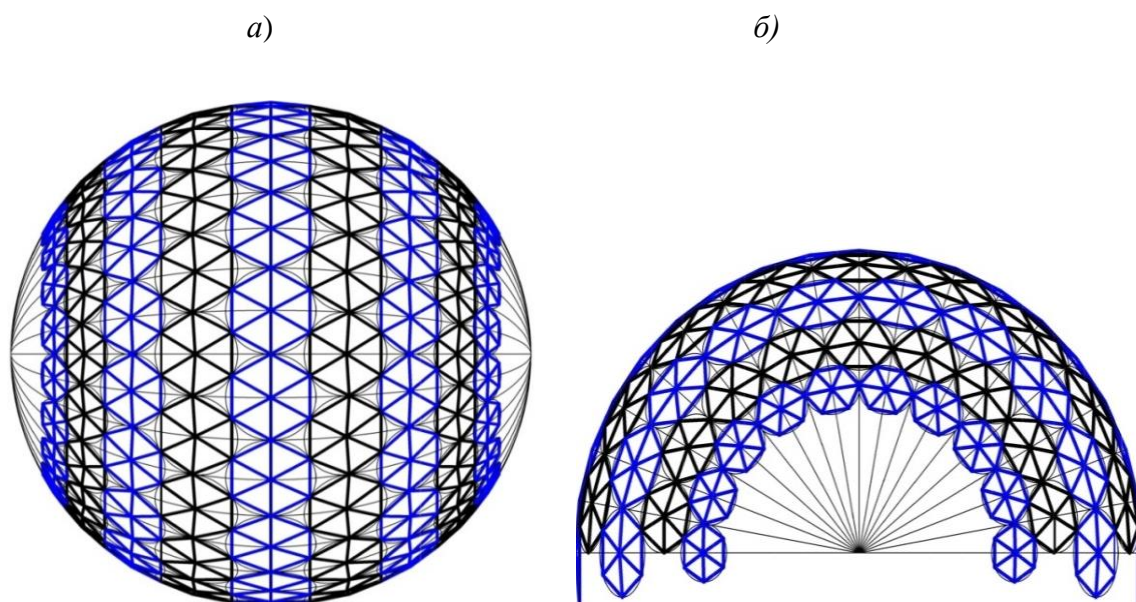


Рис. 2.5. Схема в двух видах (а и б) сферической оболочки диаметром 30 м на основе сегментов $10-90-90^\circ$ из пяти рядов шестиугольных панелей с треугольными вставками между ними.

Для завершения разработки алгоритма геометрического расчета разрезов, предлагаемых конструктивно-технологических систем, воспользуемся также повторяемостью параметров сети на любом совместимом сферическом сегменте. При решении указанной проблемы предложены автоматизированные средства в системах AutoCAD, дополненных специальными программными элементами (см. этапы листинга 2.1 приложения 2). Координаты оболочки (рис.

Для реализации метода данной разрезки работе [17, 188]. на первом этапе определим центры шестиугольников, вписанных в окружности минимальных радиусов, регулярно расположенных относительно экватора сферы. В этом случае, эти окружности касаются друг друга в точках пока неизвестного положения главной линии – промежуточного меридиана (см. рис. 2.7 а).

В условиях данной задачи (**задача 1**) закладывается на первом этапе расчетов возможность для формирования правильных шестиугольников в первом ряду. При этом второй и третий ряды шестиугольников будут иметь положение, определенное по схеме на рисунке 2.7 а. Радиус следующих нечётных рядов мы будем изменять для получения правильных шестиугольников, поэтому можно поставить задачу определения сразу двух центров, если принять условие $r_3 = r_2$. Для внутренних углов первого ряда это означает, что $A = C = 30^\circ$. На рисунке 2.7, б в показано, как правильный сферический шестиугольник (правильный треугольник) наименьшего радиуса расположен на оси симметрии в виде биссектрисы наименьшего угла произвольного треугольника на сфере. Исходя из этого, определяем положение центра O правильного шестиугольника в этом сферическом треугольнике с внутренними углами A, B, C . Задача построения треугольной сети с помощью окружностей решается геометрическими построениями указанных элементов с помощью программного комплекса Autodesk AutoCad (см. этапы листинга с рис. 2.12). Приводим один из методов геометрического расчета для данных разрезок.

Первый шаг алгоритма разрезки - определение положения центра O_2 для шестиугольников равных радиусов в сферическом треугольнике $b-90-90^\circ$ у внутреннего угла 90 градусов.

Из рисунка 2.7, а видно, что оптимальная треугольная сеть на сфере получается также как в первой задаче, если эти треугольники составляют правильные или неправильные сферические шестиугольники (часть из которых, в свою очередь, может быть представлена правильными треугольниками),

вписанные в окружности наименьшего радиуса [8] и размещенные в совместимых сферических треугольниках сферы b -90-90°.

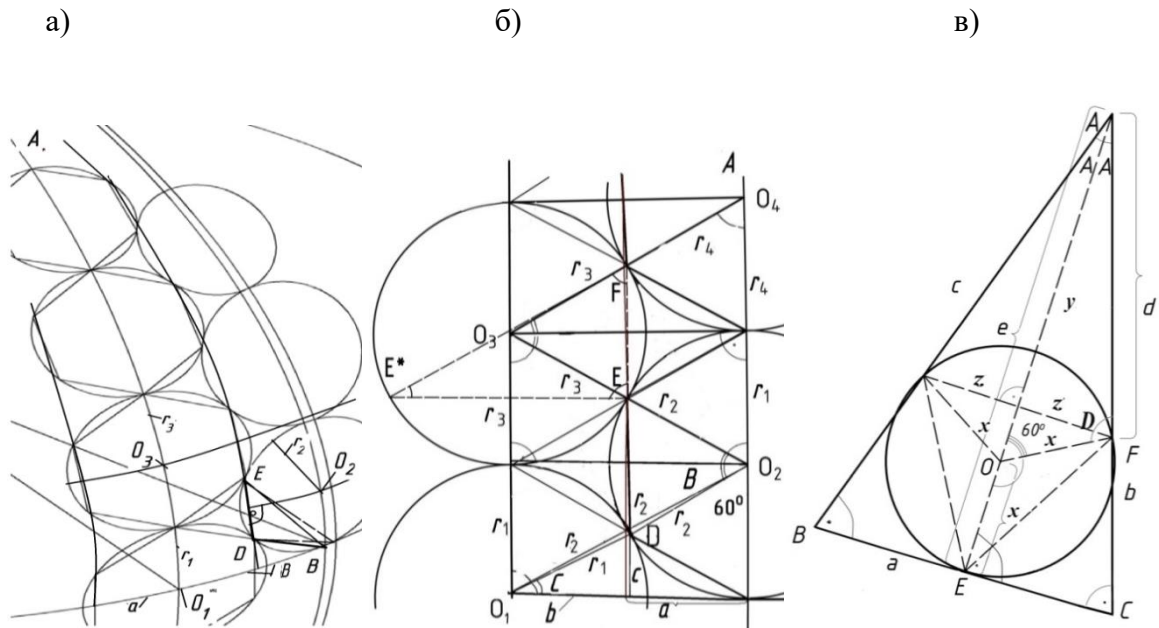


Рис. 2.7. Определение центра O_2 для шестиугольников неравных радиусов в сферическом треугольнике b -90-90° у внутреннего угла 90 градусов: а, б - правильные и неправильные сферические шестиугольники, вписанные в окружности наименьшего радиуса; в - правильный сферический шестиугольник (правильный треугольник) наименьшего радиуса на оси симметрии в виде биссектрисы наименьшего угла.

На первом этапе определяем центры шестиугольников, вписанных в окружности минимально возможных равных радиусов, при условии, что эти окружности только касаются друг друга в одной точке. Определим r_1 (см. рис. 2.7 б) из уравнений (2.7):

$$\cos r_1 = \cos(r_1 + r_1) / \cos b; \quad (2.7)_-$$

$$\cos 2r_1 / \cos r_1 = \cos b,$$

где r_1 - радиус окружности первого и второго рядов шестиугольников в виде полярного угла; b - катет прямоугольного сферического треугольника в виде полярного угла.

Получаем:

$$(\cos^2 r_1 - \sin^2 r_1) / \cos r_1 = \cos b, \quad (2\cos^2 r_1 - 1) = \cos b \cos r_1;$$

тогда

$$2\cos^2 r_1 - \cos b \cos r_1 - 1 = 0.$$

Проведем замену $x = \cos r_1$,

$$2x^2 - \cos b x - 1 = 0. \quad (2.8)$$

Тогда

$$x_{1,2} = \left(\frac{\cos b \pm \sqrt{\cos^2 b + 8}}{4} \right). \quad (2.9)$$

Пример. Для сферического треугольника с внутренними углами

12-90-90°, где $b = 12^\circ$, определяем положение центра O_2 (2.9)

$$x_{1,2} = 0.9927335959; \quad r_1 = 6.911315723695^\circ.$$

Находим из уравнения (3) $B = 60.48485391275586$, $A = 30.242426956$, $C = 59.757573044$, $D = 29.515146087$.

Решение задачи в дальнейшем будет состоять в определении величины полярного угла биссектрисы $e = EA$ у внутреннего угла $2A$ произвольного сферического треугольника (рис. 2.9 в) из формулы (2.10).

$$\operatorname{ctg} e = \sin(b+c) / (2\cos A \sin b \sin c). \quad (2.10)$$

Задача 1. Обозначим полярные углы $A = A/2$, дуга $EA = e = x+y$, дуга $FA = d$.

Составим, используя соотношения Непера [206], систему уравнений (2.11):

$$\begin{aligned} x &= e - y, \\ \sin d &= \sin z / \sin A, \\ \sin z &= \sin x \sin 60^\circ, \\ \cos d &= \cos x \cos y + \sin x \sin y \cos 60^\circ, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где e – дуга в виде полярного угла биссектрисы из вершины A произвольного сферического треугольника с острыми углами (см. рис.2.7 в); x – радиус окружности описывающей правильный шестиугольник (показанный при постановке задачи на рисунке как сферический правильный треугольник) в виде полярного угла; y – дуга от вершины A до центра окружности, описывающей правильный треугольник в виде полярного угла; z – сторона этого правильного треугольника в виде полярного угла; A , B и C вершины произвольного сферического треугольника; $2A$ и D , соответственно, внутренние углы в произвольном сферическом треугольнике на сфере.

Для снижения степени окончательного уравнения произведем следующие преобразования. Выполняем подстановки $\cos x = \cos(e - y)$ и $\sin x = \sin(e - y)$ и получаем:

$$1 - \left(\frac{\sin x \sin 60^\circ}{\sin A} \right)^2 = (\cos x \cos y + \cos 60^\circ \sin x \sin y)^2, \quad (2.12)$$

$$\sin^2 A - \frac{3}{4} \sin^2 x = (\cos^2 x \cos^2 y + \cos x \cos y \sin x \sin y + \frac{1}{4} \sin^2 x \sin^2 y) \sin^2 A. \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{3}{4} (\sin^2 A - 1) \operatorname{tg}^2 x \operatorname{tg}^2 y + \left(\sin^2 A - \frac{3}{4} \right) \operatorname{tg}^2 x + \sin^2 A \operatorname{tg}^2 y - \\ - \sin^2 A \operatorname{tg} x \operatorname{tg} y = 0. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Учитывая, что $x = e - y$, и, введя обозначения: $k_e = \operatorname{tg} e$, $t = \operatorname{tg} y$, получим

$$\operatorname{tg} x = \frac{k_e - t}{1 + k_e t}. \quad (2.15)$$

Переходя к уравнению (2.14), получим:

$$\frac{3}{4} (\sin^2 A - 1) \left(\frac{k_e - t}{1 + k_e t} \right)^2 t^2 + \left(\sin^2 A - \frac{3}{4} \right) \left(\frac{k_e - t}{1 + k_e t} \right)^2 +$$

$$+\sin^2 A t^2 - \sin^2 A \frac{k_e - t}{1 + k_e t} t = 0. \quad (2.16)$$

Умножим уравнение (2.16) на $(1 + k_e t)^2 \neq 0$ и, проводя элементарные преобразования, получим:

$$\begin{aligned} & \left(k_e^2 \sin^2 A - \frac{3}{4} \cos^2 A \right) t^4 + 3k_e \left(\sin^2 A + \frac{1}{2} \cos^2 A \right) t^3 + \\ & + \left((3 - k_e^2) \sin^2 A - \frac{3}{4} k_e^2 \cos^2 A - \frac{3}{4} \right) t^2 + 3k_e \left(\frac{1}{2} - \sin^2 A \right) t + \\ & + k_e^2 \left(\sin^2 A - \frac{3}{4} \right) = 0. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Разделим обе части уравнения (2.17) на $\cos^2 A$ и придем к зависимости,

$$\begin{aligned} & \left(k_e^2 \operatorname{tg}^2 A - \frac{3}{4} \right) t^4 + 3k_e \left(\operatorname{tg}^2 A + \frac{1}{2} \right) t^3 + \\ & + \left(\left(\frac{9}{4} - k_e^2 \right) \operatorname{tg}^2 A - \frac{3}{4} (k_e^2 + 1) \right) t^2 + \\ & + \frac{3}{2} k_e (1 - \operatorname{tg}^2 A) t + \frac{1}{4} k_e^2 (\operatorname{tg}^2 A - 3) = 0; \end{aligned} \quad (2.18)$$

Наконец, введя в уравнении (2.18) коэффициент $k_A = \operatorname{tg} A$, приходим к расчетному уравнению

$$\begin{aligned} & \left(k_e^2 k_A^2 - \frac{3}{4} \right) t^4 + 3k_e \left(k_A^2 + \frac{1}{2} \right) t^3 + \\ & + \left(\left(\frac{9}{4} - k_e^2 \right) k_A^2 - \frac{3}{4} (k_e^2 + 1) \right) t^2 + \\ & + \frac{3}{2} k_e (1 - k_A^2) t + \frac{1}{4} k_e^2 (k_A^2 - 3) = 0. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Пример. Применяем полученные результаты для решения поставленной задачи в случае равнобедренного треугольника с углом $\varphi = 2A = 24^\circ$. Вычислим радиус первого ряда $r_I = \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} b/2) / \cos 30^\circ = 13,790036^\circ$.

Определяем биссектрису по заданным сторонам сферического треугольника. Рассмотрим треугольник с основанием равным φ и радиусом r_1 . Тогда биссектриса $e = 90^\circ - r_1 = 76,20996366^\circ$. Тогда расчетные коэффициенты получают следующие выражения:
 $k_e = \operatorname{tg} e = 4,07432919, k_A = \operatorname{tg} A = 0,21255656$.

Таким образом, уравнение (2.23) принимает вид

$$(2,1012444122126e - 11) t^4 + 6,663731931768 t^3 - 17,99850269346 t^2 + 5,835374712105t - 12,26261876269 = 0.$$

Из условий задачи, корень уравнения $t = 1449,8170928955078$ удовлетворяет условию задачи, откуда находим $y = 62,45944662957^\circ$. Затем определяется радиус и положение центра правильного шестиугольника минимального радиуса $x = 13,750517^\circ$.

Для решения задачи использовалось программное обеспечение Scilab 5.4.1 [207]. Полученные решения позволяют реализовать дальнейшие шаги алгоритма аппроксимации сферы треугольной геометрической сетью с максимальным числом правильных шестиугольников. Таким образом, определяем положение всех нечетных центров O_3, O_5 , и т.д.

Второй шаг алгоритма разрезки - определение четных номеров центров окружностей. Положение этих центров определяются однозначно по правой оси рисунка 2.7, а. Для этого методами сферической тригонометрии необходимо найти параметры треугольников, вписанных в указанные окружности, т.е. треугольника $E F B$ с внутренними углами E, F, B . Из известной формулы находим радиус описанной окружности, где, $S = (E + B + F)/2$.

$$r_2 = \operatorname{arcc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{\cos(S-E) \cos(S-F) \cos(S-B)}{\cos(S)}}. \quad (2.20)$$

Затем, если второй радиус не совпадает с перпендикуляром BO_2 , либо изменяем шаг (угол повторяющегося сегмента) φ , либо итерациями, проводя

заново подбор первых радиусов. достигаем нужной точности, меняем a , и обеспечиваем заданный угол ϕ .

2.2. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФОРМЫ СЕТЧАТЫХ СБОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК НА ОСНОВЕ СЕКТОРОВ С ПЛОСКИМИ ШЕСТИУГОЛЬНЫМИ И ТРЕУГОЛЬНЫМИ ПАНЕЛЯМИ.

Формирование треугольной геометрической сети на сфере по критерию минимума типоразмеров элементов может быть представлено и решено размещением правильных и неправильных шестиугольников, вписанных в окружности минимальных размеров, например, в сферических секторах, показанных на рисунках 2.8 и 2.9, а не только сегментах.

Инновационные конструктивно-технологические формы купольных покрытий в виде сферических оболочек должны обеспечивать реализацию всех выше изложенных принципов и подходов уже на стадии геометрической разрезки сферы. Геометрические схемы членения сферической оболочки разработаны путем использования в качестве исходной основы сферические секторы 60° и 120° [5,14,132]. Каждая разновидность разрезки, как геометрическая основа, имеет свои архитектурные, технологические и конструктивные возможности и будет оптимальна только для определенного вида куполов или оболочек. Отсюда следует, что должны быть предложены и проработаны параметры нескольких типов разрезов, чтобы в конкретной проектной ситуации можно было выбирать тот вариант, который был бы оптимален для конкретного проектируемого здания или сооружения.

В работе исследованы несколько конструктивно-технологических методов образования треугольных сетей на сфере с шестиугольными монтажными панелями, которые названы системой «Транер» (рис. 2.8).

Суть предложенных вариантов разрезов «Транер» заключается в том, что сборная сферическая оболочка составляется из монтажных шестиугольных панелей, разнотипные марки которых одинаковым образом полностью или частично расположены в пределах секторов, имеющих общую вершину сферы

на панели, выполненной в виде правильного шестиугольника. Панели в виде правильных и неправильных шестиугольников могут иметь убывающие размеры от центральной панели к периферии. Но панели в виде правильных шестиугольников могут иметь и одинаковые размеры панелей, расположенных по границам секторов, которые являются осями симметрии сферы.

Для первого варианта решений в пределах секторов, составляющих 60° в сборных сферических оболочках шестиугольные панели выполнены с углами, описанными окружностями со своими радиусами из центров панелей, лежащих на сфере. Между шестиугольными панелями расположены треугольные панели (несущие или ненесущие), углы шестиугольных панелей описаны своими радиусами из центров панелей, смежные шестиугольные панели соединены между собой в точках пересечения и в точках касания окружностей, описывающих панели. Панели, смежные с шестиугольной панелью на вершине купола, выполнены одного радиуса и также в виде правильных шестиугольников. Шестиугольные панели могут быть выполнены также в свою очередь из треугольных панелей с узлом соединения в центре шестиугольной панели (в центре окружности, в которую они вписаны). На рисунке 2.8 а изображен вид сверху данной сборной сферической оболочки с шестью секторами в плане, составляющих 60° , а на рисунке 2.8 б - вид сбоку.

Во втором варианте (рис. 2.9) для секторов, составляющих 120° , на вершине сферы расположена панель, выполненная в виде правильного треугольника, а смежные с центральной треугольной панелью правильные шестиугольные панели вписаны в окружности одного радиуса. Панели, с центрами, расположенными по границам секторов, выполнены с убывающими от вершины к периферии радиусами. На рисунке 2.9, а показан вид сверху сборной сферической оболочки с тремя секторами в плане, составляющими 120° ; на рисунке 2.9, б - вид сбоку.

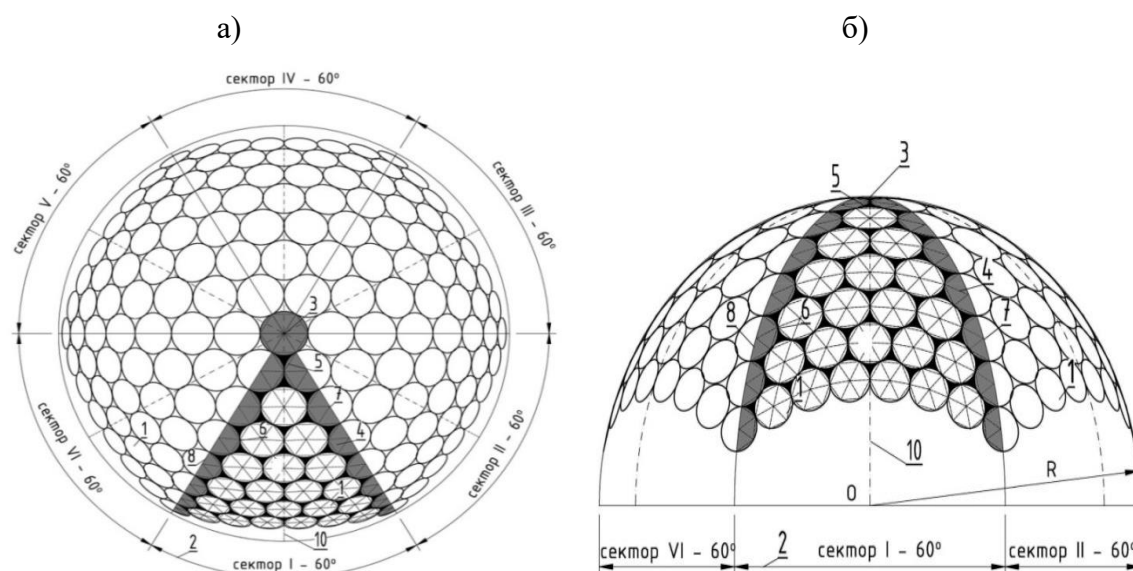


Рис. 2.8 – Схема сборной сферической оболочки из 6 секторов с углами на вершине 60° с разрезкой из шестиугольных панелей с треугольными вставками между ними: а – вид сверху; б – вид сбоку; 1 – панели в виде плоских шестиугольников; 2 – сектора; 3 – панель на вершине купола в виде правильного плоского шестиугольника; 4 – панели в виде правильных шестиугольных панелей (выделены серым цветом); 5 – панели в виде треугольника; 6 – узлы соединения шестиугольных панелей; центры шестиугольных панелей; 8 – границы секторов; 9 – остаточная треугольная панель; 10 – ось сектора.

На этих рисунках показаны схемы распределения окружностей, описывающих шестиугольники, в сегментах $2r$, ограниченных линиями «зенит-надир», равномерно распределенных относительно линии одного меридиана сферы и ортогонального ему в «зените» вспомогательного меридиана.

Распределение представляет теоретическую основу размещения максимального числа окружностей одного радиуса, с учетом касания трёх смежных окружностей и образования между ними треугольника. На схемах рисунков 2.1, 2.2 и 2.8 показано как с помощью этих сегментов можно разместить окружности в секторе под наклоном 60° к экватору или под наклоном 30° к экватору. Для использования методов расчета с помощью сферической тригонометрии воспользуемся зависимостями на плоскости диаметра окружности сферы, вписанных в нее многоугольников и радиусов.

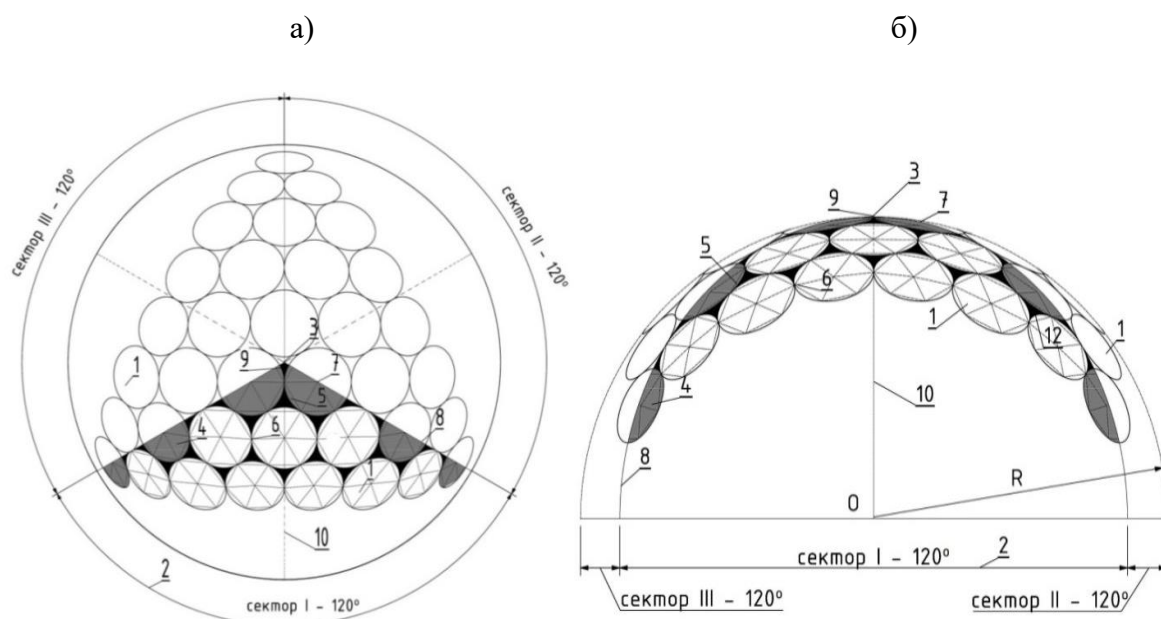


Рис. 2.9. Схема сборной сферической оболочки из 3-х секторов с углами на вершине 120° с разрезкой из шестиугольных панелей с треугольными вставками между ними: а – вид сверху; б – вид сбоку; 1 – панели в виде плоских шестиугольников; 2 – сектора; 3 – панель на вершине купола в виде правильного плоского треугольника; 4 – панели в виде правильных шестиугольных панелей (выделены серым цветом); 5 – панели в виде треугольника; 6 – узлы соединения панелей; центры шестиугольных панелей; 8 – границы секторов; 9 – остаточная треугольная панель; 10 – ось сектора.

При разработке алгоритма геометрического расчета разрезов, предлагаемых конструктивно-технологических систем, воспользуемся также повторяемостью параметров сети на любом сферическом треугольнике) и, соответственно, на любом совместимом сферическом треугольнике или в сферическом секторе. Для геометрического построения сетчатого купола с помощью программного комплекса AutodeskAutoCad 2015, после запуска программы необходимо перейти в режим 3D-моделирования (рис. 2.10). Разобьем алгоритм построения на три основных этапа. Точки пересечения осей секторов из линий «зенит-надир» и будут опорной сетью окружностей для вписания шестиугольников. Теоретически сетью из шестиугольных пирамид с треугольниками между ними можно покрыть всю сферу, во всяком случае, ниже экватора.

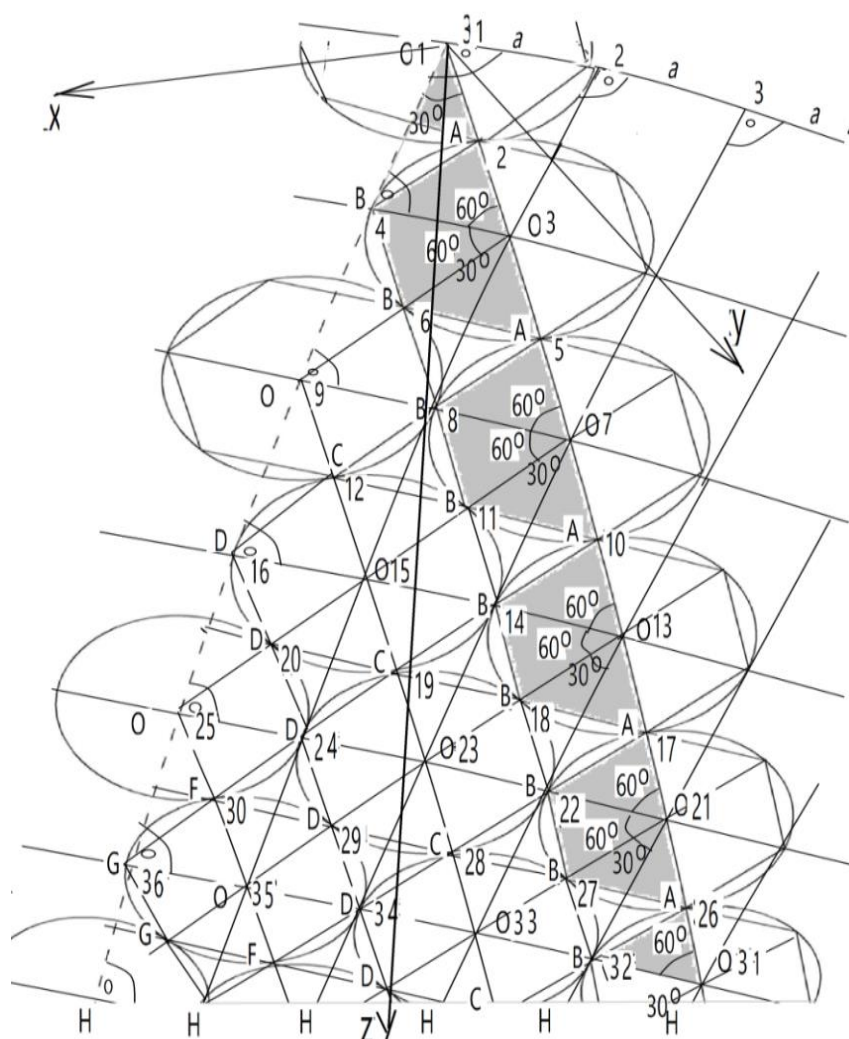


Рис. 2.10. Схема опорной сети окружностей и построение треугольной сети на сфере.

На втором этапе воспользуемся опорной сетью и построим окружности без пробелов (т.е. - совместимые, касающиеся или пересекающиеся), но различных радиусов (рис. 2.11). Сектора здесь идут от ортогональных главных линий-меридианов с центром в «зенит» до единого центра на сфере в точке «надир». Ось Y совпадает по плоскости одной из границ сектора.

Но для снижения числа типоразмеров лучше по осям секторов разместить правильные шестиугольники, а все окружности одного ряда сделать одного радиуса.

Поэтому в построениях возможна корректировка радиусов, с которых начинается построение по границам секторов; т.е. радиусов, предназначенных для вписания правильных сферических пирамид. На третьем этапе по точкам

пересечений окружностей строим вписанные в окружности шестиугольники, тем самым получая структуру сетчатого купола (рис. 2.11). Несмотря на приближенность метода из-за искажений в опорной сети, другие способы формирования сети из одной вершины высотой более половины сферы оказались более сложными и неточными.

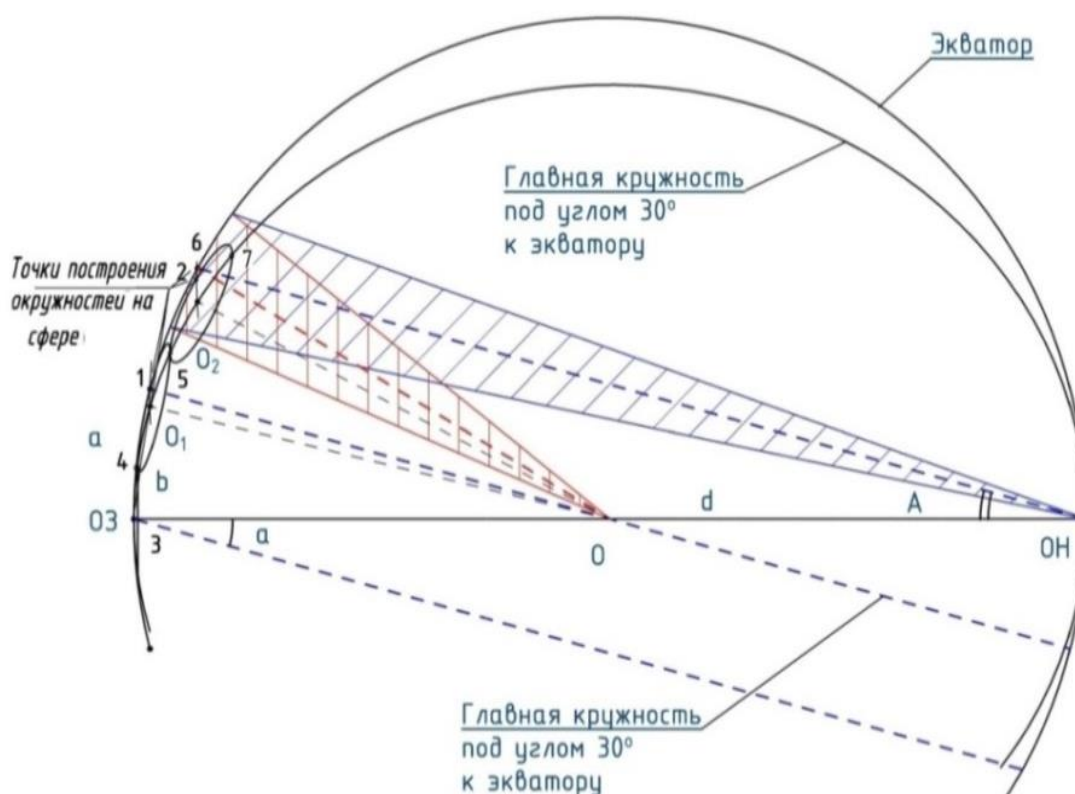


Рис. 2.11. Схема распределения окружностей от зенита к надиру.

С учетом ограничений, которые дают разрежки на основе секторов 60° , получаем оптимальную по критерию минимума типоразмеров разрежку на сфере с пятью рядами окружностей (рис. 2.12), состоящую из монтажных только шестиугольных панелей 9-ти типоразмеров или из пяти правильных шестиугольных панелей, четырех неправильных шестиугольных панелей и двенадцати треугольных панелей-вставок (для стержней - всего 33 типоразмеров).

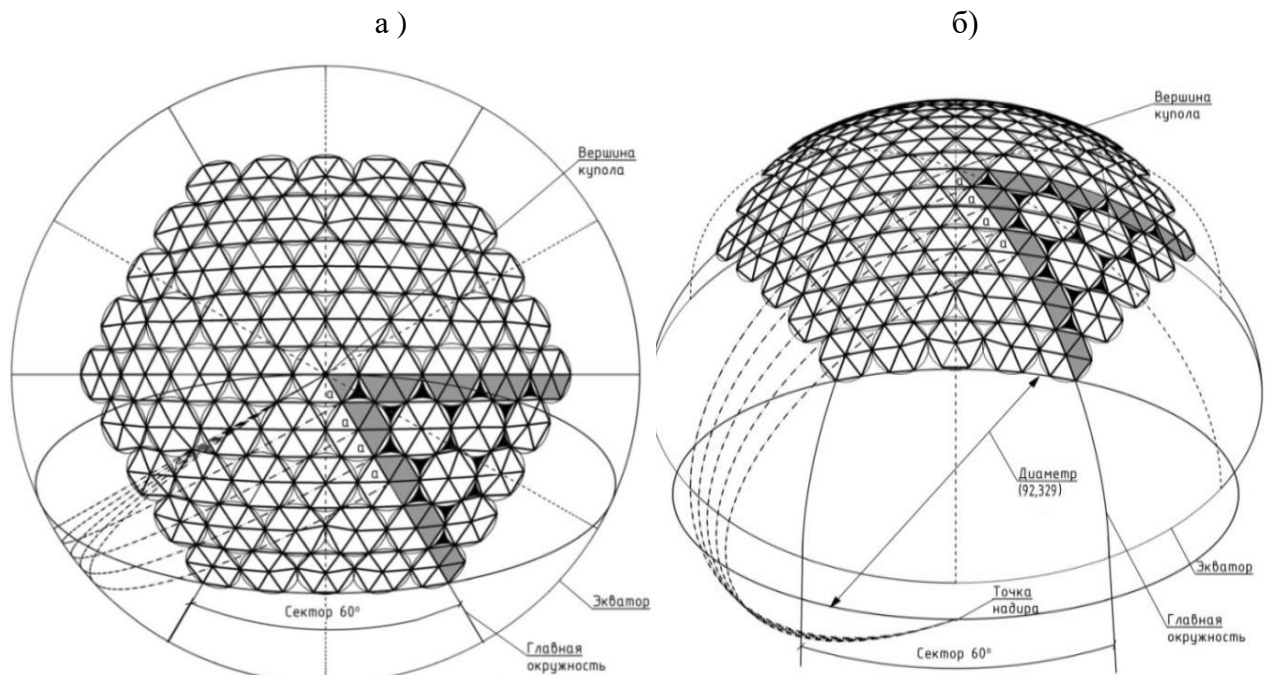
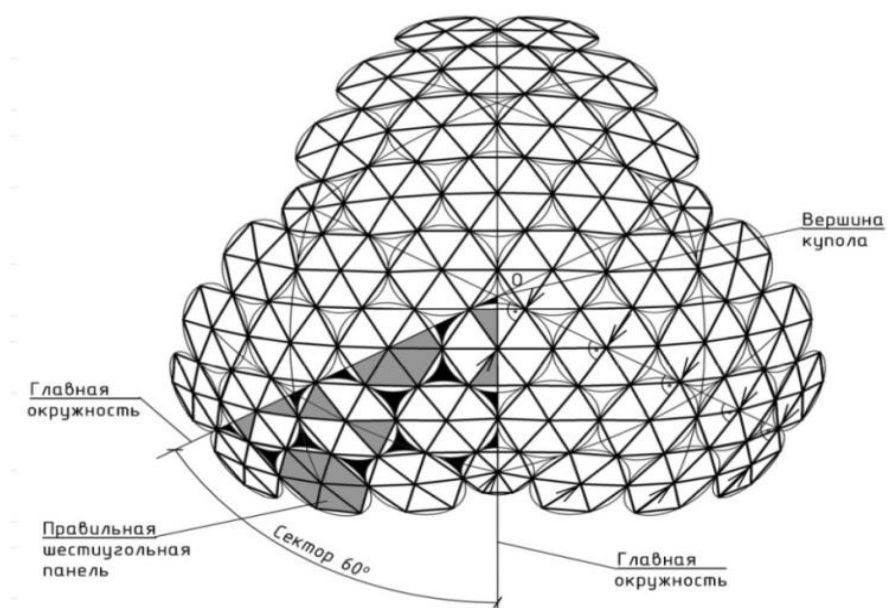


Рис. 2.12. Схема сборной сферической оболочки диаметром 100 м (60 м между опорами) из 6 секторов с углами на вершине 60° с разрезкой из шестиугольных панелей с треугольными вставками между ними.

Опорный контур сборной оболочки выполняется в виде шести арок радиусом 46,1645 м (рис. 2.12 а, б), выполненных по окружностям, проходящим через точку «надир» и углы опорных шестиугольных панелей. Координаты оболочки (рис. 2.12 а, б) диаметром 100 м наиболее эффективной разрезки приведены в работах [5, 14].

С учетом ограничений, которые дают разрезки на основе секторов 120° , получаем оптимальную по критерию минимума типоразмеров разрезку на сфере с тремя рядами окружностей (см. рис. 2.13 а, б), состоящую из монтажных шестиугольных панелей 4-х типоразмеров или из правильной шестиугольной панели, одной неправильной шестиугольной панели того же радиуса, двух неправильных шестиугольных панелей разных радиусов и семнадцати треугольных панелей-вставок (для стержней - всего 15 типоразмеров).

а)



б)

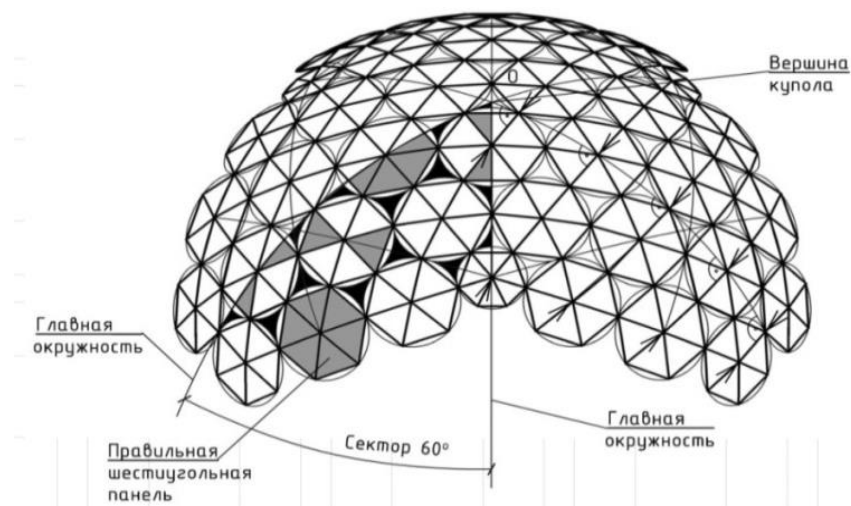


Рис. 2.13. Схема сборной сферической оболочки диаметром 50 м (36м между опорами) из 3 секторов с углами на вершине 120° с разрезкой из шестиугольных панелей с треугольными вставками между ними.

Координаты оболочки диаметром 50 м наиболее эффективной разрезки для секторов 120° (рис. 2.13 а, б) показаны в работе [14].

2.3. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ФОРМЫ СЕТЧАТЫХ СБОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК В ВИДЕ СЕКТОРОВ ИЗ ПЛОСКИХ (ПИРАМИДАЛЬНЫХ) ШЕСТИУГОЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Во многих конструктивных решениях куполов просматривается тенденция применения уже на стадии разрезки и формообразования этих покрытий эффективных технологических решений изготовления отдельных элементов, стандовой укрупнительной сборки сегментов куполов, возведения их с обеспечением заданной точности монтажа покрытия, в целом, или основных его несущих конструкций. Учитывая, что не все возможности разбиения сферы на панели или стержни еще исчерпаны и то, что преобладающее количество сетчатых куполов построено на сфере, проанализируем решения сборных сферических куполов из плоских шестиугольных панелей или сферических пирамид с плоским основанием, с оценкой и сравнениями эффективности треугольной сети [4].

Как описано ранее, оптимизация треугольной геометрической сети на сфере по критерию минимума типоразмеров элементов может быть решена размещением правильных и неправильных шестиугольников, вписанных в окружности минимальных размеров, в свою очередь, в сферических секторах, показанных на рисунках 2.14-2.18. Кроме перечисленных вариантов применения свойств симметрии главных линий-окружностей сферы, в подобных разрезках реализованы возможности центральной симметрии окружностей. Использование указанных окружностей для построения геометрической сети из шестиугольников позволяет на 15-40% снизить число типоразмеров монтажных элементов купола, получить при необходимости плоские шестиугольные панели или сферические шестиугольные каркасные пирамиды, а также воспользоваться конструктивными преимуществами предварительного напряжения.

Перспективные конструктивно-технологические формы купольных покрытий в виде сферических оболочек должны обеспечивать реализацию всех

выше изложенных принципов и подходов уже на стадии геометрической разрезки сферы. Предлагаемые геометрические схемы членения сферической оболочки разработаны путем использования в качестве исходной основы секторов 120° и 60° . Каждая разновидность разрезки, как геометрическая основа, имеет свои архитектурные, технологические и конструктивные возможности и будет оптимальна только для определенного вида куполов или оболочек. Отсюда следует, что должны быть предложены и рассчитаны параметры нескольких типов разрезов, чтобы в конкретной проектной ситуации можно было выбирать тот вариант, который был бы оптимален для конкретного проектируемого здания или сооружения.

В работе предложены и исследованы несколько конструктивно-технологических методов образования треугольных сетей на сфере с шестиугольными монтажными панелями, которые названы системой «Транеран» [4,13, 96].

Суть предложенных вариантов разрезов «Транеран» заключается в том, что сборная сферическая оболочка составляется из монтажных шестиугольных панелей, разнотипные марки которых одинаковым образом, полностью или частично, расположены в пределах секторов, имеющих общую вершину сферы на панели, выполненной в виде правильного шестиугольника. Шестиугольные панели выполнены с углами, описанными окружностями со своими радиусами из центров панелей, которые лежат на сфере, углы трех смежных панелей соединены и расположены в точке пересечения соответствующих трех окружностей, где располагаются узловые элементы.

В первом варианте для секторов, составляющих 120° (рис. 2.14), сборная сферическая оболочка также содержит шестиугольные панели, разнотипные марки которых одинаковым образом расположены в пределах секторов, имеющих общую вершину на панели, выполненной в виде правильного шестиугольника. Неправильные шестиугольные панели имеют убывающие размеры от вершины секторов к периферии, образуют одинаковые ряды

разнотипных марок, повернутые в пределах каждого сектора на одинаковый угол относительно оси, проходящей через центр сферы и перпендикулярной плоскости симметрии сектора. Шестиугольные панели, частично расположенные в пределах секторов 120° , выполнены с центрами на осях секторов и в виде правильных шестиугольников одного радиуса, а панели, в виде неправильных шестиугольников, полностью расположенные в пределах секторов, могут иметь равные радиусы-ребра и длины сторон-ребер.

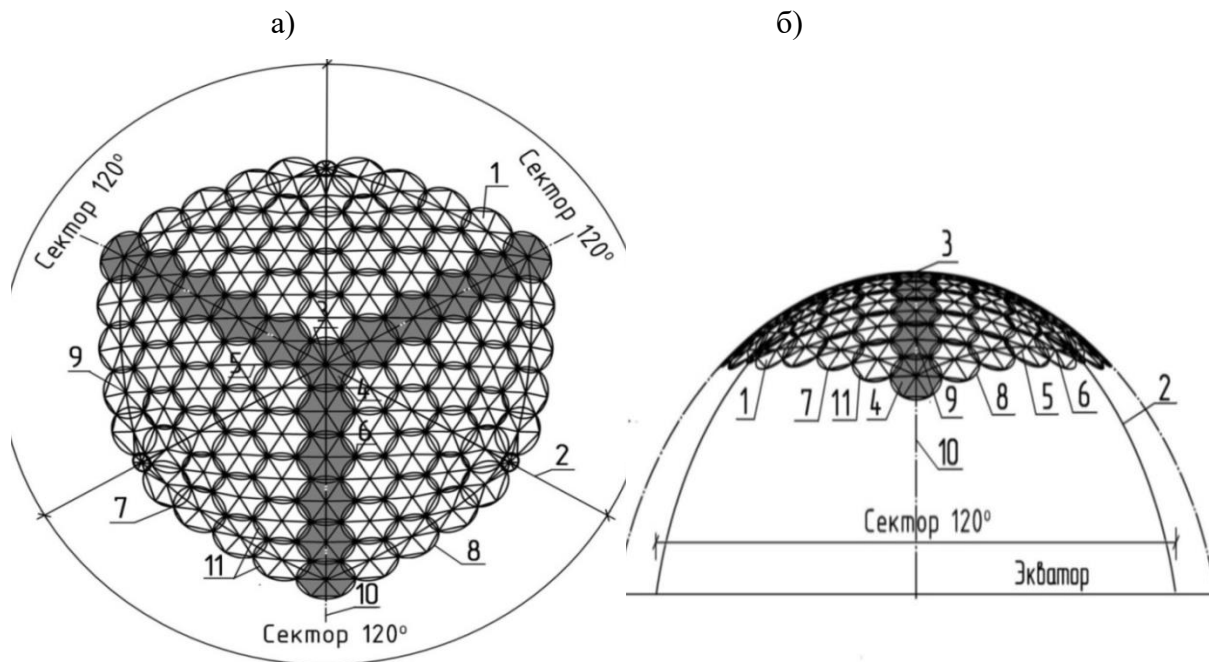


Рис. 2.14. Купол в виде сферы с тремя секторами в плане, составляющих 120° , образованной шестью рядами правильных шестиугольных панелей и состоящий из стержней 16-ти типоразмеров: а - вид сверху сборной сферической оболочки; б - вид сбоку оболочки; 1 - шестиугольные панели; 2 – границы сектора; 3 - общая вершина сферы; 4- правильные шестиугольные панели; 5 - радиусы-ребра панелей; 6 - узловые элементы; 7 - углы трех смежных панелей; 8 - окружности соответствующих радиусов; 9 – центры окружностей; 10 - оси сектора; 11 - стороны-ребра сферы.

С учетом ограничений, которые дают разрезки на основе секторов 120° , получаем оптимальную по критерию минимума типоразмеров разрезку на сфере с шестью рядами окружностей (рис. 2.14), состоящую из одной правильной шестиугольной панели и семи неправильных шестиугольных монтажных панелей (для стержней - всего 24 типоразмера). Координаты купола

с диаметром сферы 40 м наиболее эффективной разрезки для секторов 120° (рис. 2.14 а, б) показаны в работе [4].

Для второго варианта решений в пределах секторов, составляющих 60° шестиугольные панели образованы по такому принципу, что и в первом варианте, но на осях секторов, составляющих углы 60° расположены шестиугольные панели в виде правильных шестиугольников, которые чередуются с панелями в виде неправильных шестиугольников, при этом на осях секторов лежат стороны-ребра этих неправильных панелей (рис. 2.15). Панели в виде правильных и в виде неправильных шестиугольников также выполнены с центрами на дополнительных осях, перпендикулярных осям секторов.

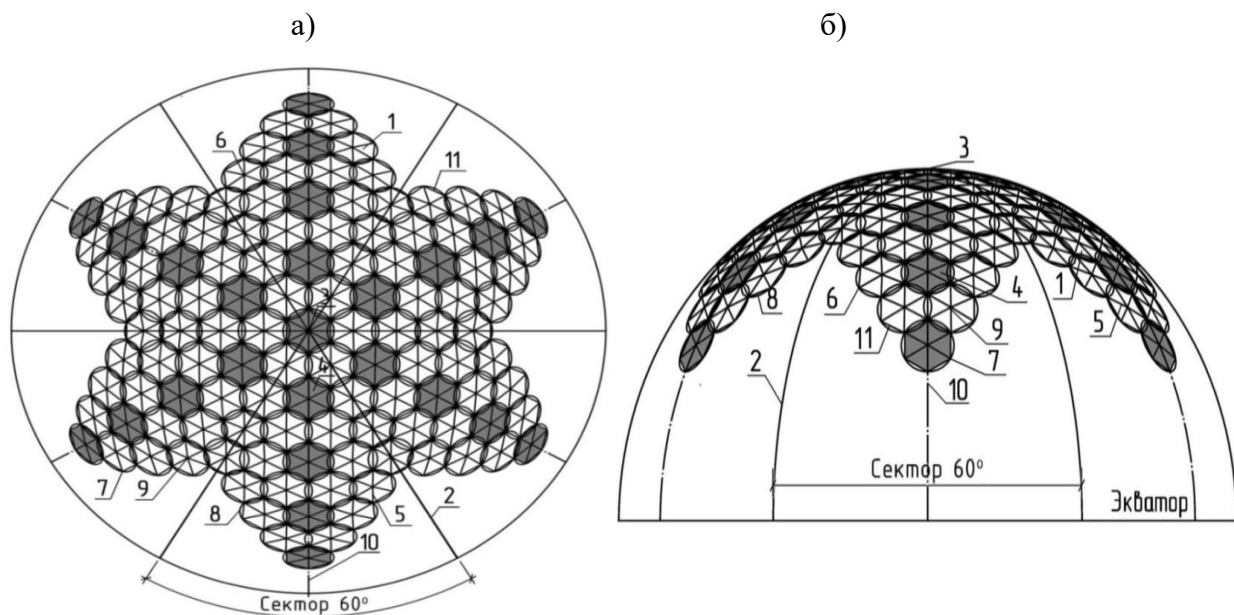


Рис. 2.15. Сферическая оболочка с шестью секторами в плане, составляющих 60° , образованная шестью рядами правильных шестиугольных панелей: а - вид сверху сборной сферической оболочки; на фиг. 4 - вид сбоку сборной сферической оболочки, 1 - шестиугольные панели; 2 – границы секторов; 3 - общая вершина сферы; 4- правильные шестиугольные панели; 5 - радиусы-ребра панелей; 6 - узловые элементы; 7 - углы трех смежных панелей; 8 - окружности соответствующих радиусов; 9 – центры окружностей; 10 - оси сектора; 11 - стороны-ребра сферы.

На рис. 2.15 а изображен вид сверху сборной сферической оболочки с шестью секторами в плане, составляющих 60° ; на рис. 2.15 б - вид сбоку этой

сборной сферической оболочки. Плоские или пирамидальные шестиугольники рядом с осями секторов можно разместить по всей сфере до точки «надир»; между осями будут небольшие разрывы, которые можно использовать как проемы входов и т.п.

Для наглядности на рисунке 2.16 показан вариант конструктивно-технологического формирования купола пролетом 56 м и высотой 12 м. Выделены разными цветами монтажные панели разных радиусов. Зелёным цветом показаны правильные шестиугольные панели. Сначала производится сборка неполной панели (рис. 2.16 б) с контурными узловыми элементами «через один» на укрупнительном стенде. Порядок монтажа панелей также показан на рисунке 2.16 а треугольными призмами одного цвета.

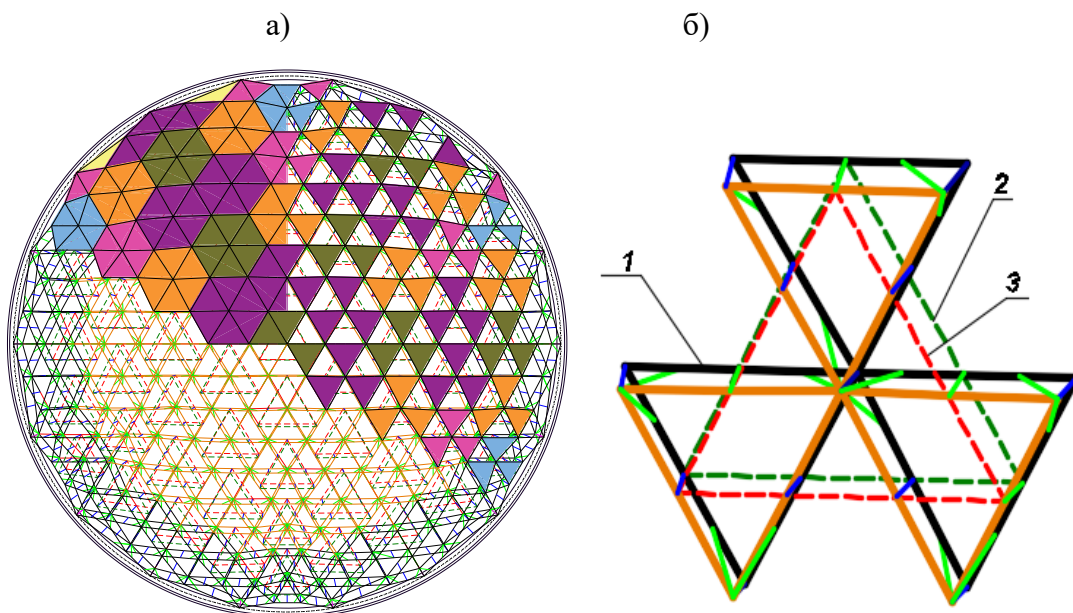


Рис. 2.16. Конструктивно-технологическое решение, обеспеченное эффективной разрезкой сетчатого купола из двухпоясных панелей: а – схема разбивки на панели; б – монтажная панель в виде неполной шестиугольной пирамиды; 1 – ферма каркаса; 2 – верхняя связь; 3 – нижняя связь.

Для геометрического расчета с заданными параметрами пролета и стрелы подъема воспользуемся зависимостями сферической тригонометрии и предложенными упрощениями. В свою очередь, для разработки алгоритма геометрического расчета разрезов предлагаемых конструктивно-

технологических систем, воспользуемся также повторяемостью параметров сети на любом совместимом сферическом секторе и сегментах. При решении указанной проблемы также можно использовать автоматизированные средства в системе AvtoCAD, дополненной специальными элементами (см. этапы листинга 2.1. прилож. 2). углами на вершине 60° и с разрезкой из шестиугольных панелей.

Также разработан алгоритм расчета геометрических параметров для сети (рис. 2.14 и 2.15), образованной только шестиугольными панелями с 6-ю секторами $(30+30)^\circ$. Построение опорной сети и окружностей больших кругов для вписания шестиугольников на сфере (рис. 2.17) соответствует распределению окружностей сектора на рисунке 2.18.

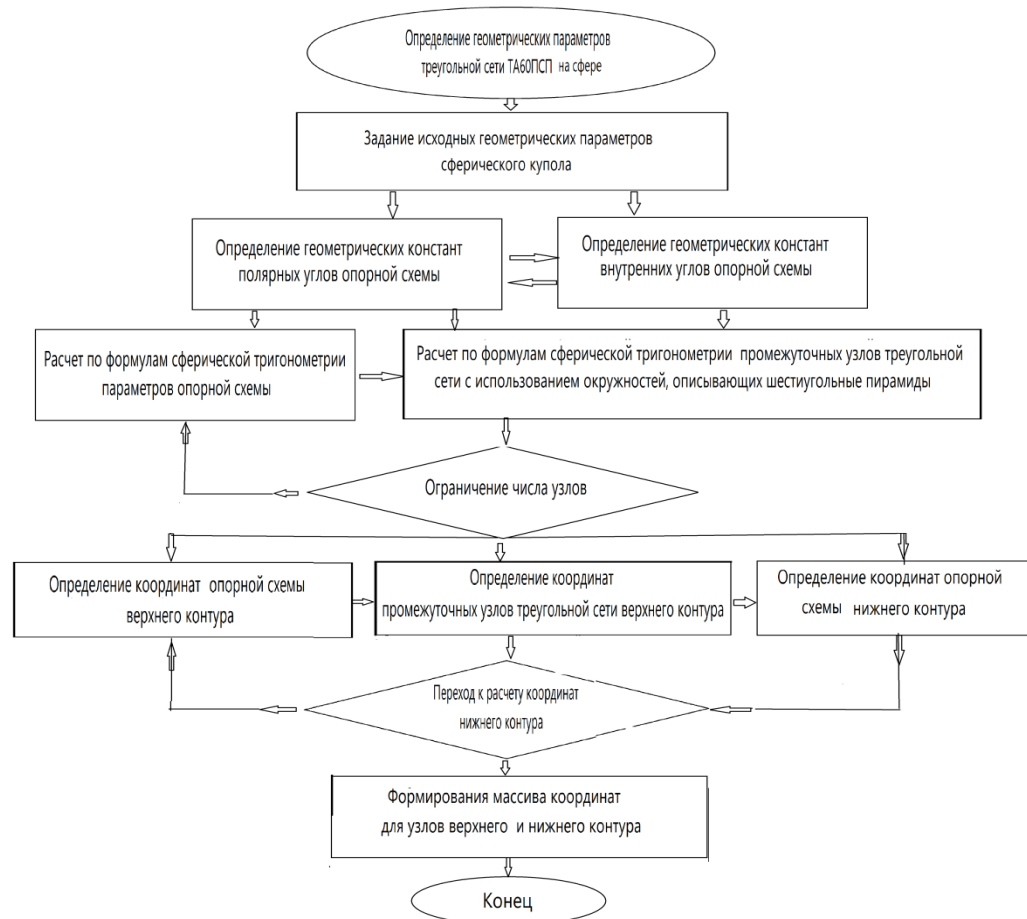


Рис. 2.17. Блок-схема расчета параметров купола на основе сектора 60° .

Здесь опорная сеть для окружностей в секторах, не что иное, как разбиение, получаемое для сектора с вершиной 60° на рисунке 2.2. Эта

опорная сеть детально показана также на рис. 2.18, а программа 2.1 расчета координат в системе Excel (Rus Excel.zip) приведена в приложении 2.

С учетом ограничений, которые дают разрезы на основе секторов 60° , получаем оптимальную по критерию минимума типоразмеров разрезку на сфере для заданных параметров купола с пяти рядов окружностей (смотрите рис. 2.15, 2.16, 2.18), состоящую из шести разных монтажных панелей: из одной правильной шестиугольной панели и пяти неправильных шестиугольных панелей (для стержней - всего 16 типоразмеров, с элементами входов 21 типоразмер). На основании этого алгоритма формируются таблицы координат, длин элементов и углов наклона элементов в узлах в системе XL [4].

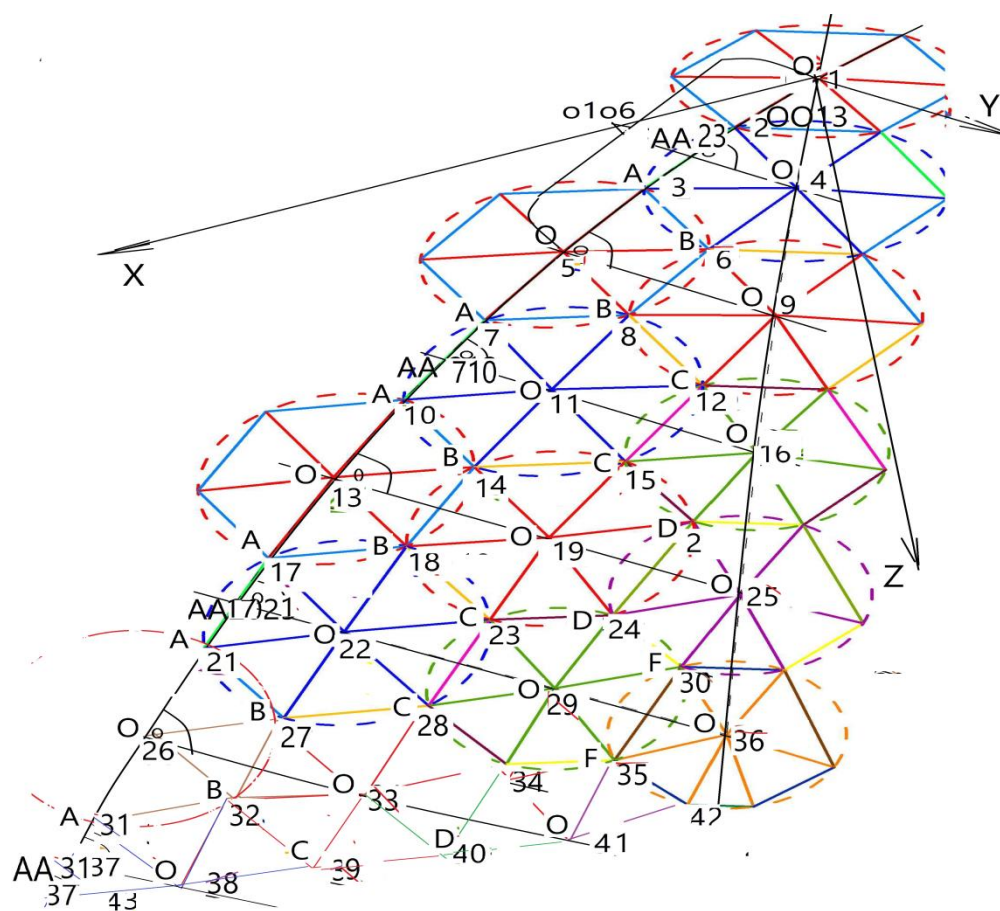


Рис. 2.18. Схема для расчета геометрии половины сектора с углом 60° на вершине.

Опорный контур этой сборной оболочки выполняется по аркам, расположенным по главным окружностям сферы, либо разомкнутым, в виде

отдельных опор с тремя разными отметками и с использованием под входы нестандартных панелей малого радиуса (рис. 2.15), выполненных также по окружностям параллельным сферическим главным окружностям сферы, которые обозначены условно, как оси секторов.

Длины ребер разрезки купола в виде секторов 60 градусов (рис. 2.18) показаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Длины ребер купола вместе с длинами элементов входов для диаметра сферы 45 м

№ эл.та по рис. 6	Длина (м)	№ типа	№ эл-та по рис. 6	Длина (м)	№ типа	№ эл- та по рис. 6	Длина (м)	№ типа	№ эл-та по рис.6	Длина (м)	№ типа
1	2		3	4		5	6	7		8	
1	2.4843	1	82	2.0545	10	58	2.0581	11	298	2.8058	17
2	2.2876	2	84	1.6051	12	188	2.0581	15	299	4.4386	20
16	2.2905	3	48	1.9466	7	190	2.5815	14	300	5.4929	19
35	2.3754	4	89	1.0229	13	198	1.8664	16	302	3.8308	21
38	2.3977	5	53	2.7166	8	200	1.6051	12			
80	1.7153	6	56	1.9466	9	294	2.6721	18			

2.4. ПОБОЧНЫЕ ЭФФЕКТИВНЫЕ ФОРМЫ СЕТЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ СБОРНЫХ ПЛОСКИХ ШЕСТИУГОЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ

2.4.1. Составные сетчатые сферические оболочки в виде сборных шестиугольных модулей с доборными элементами.

Из предложенных разрезов в виде секторов 60° можно сформировать части, которые могли бы стыковаться и образовывать регулярные шестиугольные в плане плиты (модули) пролетами до 40-50 м (по типу плит системы «Кисловодск»). Эти части в проекции на плоскости должны иметь сопрягаемые углы 60° или 120°, т.е. представлять правильные треугольники или правильные шестиугольники (рис. 2.18). Для верхнего пояса наиболее выгодной, исходя из критерия минимума типоразмеров, может быть по классификации данной работы только схема ТА60, приведенная в патенте [137], или так называемая схема «Транеран» [4,16]. Для нижнего пояса выбрана треугольная сеть, которая совпадает по построению с опорными сетями для

секторов на рисунке 2.2. Эта разрезка после выравнивания по контуру опорных узлов, образует в плане правильный шестиугольник. По сути, использован фрагмент разрезки пространственного стержневого купола по классификации [4,14,16] ТА60ПС. После анализа схем разрезов была предложена схема модуля, набор стыковочных и доборных элементов для формирования составного покрытия (рис. 2.19).

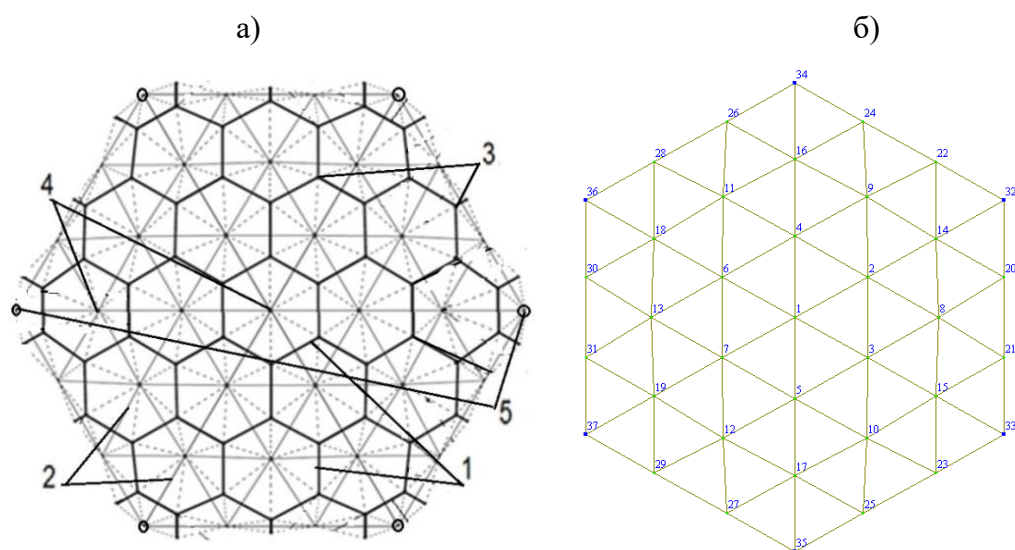


Рис. 2.19. Схема типовых секций сборной сферической оболочки пролетом 18 м (9м между опорами) из 6 секторов с углами на вершине 60° с разрезкой из шестиугольных панелей: а – двухсетчатой, 1- стержни верхнего пояса, 2 - стержни нижнего пояса, 3- узлы верхнего пояса, 4 - узлы нижнего пояса, 5 - опорные узлы; б - односетчатой.

При решении проблемы геометрического расчета структур можно использовать автоматизированные средства в системах Excel (Rus Excel.zip), AutoCAD и LIRA 9.4, дополненные специальными программными элементами (программа 2.1. приложение 2).

С учетом ограничений, которые дают разрезки на основе секторов 60° , выбираем оптимальную по критерию минимума типоразмеров двух уровневую разрезку на сфере для заданных параметров купола из 3-х рядов окружностей (см. рис. 2.15, 2.18 а, 2.19 а), состоящую из пяти разных монтажных панелей: из одной правильной, трех неправильных шестиугольных панелей, из одной

неплоской панели на стыке для верхнего пояса, а также из треугольных панелей трех типоразмеров нижнего пояса (рис. 2.19 б, 2.20 б).

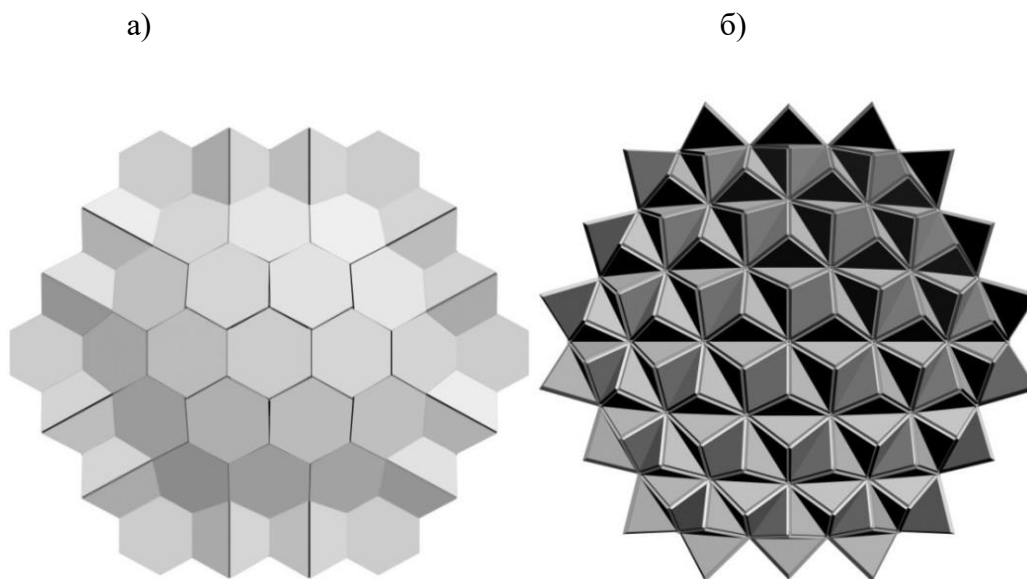


Рис. 2.20. Пространственный модуль составной сборной сферической оболочки из пролетом 18 м (9 м между опорами) : а – вид на верхний пояс из плоских шестиугольных панелей со стыковочными панелями; б - вид на нижний пояс из треугольных панелей.

При выборе геометрических параметров структур, выполнена комплексная оптимизация высоты (стрелы) подъема структур, высоты конструкций, жесткости опорных стоек по критерию массы несущей системы (рис. 2.21). Изменения стрелы подъема характеризует шаг опорной сети в градусах (10; 12; 15). Изменения жесткости относительные: абсолютная жесткость опор условно принята равной 100, а другие градации 12 и 6,5. Оптимизация конструктивного решения модульной системы проведена также и по критерию жесткости опор. Рассматривались также варианты различных эксцентриситетов и даже сдвижки опор во внешние стороны и т.д. (см. рис. 3.49, 5.9). При изменениях высоты конструкции, стрелы подъема и заданных жесткостях определена численными методами минимальная масса двухпоясной структурной конструкции. Для задаваемых высот конструкции и жесткостей проведена оптимизация стрелы подъема также по критерию минимума массы конструкции. Данные зависимости приведены на графиках рисунке 2.22.

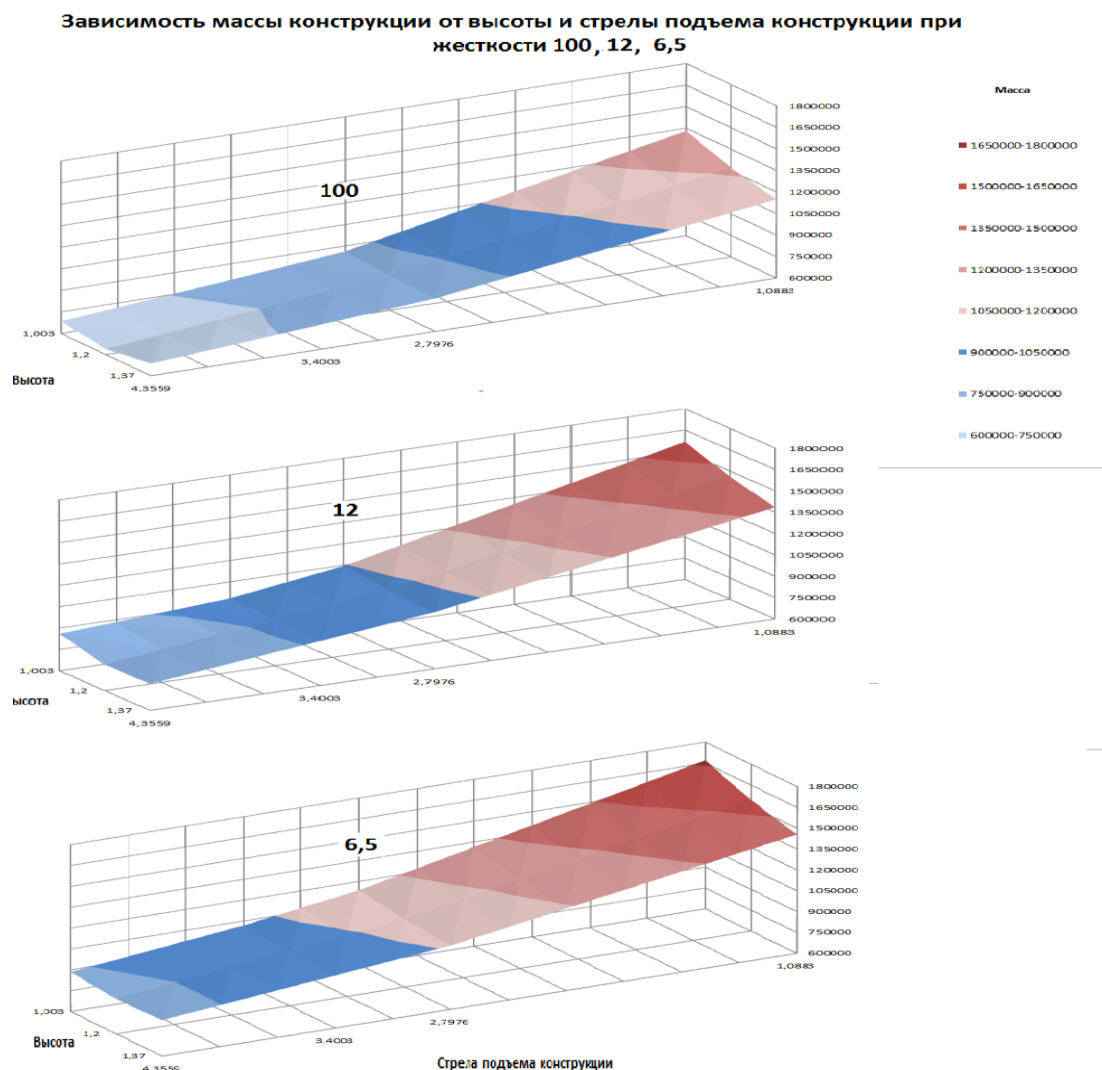


Рис.2.21. Зависимости массы структур разных высот и стрелы подъема для секций сборной сферической оболочки пролетом 18 м из 6 секторов с углами на вершине 60° с разрезкой из шестиугольных панелей: 100 – двухсетчатой с абсолютно жестким опиранием; 12 - двухсетчатой с опиранием проектной жесткости; 6,5 - двухсетчатой с опиранием минимальной жесткости.

Таким образом для принятия обоснованных конструктивно-технологических решений определена оптимальная геометрия в целом модуля, затем оптимизированы отдельные его геометрические, технические и эксплуатационные параметры, далее был проведен анализ и разработка специфических узловых соединений. Полученные результаты позволили обоснованно предложить вариант конструктивно-технологического решения [16].

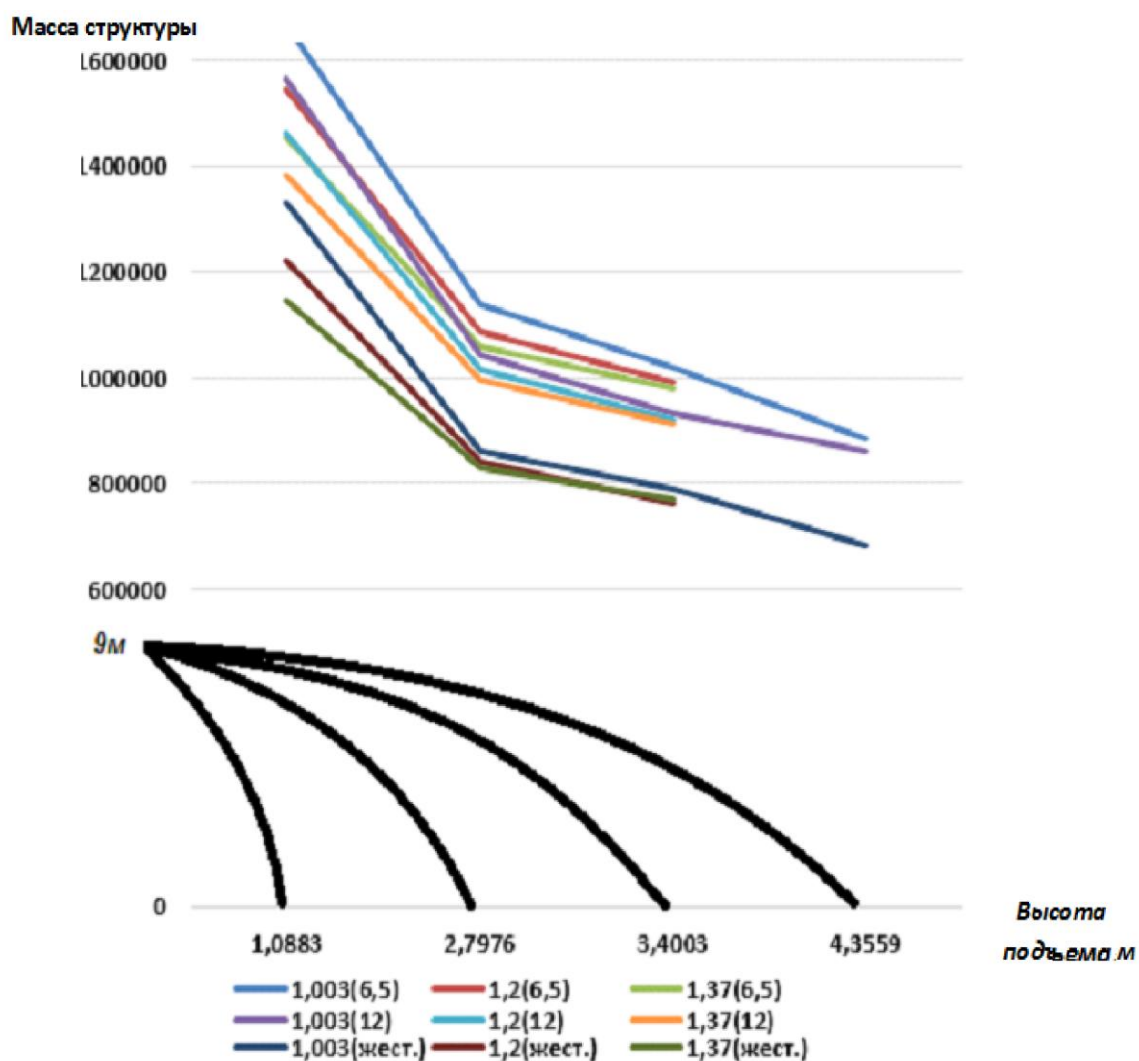


Рис. 2.22. Зависимости массы структур разных высот и жесткостей опор от стрелы (высоты) подъема секций сборной сферической оболочки пролетом 18 м (9м между опорами) из 6 секторов с углами на вершине 60° с разрезкой из шестиугольных панелей.

Опорный контур этой сборной оболочки выполняется разомкнутым, в виде отдельных опор по стойкам, выполненным по пересечениям вертикальных окружностей. На стыках структур имеются горизонтальные стержни, чтобы обеспечить связки, необходимые для компоновки типовых секций (рис. 2.19 а). По принятому варианту опоры структурных покрытий могут свободно перемещаться на отдельных оголовках стоек, до окончательного закрепления. По типу известных структурных покрытий системы «Кисловодск» внешние опорные шары предложенных структур могут сдвигаться на оголовках до - 50 мм (см. рис. 3.49).

При разбивке верхнего пояса панелями на этих стыках структур появляются неплоские (ломанные) панели (рис. 2.20 а), без этих панелей невозможно обеспечить необходимые для компоновки типовых секций углы. Однако это придает большую жёсткость конструкции на стыке.

2.4.2. Конструкционно-технологическое формообразование оболочек из сборных плоских шестиугольных и треугольных панелей, размещенных в секторах при экваторах составных сфер.

В данной работе исследованы теоретические предпосылки размещения панелей в виде правильных шестиугольников с треугольными панелями между ними на составных сферических оболочках. Известно, что при радиально-кольцевой основе одной сферы можно разместить только чуть больше 50% правильных шестиугольников с треугольниками между ними, остальные плоские шестиугольники можно выполнить только неправильными [5, 17,19]. Однако если из каждой сферы с одинаковым радиальным раскроем, но с разными радиусами можно вырезать ряды с правильными шестиугольниками и совместить по кольцевым линиям, то получится составная оболочка вращения.

В составной сборной оболочке из панелей, эти панели могут быть выполнены в виде плоских правильных шестиугольников, между которыми установлены треугольные панели (приоритет от 07.06.2017 № 2017119859). Шестиугольные и треугольные панели с разными размерами в каждом ряду, расположенные в одном порядке образуют поверхности вращения положительной гауссовой кривизны (рис.2.23 а и б), а в другом порядке отрицательной гауссовой кривизны (рис.2.24).

Составная сборная оболочка положительной гауссовой кривизны (рис. 2.23) выполнена в виде сборной конструкции их шестиугольных панелей 1 с узловыми элементами 2, с каркасом из бортовых 3 и внутренних 4 ребер и с обшивкой 5. Панели 1 выполнены в виде несущих каркасных плоских правильных шестиугольников 1, между которыми установлены треугольные

панели 6, шестиугольные 1 и треугольные 6 панели с разными размерами в каждом ряду, расположенные в одном порядке панели 7 образуют поверхности вращения положительной гауссовой кривизны.

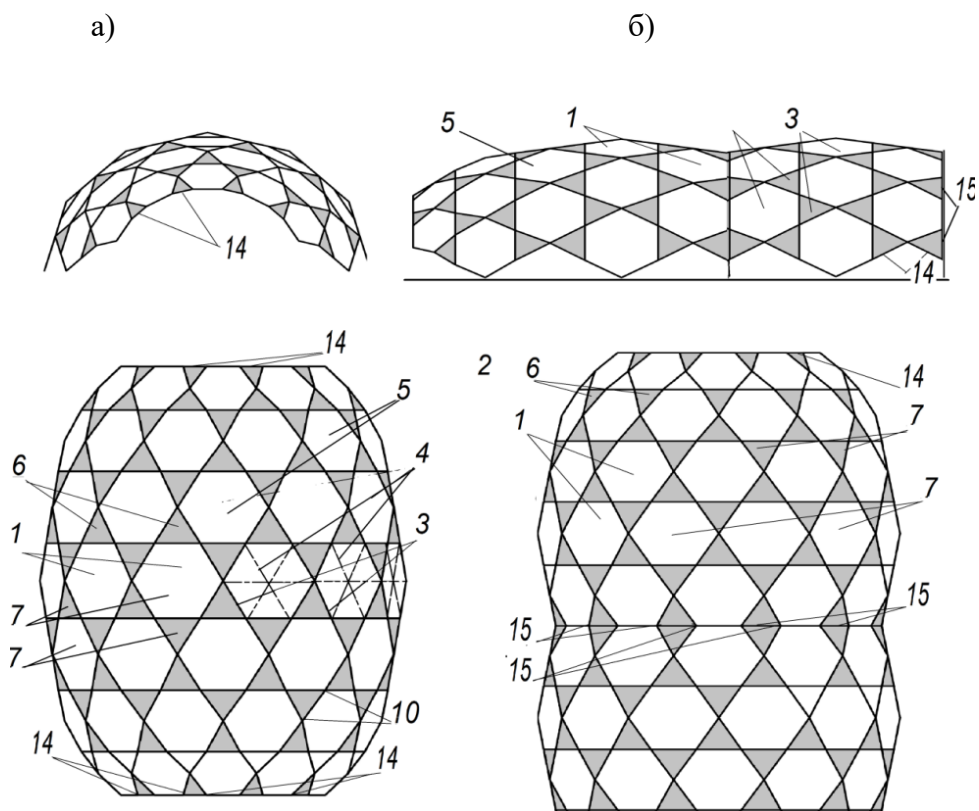


Рис. 2.23. Виды сбоку и сверху сборных оболочек положительной гауссовой кривизны: а - одинарной, б - составной.

Составная сборная оболочка отрицательной гауссовой кривизны (рис. 2.24 а) также выполнена в виде сборной конструкции их шестиугольных панелей 1 с узловыми элементами 2, с каркасом из бортовых 3 и внутренних 4 ребер и с обшивкой 5 с тем отличием, что расположенные в другом порядке панели 8 образуют поверхности отрицательной гауссовой кривизны.

Для сборки этих составных оболочек к узлам 2 (рис. 2.23, 2.24) панелей крепятся узловые фасонки контурных стержней 14, к которым прикреплены парные проушины под углом около 45 градусов к плоскости панели 1, для соединения смежных монтажных элементов 1 и 14 между собой в одном из узлов стержня 14 между проушинами 11 установлены и закреплены с возможностью поворота болтами 12 узловые вкладыши 13.

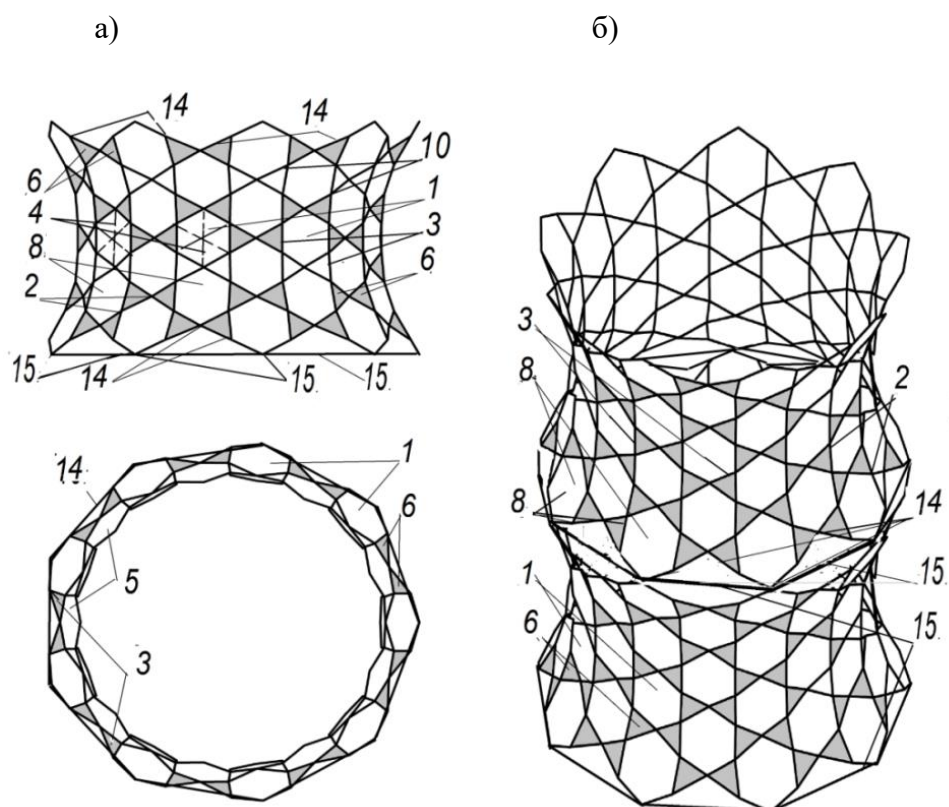


Рис. 2.24. Виды сбоку и сверху (а) сборных оболочек отрицательной гауссовой кривизны и общий вид (б).

Для стыковки составных оболочек, собираемых из одинарных оболочек к узлам 2 (рис. 2.24, 2.25 в) панелей крепятся стыковочные стержни 15 с узловыми фасонками 10 с обеих сторон этих стыковочных стержней. Узел с вкладышем позволяет осуществлять поворот панелей в разных плоскостях до 15° и позволяет преодолеть угловые несовершенства при изготовлении укрупненными панелями и их монтаже.

Проанализируем какую поверхность образуют окружности или соответствующие им правильные шестиугольники, соединенные через треугольники. Применение таких окружностей минимальных радиусов обеспечивает минимальные длины стержней и равномерную передачу усилий в стержнях, за счет минимизации размеров монтажных элементов (и за счет изменений направлений преимущественно сжатых элементов купола).

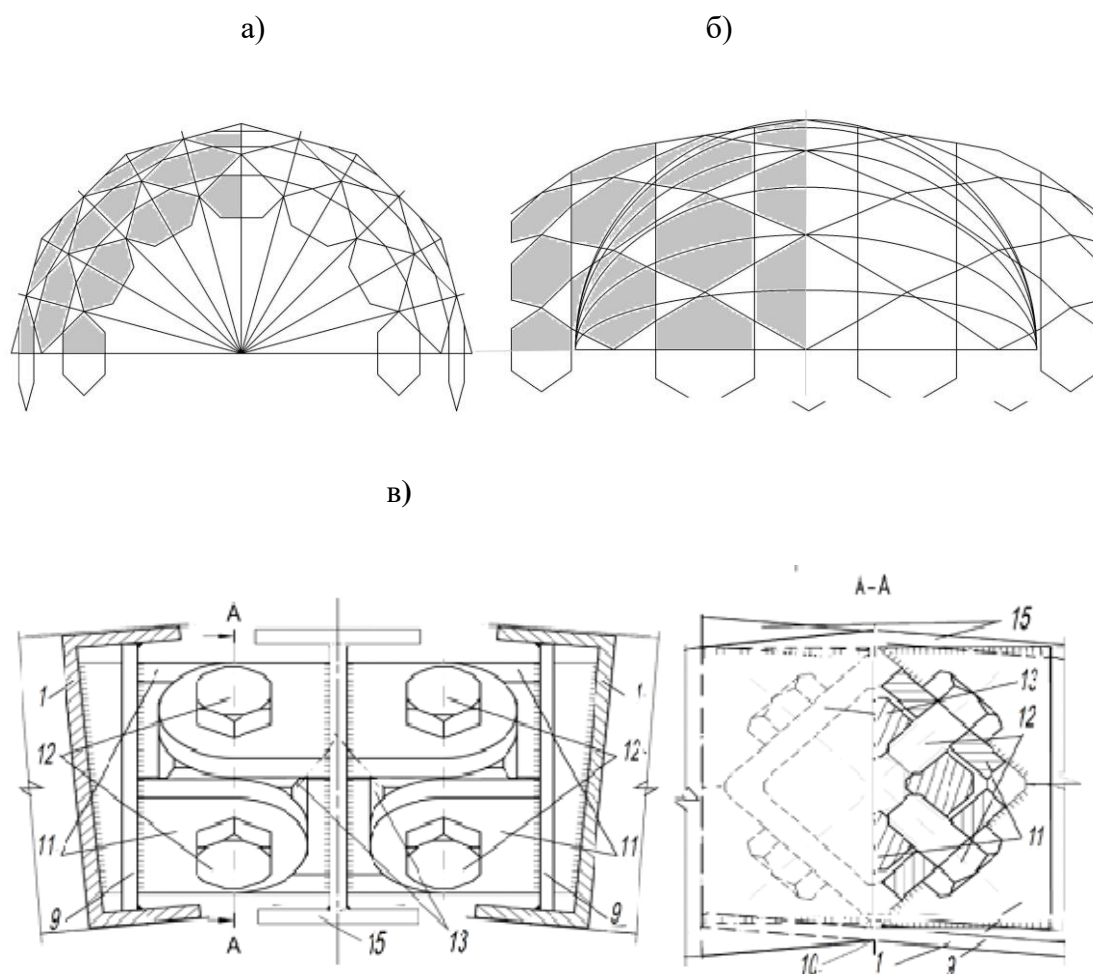


Рис. 2.25. Сетчатая оболочка, полученная из правильных шестиугольников неравных радиусов на поверхности вращения из секторов $r_1-90-90^\circ$: а и б – виды схемы разрезки; в – соединение каркасных панелей и стыковых элементов.

Для построения разрезки составной оболочки из плоских правильных шестиугольников и треугольников, воспользуемся уже разработанными построениями правильных шестиугольников через ряд (рис.2.1). На первом этапе определим центры шестиугольников, вписанных в окружности минимальных радиусов, регулярно расположенных относительно экватора сферы. В этом случае, эти окружности только касаются друг друга в одной точке по правой оси-меридиану (см. рис. 2.25, а, б).

Кроме поверхности положительной кривизны из плоских правильных шестиугольников сформируем поверхность отрицательной гауссовой кривизны [3], принимая во внимание возможность образования на сфере) второго ряда

большого радиуса, чем первый при размещении шестиугольников в другом порядке (рис. 2.27).

Задача 2 размещения на сфере правильных шестиугольников, вписанных в окружности, т.е. фигур плоских или составленных в свою очередь из сферических треугольников (рис. 2.27) с минимальными размерами ребер, имеет эффективное решение в виде сети, образованной на основе окружностей минимальных радиусов, т.е. окружностей на сфере, полученных при касании двух смежных окружностей, центры которых находятся на наименьшем расстоянии друг от друга [19, 131, 211]. Однако, иногда имеется возможность размещения сразу двух равномерно чередующихся рядов правильных шестиугольников, начиная от экватора (рис. 2.27).

Размещение правильных шестиугольников, вписанных в окружности, проведем на примере разрезки, показанной на рисунке 2.28 а и ее фрагменте, показанном на рис. 2.27 б.

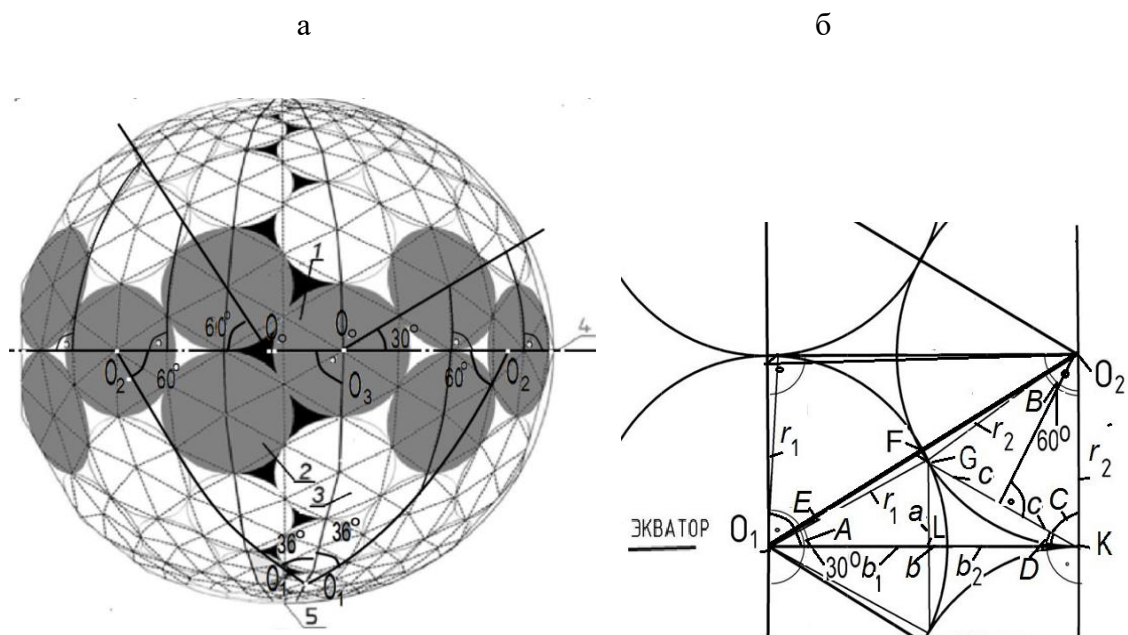


Рис. 2.27. Геометрическая сеть на сфере из шестиугольников, вписанных в окружности, на основе сферических совместимых треугольников (сегментов) $b-90-90^\circ$: а – вид сбоку; 1 – шестиугольники (правильные шестиугольники – серым цветом) первого и второго ряда у внутренних углов 90 градусов; 3 – тоже третьего ряда, соответственно; 4 – линия экватора; 5 – точка зенита б – схема для определения положения центра O_2 ; O_0 – вершины возможных секторов; 60° – углы сферических сегментов.

Для решения поставленной задачи (рис. 2.27 б) рассмотрим сферический прямоугольный треугольник O_1KO_2 , а также сферические треугольники O_1GK и O_2GK со сторонами-дугами, равными, соответственно, радиусам r_1 и r_2 . Имеется прямоугольный сферический треугольник с внутренними углами 90 и 60 градусов и катетом-дугой, равном a . Требуется определить величины радиусов r_1 и r_2 между центрами O_1 и O_2 окружностей и, таким образом, установить положение всех центров окружностей первых двух рядов шестиугольников. Для определения центров правильных шестиугольников неравных радиусов первых двух рядов введем некоторые дополнительные требования к расположению их окружностей. Задаем, чтобы окружности пересекались друг друга в двух точках и, тогда в них, соответственно, могли бы вписываться правильные шестиугольники.

Предварительно определим параметры в данном сферическом треугольнике O_1KO_2 . По условию внутренние углы треугольника $A = 30^\circ$, $B = 60^\circ$, $O_1G = r_1$, $GO_2 = r_2$, $O_1K = b = b_1 + b_2$;

где r_1 и r_2 – радиусы окружностей, описывающих шестиугольники первого и второго ряда, в виде полярного угла; b_1 и b_2 – катеты прямоугольных сферических треугольников в виде полярных углов; a и $2c$ – стороны шестиугольников в виде полярных углов; A , B , а также и C и D – соответственно, внутренние углы на сфере для сферических шестиугольников, вписанных в окружности.

Используя известные выражения Непера [63, 206] для сторон и углов прямоугольных сферических треугольников O_1GL и KGL , получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = 90^\circ - D, \\ \sin 30^\circ \sin r_2 = \sin c, \\ \cos C = \frac{\operatorname{tg} c}{\operatorname{tg} r_2} \end{array} \right. \quad (2.23)$$

$$\sin 2c \sin D = \sin b,$$

$$\sin 30^\circ \sin r_1 = \sin b.$$

Из треугольников O_1GK и O_2GK найдем связи величины b и искомых радиусов r_1 и r_2

$$\begin{aligned} \cos r_1 \cos b + \sin r_1 \sin b \cos 30^\circ = \cos^2 r_2 + \\ + \sin^2 r_2 \cos 60^\circ. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Проведем преобразования системы уравнений, используя формулы (2.23, 2.24) сферической тригонометрии [206],

$$\begin{aligned} 0,5 \sin r_2 &= \sin c, \\ \sin D &= \frac{\operatorname{tg} c}{\operatorname{tg} r_2}; \\ \sin 2c \frac{\operatorname{tg} c}{\operatorname{tg} r_2} &= \sin 30^\circ \sin r_1; \\ \text{Откуда} \quad 2 \operatorname{tg} c \sin 2c &= \sin r_1 \operatorname{tg} r_2; \\ 4 \sin^2 c &= \sin r_1 \operatorname{tg} r_2; \\ \operatorname{ctg} r_2 \sin^2 r_2 &= \sin r_1; \\ \sin r_2 \cos r_2 &= \sin r_1; \end{aligned} \quad (2.25)$$

Подставим в уравнение (2.25) соотношение (2.24)

$$\begin{aligned} &\sqrt{1 - \sin^2 r_2 \cos^2 r_2} \cos b + \sin r_2 \cos r_2 \sin b \cos 30^\circ = \\ &= \cos^2 r_2 + \cos 60^\circ \sin^2 r_2; \\ &\cos b \sqrt{1 - \frac{1}{1+\operatorname{tg}^2 r_2} \frac{1}{1+\operatorname{ctg}^2 r_2}} + \sin b \cos 30^\circ \sqrt{\frac{1}{1+\operatorname{tg}^2 r_2} \frac{1}{1+\operatorname{ctg}^2 r_2}} = \\ &= \frac{1}{1+\operatorname{tg}^2 r_2} + \frac{0,5}{1+\operatorname{ctg}^2 r_2}; \\ &\cos b \sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2 r_2}{(1+\operatorname{tg}^2 r_2)^2}} + \sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2 r_2}{(1+\operatorname{tg}^2 r_2)^2}} \sin b \cos 30^\circ = \\ &= \frac{1}{1+\operatorname{tg}^2 r_2} + \frac{0,5 \operatorname{tg}^2 r_2}{1+\operatorname{tg}^2 r_2}; \\ &\cos b \sqrt{(1 + \operatorname{tg}^2 r_2)^2 - \operatorname{tg}^2 r_2} + \sin b \cos 30^\circ \operatorname{tg} r_2 = \\ &= 1 + 0,5 \operatorname{tg}^2 r_2; \\ &\cos b \sqrt{(1 + \operatorname{tg}^2 r_2)^2 - \operatorname{tg}^2 r_2} = \\ &= 1 + 0,5 \operatorname{tg}^2 r_2 - \sin b \cos 30^\circ \operatorname{tg} r_2; \end{aligned}$$

$$\cos^2 b ((1 + \operatorname{tg}^2 r_2)^2 - \operatorname{tg}^2 r_2) = \\ = (1 - \sin b \cos 30^\circ \operatorname{tg} r_2 + 0,5 \operatorname{tg}^2 r_2)^2;$$

Подставим $x = \operatorname{tg} r_2$

$$\begin{aligned} & \cos^2 b (1 + x^2)^2 - x^2 = \\ & = (1 - \sin b \cos 30^\circ x + 0,5 x^2)^2; \\ & \cos^2 b (1 + 2x^2 + x^4 - x^2) = \\ & = (1 - 2 \sin b \cos 30^\circ x + \sin^2 b \cos^2 30^\circ x^2 + \\ & + (1 - \sin b \cos 30^\circ x) x^2 + 0,25 x^4); \\ & \cos^2 b + \cos^2 b x^2 + \cos^2 b x^4 = \\ & = 1 - 2 \sin b \cos 30^\circ x + \sin^2 b \cos^2 30^\circ x^2 + \\ & + x^2 - \sin b \cos 30^\circ x^3 + 0,25 x^4; \\ & (\cos^2 b - 0,25) x^4 + \sin b \cos 30^\circ x^3 + (\cos^2 b - \sin^2 b \cos^2 30^\circ - \\ & - 1) x^2 + 2 \sin b \cos 30^\circ x + \cos^2 b - 1 = 0. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Принимая $b = 20^\circ$, получаем

$$0.63302222156 x^4 + 0.296198132726 x^3 - 0.20471111227 x^2 + \\ + 0.59239626545 x - 0.1169777784405 = 0. \quad (2.27)$$

$$\operatorname{tg} r_2 = 0,205827433058,$$

Откуда из известного соотношения $r_2 = 11,630615$.

Из треугольника $O_2 GK$, выражая синус дуги, определяем значение

$$\sin c = 0,5 \sin r_2; c = 5,78527776^\circ$$

Все величины в выражении (2.26) определены, за исключением полярного угла радиуса r_1 . Таким образом, радиус r_1 второй окружности вычисляем из уравнения (2.24)

$$\sin r_2 \cos r_2 = \sin r_1.$$

Откуда получим $r_1 = 11,3885808^\circ$.

Для решения уравнения (2.27) использовалось свободно распространяющееся программное обеспечение ScLab 5.4.1 [207].

Из рисунка 2.26 видно, что правильные сферические шестиугольники, вписанные в окружности разных по высоте радиусов и размещенные в двух

первых рядах совместимых сферических треугольников сферы $b-90-90^\circ$ могут быть развернуты по отрицательным направляющим и создают поверхность отрицательной кривизны. Разработанная поверхность отрицательной гауссовой кривизны имеет важное свойство – равную высоту каждого яруса узлов.

Таким образом, разработаны методы конструктивно-технологического формообразования на стадии геометрии разрезов составных сборных сферических оболочек на основе секторов из панелей в виде правильных шестиугольников. Такие несущие конструкции подобной разрезки могут быть применены, как в покрытиях зданий, так и в стеновых ограждающих и несущих пространственных конструкциях различных зданий и сооружений.

2.5. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ СБОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ПЛОСКИХ (ПИРАМИДАЛЬНЫХ) ШЕСТИУГОЛЬНЫХ И ТРЕУГОЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИКОСАЭДРА

В отечественной практике куполостроения наибольшее применение получили геодезические системы куполов, стержни которых являются ребрами многоугольников, вписанных в сферу, использующих разрезы М. С. Туполева и Г. Н. Павлова [27, 130, 179]. При этом во всех конструктивных решениях куполов просматривается тенденция применения уже на стадии разрезки и формообразования этих покрытий эффективных технологических решений изготовления отдельных элементов, стендовой укрупнительной сборки сегментов куполов, возведения их с обеспечением заданной точности монтажа покрытия, в целом, или основных его несущих конструкций. Предлагаемые геометрические схемы членения сферической оболочки разработаны путем использования в качестве исходной основы (рис.2.28). сферического правильного треугольника (так называемого икосаэдрального треугольника Мёбиуса). Многогранники геодезической или кристаллической разрезки имеют оси симметрии (вращения и зеркально поворотные), поэтому для вариантов построения сферических сетей выполнялись разрезки только внутри сегментов граней, составляющих одну шестую часть грани (так называемый сферический

треугольник Шварца) икосаэдра (внутренние углы в градусах 36-90-60). Наложение этих треугольников Шварца на сети с наибольшим числом правильных шестиугольников (рис. 2.1, 2.2, 2.28) показывает, что для крупных членений возможны разрезы, состоящие из одних правильных плоских фигур (пятиугольников и шестиугольников) или с большим их числом. Далее эти разрезы, более эффективные чем у предыдущих авторов, будут показаны в последующих разделах.

В данной работе исследованы несколько конструктивно-технологических методов образования треугольных сетей на сфере с помощью, в основном, икосаэдра [3-19]. Критерием оптимальности является минимальное число типоразмеров конструктивных деталей и минимальное число монтажных элементов купола, возможности укрупнительной сборки и предварительного напряжения.

2.5.1. Конструктивно-технологическое формообразование сборных сферических оболочек из сборных плоских (пирамидальных) шестиугольных и треугольных панелей на основе икосаэдра.

Суть предложенных вариантов разрезов заключается в том, что сборная сферическая оболочка составляется из трех-, пяти-, шестиугольных панелей с углами, лежащими на сфере. Разнотипные марки таких панелей одинаковым образом расположены в пределах каждой треугольной грани правильного 20-гранника – икосаэдра, вписанного в сферу, и имеют на вершинах 20-гранника панели в виде правильных сферических пятиугольников.

В первом варианте разрезов сферической оболочки (рис. 2.28-2.29) внутри сегментов, составляющих одну шестую часть грани правильного 20-тигранника, выполняются сферические (пирамидальные) или плоские шестиугольники-панели с центрами, лежащими на сфере и углами, лежащими на сфере и описанными своими радиусами из соответствующих центров панелей [7, 8, 10, 167, 168, 208-211]. При этом смежные пяти или шестиугольники-панели соединены между собой только в одном узле,

являющимся одной из точек пересечения или касания окружностей, образующих эти сферические многоугольники-панели, а между каждыми смежными тремя такими панелями образуется треугольная панель.

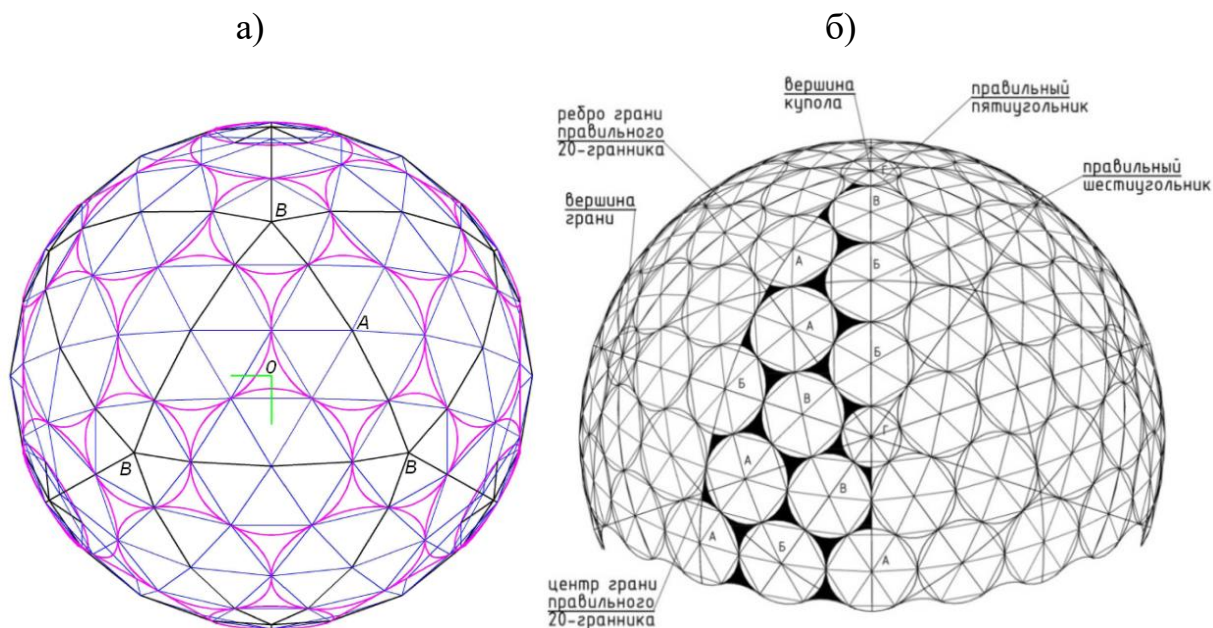


Рис. 2.28 – Схемы сборной сферической оболочки: а - с разрезкой 320-гранника, состоящего из ребер только 4-х типоразмеров или из двух монтажных правильных пятиугольной и шестиугольной панелей и двух треугольных панелей-вставок; б - с разрезкой 1280-гранника, состоящего из ребер только 10-ти типоразмеров или из двух правильных пятиугольной и шестиугольной панелей, двух неправильных шестиугольных панелей и пяти треугольных панелей-вставок.

Панель над центром грани правильного 20-тигранника выполняется в виде правильного треугольника, а над серединой стороны-ребра 20-гранника выполняется либо в виде правильного сферического или плоского шестиугольника, либо здесь, в точке касания окружностей смежных сферических или плоских шестиугольников расположен их узел соединения.

На рисунке 2.28 а изображена сборная сферическая оболочка в виде полного 320-гранника с правильным треугольником-панелью над центром грани О икосаэдра, над серединой стороны-ребра А расположен правильный шестиугольник, на вершине грани оболочки – правильный пятиугольник.

Уже на подоснове в виде 320-гранника, а также у остальных разрезов сферы, полученных одним способом (удвоением числа ребер) видно, что

вершины полученных многогранников немного смещены относительно геодезической сети.

Из множества решений выбрано оптимальное решение разрезки сферы, исходя из критерия минимума типоразмеров элементов и сборных панелей. На рисунке 2.28 б изображена сборная сферическая оболочка в виде части 1280-гранника с правильным треугольником-панелью над центром грани икосаэдра, на вершине грани оболочки – правильный пятиугольник Г (вершина купола).

На рисунках 2.28 а, 2.29 а и 2.31 а показаны разрезки 320-гранника на сфере (эти разрезки начальные базовые с треугольной сетью), состоящего из ребер только 4-х типоразмеров или из двух правильных пятиугольной и шестиугольной панелей и двух треугольных панелей-вставок.

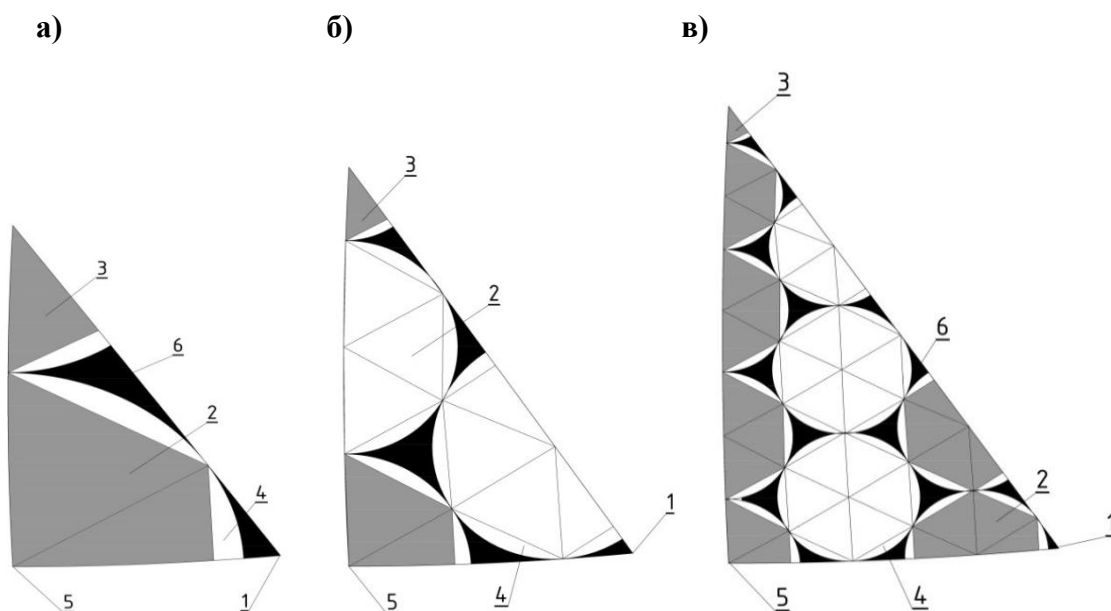


Рис. 2.29. Сегменты сборной сферической оболочки: а – 320-гранника; б – 1280-гранника; в – 5120-гранника; 1 – панели в виде правильного треугольника; 2 – панели в виде плоских шестиугольников; 3 – панели в виде правильного плоского пятиугольника; 4 – панели в виде треугольника; 6 – панели в виде правильных плоских шестиугольников.

На рисунках 2.28 б, 2.29, 2.31 б показана разрезка 1280-гранника на сфере, состоящего только из десяти ребер разной длины; на рисунках 2.29 в и 2.31 в показана разрезка 5120-гранника на сфере. На рисунках 2.30 а, 2.32 а показана разрезка 2000-гранника на сфере, состоящего из ребер только 12-ти

типоразмеров или из двух правильных пятиугольной и шестиугольной панелей двух неправильных шестиугольных панелей и двух треугольных панелей-вставок; на рисунках 2.30 б и 2.32 б показаны разрезка 3920-гранника на сфере.

Применяя каждый способ разбивки, можно поверхность шара расчленить на любое число шестиугольных и треугольных ячеек. Совокупность разрезов, полученных путем применения данного способа разбивки с последующим удвоением, образует семейство или систему разрезов одного вида (например, $320 n^2$: 320, 1280, 5120).

Задача 3. На схемах рисунков 2.28 б и 2.31 б приведено размещение описанных окружностями шестиугольников в сферическом треугольнике (совместимом сегменте сферического икосаэдра) с внутренними углами 36° , 90° и 60° .

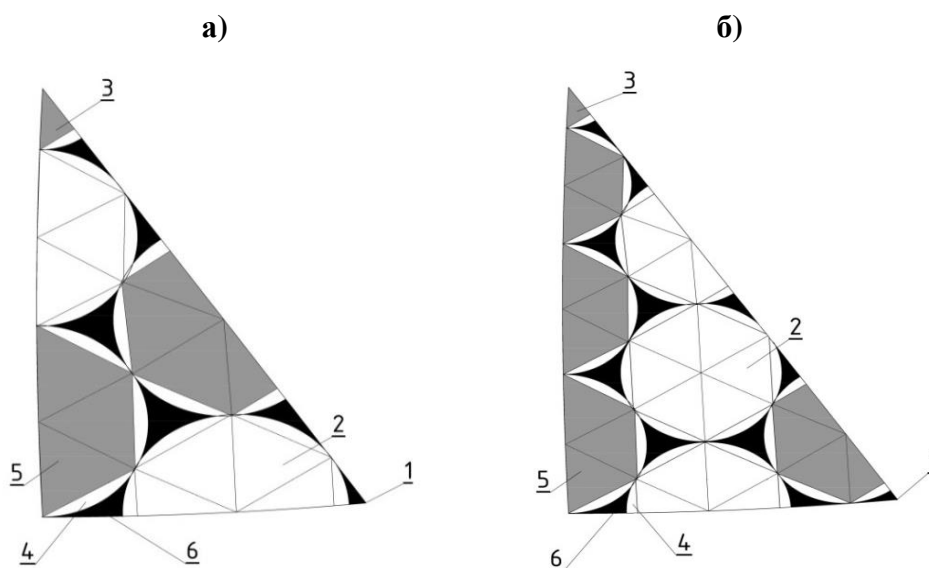


Рис. 2.30. Сегменты сборной сферической оболочки: а – 2000-гранник; б – 3920-гранник; 1 – панели в виде правильного треугольника; 2 – панели в виде плоских шестиугольников; 3 – панели в виде правильного плоского пятиугольника; 4 – панели в виде треугольника; 6 – панели в виде правильных плоских шестиугольников.

При оптимизации треугольной сети с помощью симметрии окружностей и главных линий сферы можно выделить как одну из промежуточных задач – определение положения центров окружностей шестиугольников, (рисунок 2.33: центры первых рядов шестиугольников O_1 , O_2).

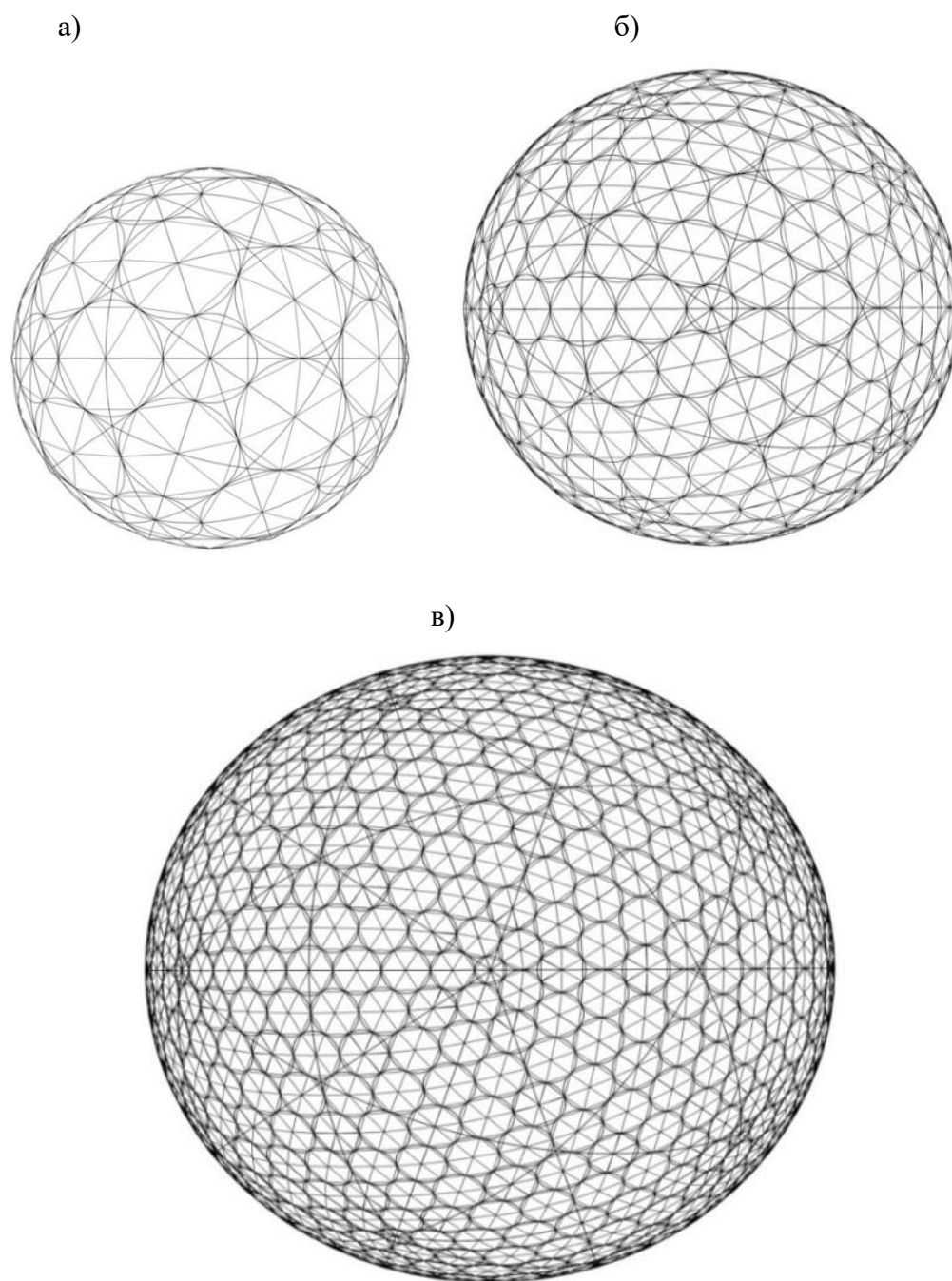


Рис. 2.31 – Схемы разрезов сборной сферической оболочки на основе деления (условно базового) 320-гранника: а – собственно 320-гранник; б–1280-гранник; в – 5120-гранник

Переход от неправильных к правильным шестиугольникам, вписанным в окружности, проведем на примере разрезки в виде 1280-гранника (рис. 2.29 б). Итак, на первом этапе определяем положение центров O_1 , O_2 шестиугольников равных радиусов в сферическом треугольнике (совместимом сегменте сферы с разрезкой 1280-гранника - рисунки 2.29 б и 2.33) у внутреннего угла 60

градусов. Введя обозначения $r = r_1$, $o = \frac{a_1}{2}$, $A = A_1$, и, используя теоремы синусов и косинусов для треугольников, получаем систему уравнений (2.28):

$$\frac{\sin r}{\sin 60^\circ} = \frac{\sin o}{\sin A},$$

$$\cos A = \sin 60^\circ \cos o, \quad (2.28)$$

$$\sin 2r = \frac{\sin(a - o)}{\sin 2A}.$$

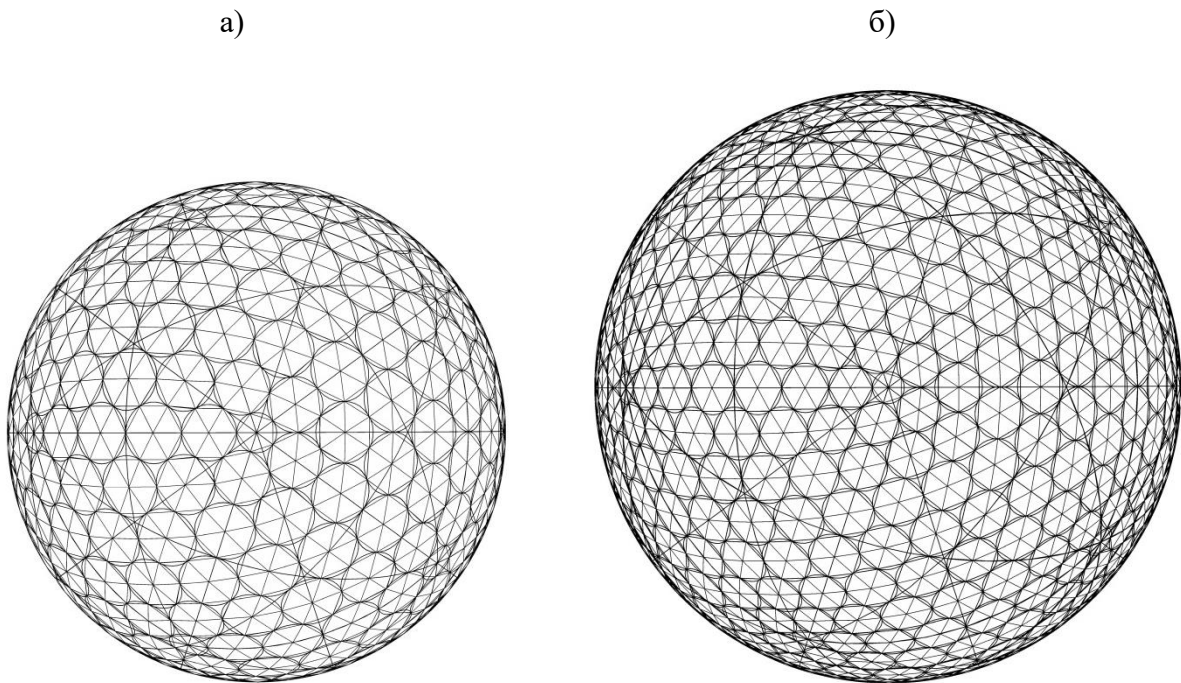


Рис. 2.32. Схемы базовых разрезов сборной сферической оболочки на основе: а – 2000-гранник; б – 3920-гранник

Параметры прямоугольного сферического треугольника (рис.2.33) с катетами r_1 и a_1 определяются из системы уравнений (2.28). Катеты и гипотенузы рассматриваемых сферических треугольников связаны соотношениями

$$\operatorname{tg} r = \operatorname{tg} r_1 \cos A,$$

$$tg\ o = tg\ r_1 \cos 60^\circ, \quad (2.29)$$

$$tg\ r = tg\ r \cos 2A.$$

Таким образом, из уравнений (2.39) можно определить зависимость параметров o и A (рис. 2.33), позволяющую определить центр окружности O_1 .

Проведя некоторые преобразования, имеем

$$tg^2\ r = 1 - \cos 2A,$$

$$tg\ r = \frac{tg\ o \cos A}{\cos 60^\circ}.$$

Отсюда приходим к уравнению

$$1 - \cos 2A = \frac{tg^2\ o \cos^2 A}{\cos^2 60^\circ},$$

которое приводится к виду,

$$3tg^2\ A - 1 = 4tg^2\ o. \quad (2.30)$$

Теперь определим зависимость параметров o и a . Исходя из уравнений (2.29), получаем

$$\sin r = \frac{\sin o \sin 60^\circ}{\sin A},$$

$$\cos r = \frac{\sin(a - o)}{4 \cos A \sin o \sin 60^\circ}.$$

Используя, основное тригонометрическое тождество, исключаем параметр r :

$$\frac{3 \sin^2 o}{4 \sin^2 A} + \frac{\sin^2(a - o)}{12 \cos^2 A \sin^2 o} = 1.$$

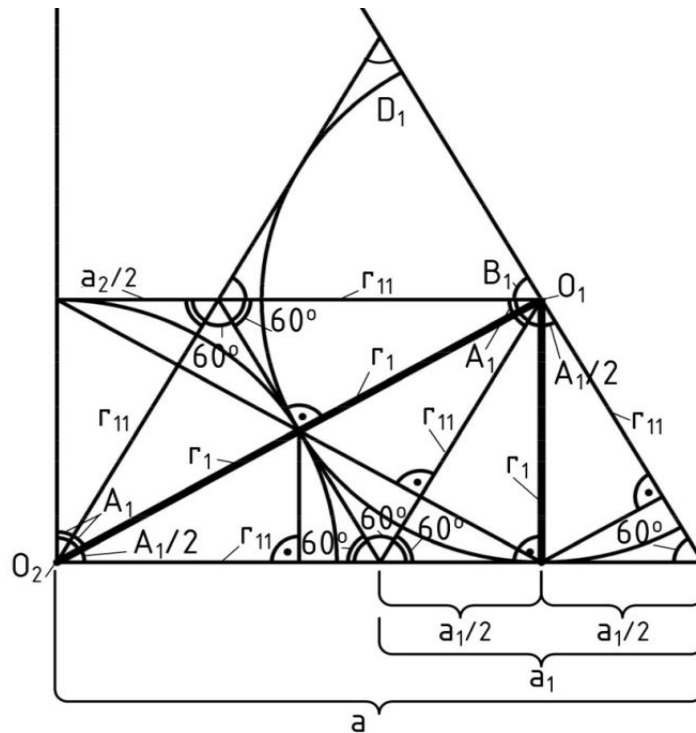


Рис. 2.33. Определение положения центров O_1 и O_2 шестиугольников (толстые линии) равных радиусов в сферическом треугольнике с внутренними углами 90-60 градусов. Углы даны для схемы-первоосновы расположения центров, показанной тонкими линиями, т.е. для касающихся окружностей, описывающих неправильные шестиугольники равных радиусов.

Откуда получаем уравнение

$$\begin{aligned} \frac{3}{4}tg^2o(1+tg^2a) + \frac{1}{12}tg^2A \frac{1+tg^2o}{tg^2o}(tg a - tg o)^2 = \\ = \frac{tg^2A}{1+tg^2A}(1+tg^2o)(1+tg^2a). \end{aligned}$$

Так как из уравнения (2.40)

$$tg^2A = \frac{4tg^2o+1}{3},$$

то искомое соотношение принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{3}{4}tg^2o(1+tg^2a) + \frac{1}{12} \frac{4tg^2o+1}{3} \cdot \frac{1+tg^2o}{tg^2o}(tg a - tg o)^2 = \\ = \frac{(4tg^2o+1)(1+tg^2a)}{4}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Наконец, введя обозначения

$$k_a = \operatorname{tg} a, \quad t = \operatorname{tg} o,$$

и проведя некоторые преобразования, приходим к уравнению

$$4t^6 - 8k_a t^5 - (5k_a^2 + 4)t^4 - 10k_a t^3 - (4k_a^2 + 8)t^2 - 2k_a t + k_a^2 = 0,$$

которое приводится к виду

$$(t^2 + 1) \left(t + \frac{k_a}{2} \right) (4t^3 - 10k_a t^2 - 8t + 2k_a) = 0. \quad (2.32)$$

По условию задачи находятся только положительные корни уравнения (2.32), а, следовательно, искомое решение найдем из уравнения третьей степени

$$2t^3 - 5k_a t^2 - 4t + k_a = 0. \quad (2.33)$$

Проводим вычисления для параметра $a = 20.905162886^\circ$, получаем значение параметра $k_a = 0.3819661$. Корни уравнения (2.33) имеют вид

$$t_1 = 1.9366878, \quad t_2 = -1.0736234, \quad t_3 = 0.0918509.$$

Искомое решение определяем, исходя из корня t_3 :

$$o = 5.2479437^\circ, \quad A = 30.413417^\circ.$$

Для решения задачи (2.33) также использовалось программное обеспечение Scilab 5.4.1 - The free platform for Numerical Computation (аналог Matlab) [207]. Полученные решения позволяют реализовать алгоритмы аппроксимации сферы треугольной геометрической сетью с максимальным числом правильных шестиугольников и подготовить варианты оптимизации разрезов сферы.

Координаты одной из самых эффективных типов разрезки системы, а именно, разрезки «320-гранника» (рис.2.28, 2.29, 2.31) показаны в работе [167]. В куполе такой разрезки при монтаже используются два типа панелей: правильные пятиугольные панели со стержнями длиной 1432 и 1672 мм и правильные шестиугольные панели со стержнями длиной 1855 и 1878 мм.

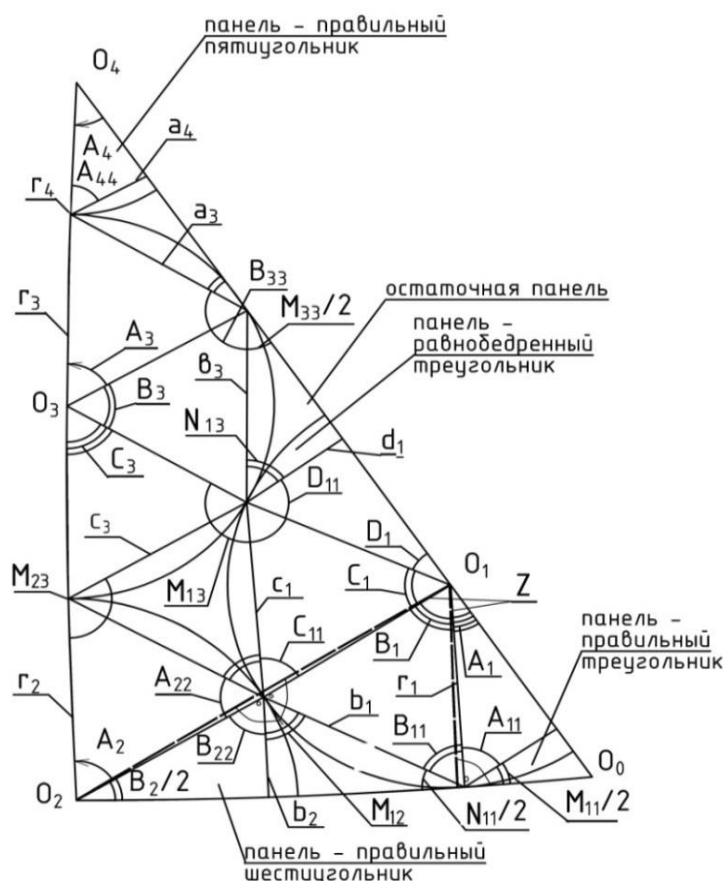


Рис. 2.34. Совместимый сегмент сборной сферической оболочки в виде 1280-гранника: O_0 – центр панели в виде правильного треугольника на сфере; O_1, O_2, O_3 – центры панелей в виде плоских шестиугольников; O_4 – центр панели в виде правильного плоского пятиугольника; A_2 – обозначение внутреннего угла первого по часовой стрелке треугольника в шестиугольнике у центра O_2 ; b_1 – обозначение полярного угла дуги второго по часовой стрелке треугольника в шестиугольнике против центра O_1 .

Координаты эффективных разрезов данной системы приведены в работе [167: «320-гранника» (рис. 2.28 а) – для сферы диаметром 11 м, а также «1280-гранника» – для сферы диаметром 36 м (рис. 2.28 б). Таблицы координат [167] разрезов позволяют вычертить основные архитектурно-строительные чертежи покрытия здания, монтажные схемы и их фрагменты в любом ракурсе, выполнить конструирование купола, а также все статические и динамические расчеты.

В следующих задачах решим проблему размещения шестиугольников в указанных сферических повторяющихся сегментах сферы. Для этого, как видно

из рисунков 2.1 и 2.2, достаточно сформировать первые ряды шестиугольников причем правильными.

Задача 4 размещения на сфере правильных и неправильных шестиугольников, вписанных в окружности, т.е. фигур плоских или составленных в свою очередь из сферических треугольников (рис. 2.35) с минимальными размерами ребер, имеет эффективное решение в виде сети, образованной на основе окружностей минимальных радиусов, т.е. окружностей на сфере, полученных при касании трех смежных окружностей, центры которых находятся на наименьшем расстоянии друг от друга [167. 208-211]. Размещение неправильных и правильных шестиугольников, вписанных в окружности, проведем на примере разрезки в виде 2000-гранника (рис. 2.35).

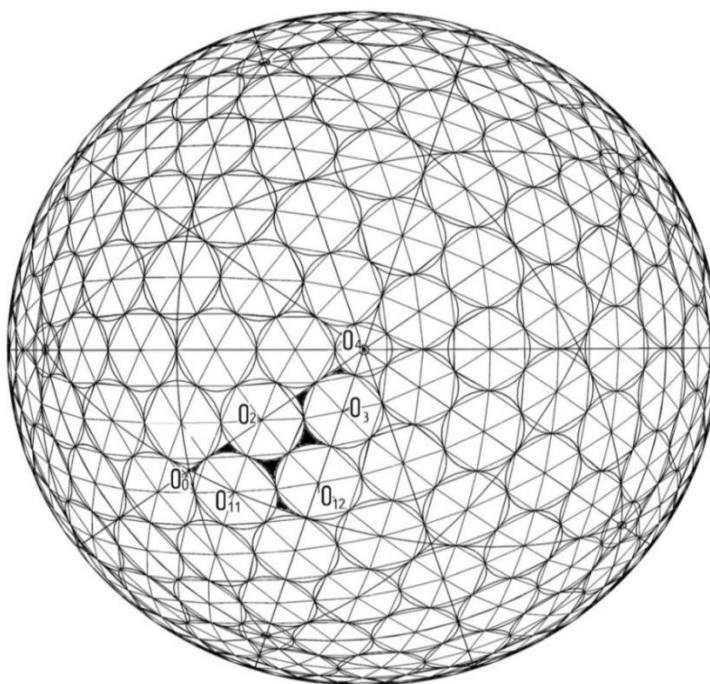


Рис. 2.35. Сфера, составленная из совместимых сферических треугольников (сегментов, представляющих собой 1/6 грани икосаэдра), с разрезкой треугольной сети в виде 2000-гранника, имеющая 14 типоразмеров элементов или 5 типоразмеров монтажных панелей (всего -11 типоразмеров); O_o – центр грани икосаэдра и панели в виде правильного треугольника на сфере; $O_{11}, O_{12}, O_2, O_3, O_4$ – центры монтажных панелей в виде плоских шестиугольников и пятиугольников в сегменте с внутренними углами 36, 90, 60°.

Для решения поставленной задачи (рисунок 2.36) рассмотрим сферический треугольник ABC , а также сферический прямоугольный треугольник O_2NO_{11} с гипотенузой-дугой, равном суммарному радиусу ρ_1 и ρ_2 .

Имеется прямоугольный сферический треугольник с внутренними углами 90 и 60 градусов и катетом-дугой, равном a . Требуется определить величины радиусов ρ_1 и ρ_2 между центрами O_{11} , O_{12} и O_2 окружностей и, таким образом, определится положение всех центров окружностей первых двух рядов шестиугольников.

Для определения центров шестиугольников равных радиусов введем некоторые дополнительные требования к расположению трех окружностей. Во-первых, задаем, чтобы биссектриса угла O_2 равнобедренного треугольника пересекала бы сторону-дугу $O_{11}O_{12}$ пополам.

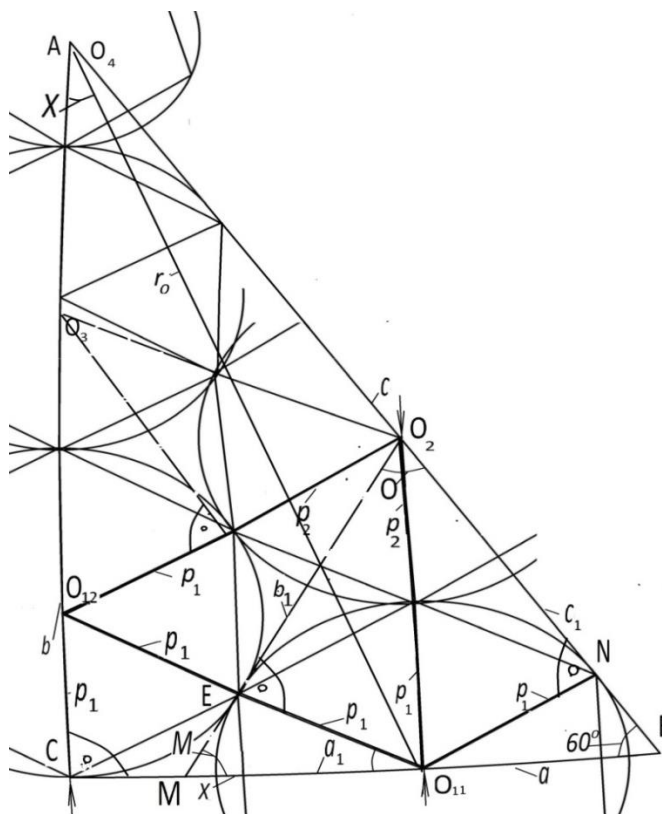


Рис. 2.36. Определение центров O_{11} , O_{12} и O_2 шестиугольников разных радиусов в сферическом треугольнике(сегменте) с внутренними углами 90 - 60 градусов для разрезки в виде 2000 -гранник при решении задачи оптимизации треугольной сети с помощью симметрии и свойств окружностей и главных линий сферы.

Предварительно определим параметры в данном сферическом треугольнике ABC . По условию внутренние углы треугольника $B = 60^\circ, C = 90^\circ, O_{12}C = \rho_1, O_{11}O_{12} = 2\rho_1, O_{11}O_2 = O_{12}O_2 = \rho_1 + \rho_2$.

Используя известные выражения сторон прямоугольного сферического треугольника через тангенсы катетов и гипотенузу, получим

$$\cos A = \cos a \sin B, \cos A = \sin B / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 a}, \cos A = \sqrt{3} / (2\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 a}).$$

Введем обозначение $O_{11}C = x$. Тогда $O_{11}B = a - x$, а угол $O_{11}AC = X$. Из треугольника $O_{11}BA$ найдем связь величины x и искомого радиуса ρ_1 :

$$\frac{\sin r_o}{\sin 60^\circ} = \frac{\sin(a - x)}{\sin(A - X)}. \quad (2.34)$$

Из треугольника $O_{11}O_{12}C$ также определим взаимосвязь величин x и ρ_1 :

$$2 \cos^2 \rho_1 = \cos \rho_1 \cos x + 1; \quad (2.35)$$

$$\sin \rho_1 = \sin(A - X) \sin r_o.$$

Таким образом, система уравнений (2.34 и 2.35) позволяет определить искомый радиус ρ_1 из уравнений

$$\begin{aligned} \sin 60^\circ \sin(a - x) &= \sin \rho_1, \\ (\sin 60^\circ \sin(a - x))^2 &= 1 - \cos^2 \rho_1; \end{aligned}$$

решая которые, приходим к соотношению

$$\cos^2 \rho_1 - \sin^2 \rho_1 = \cos \rho_1 \cos x.$$

Подставим в первое уравнение (2.35) соотношение

$$\cos^2 \rho_1 = 1 - 0,75 \sin^2(a - x).$$

Получаем

$$2(1 - 0,75 \sin^2(a - x)) = \cos x \sqrt{1 - 0,75 \sin^2(a - x)} + 1;$$

$$\begin{aligned}
\left(1 - \frac{1.5}{1 + ctg^2(a-x)}\right)^2 &= \cos^2 x \left(1 - \frac{0.75}{1 + ctg^2(a-x)}\right); \\
(ctg^2(a-x) - 0.5)^2 &= \cos^2 x (0.25 + ctg^2(a-x)) (1 + ctg^2(a-x)). \\
(-0.5 + \left(\frac{1 + \operatorname{tg} a \operatorname{tg} x}{\operatorname{tg} a - \operatorname{tg} x}\right)^2)^2 &= \\
&= \cos^2 x \left(0.25 + \left(\frac{1 + \operatorname{tg} a \operatorname{tg} x}{\operatorname{tg} a - \operatorname{tg} x}\right)^2\right) \left(1 + \left(\frac{1 + \operatorname{tg} a \operatorname{tg} x}{\operatorname{tg} a - \operatorname{tg} x}\right)^2\right).
\end{aligned}$$

Подставим $1 + \operatorname{tg}^2 x = 1 / \cos^2 x$, получим

$$\begin{aligned}
&(1 + \operatorname{tg}^2 x) (-0.5 (\operatorname{tg} a - \operatorname{tg} x)^2 + (1 + \operatorname{tg} a \operatorname{tg} x)^2)^2 = \\
&= (0.25 (\operatorname{tg} a - \operatorname{tg} x)^2 + (1 + \operatorname{tg} a \operatorname{tg} x)^2) ((\operatorname{tg} a - \operatorname{tg} x)^2 + (1 + \operatorname{tg} a \operatorname{tg} x)^2).
\end{aligned}$$

Подставим $t = \operatorname{tg} a$; $k = \operatorname{tg} x$.

$$\begin{aligned}
&(1 +) (-0.5 (t - k)^2 + (1 + t k)^2)^2 = \\
&= (0.25 (t - k)^2 + (1 + t k)^2) ((t - k)^2 + (1 + t k)^2). \\
&(1 + k^2) (-0.5 t^2 + t k - 0.5 k^2 + 1 + 2 t k + t^2 k^2)^2 = \\
&= (0.25 t^2 - 0.5 t k + 0.25 k^2 + 1 + 2 t k + t^2 k^2) (t^2 - 2 t k + k^2 + 1 + 2 t k + t^2 k^2). \\
&(1 + k^2) (1 - 0.5 t^2 + 3 t k + (t^2 - 0.5) k^2)^2 = \\
&= (1 + 0.25 t^2 + 1.5 t k + (t^2 + 0.25) k^2) (1 + t^2 + (t^2 + 1) k^2); \\
&(1 + k^2) ((1 - 0.5 t^2 + 3 t k)^2 + 2(1 - 0.5 t^2 + 3 t k) (t^2 - 0.5) k^2 + \\
&\quad + (t^2 - 0.5)^2 k^4) = \\
&= (1 + 0.25 t^2 + 1.5 t k + (t^2 + 0.25) k^2) (1 + t^2 + (t^2 + 1) k^2); \\
&(1 - 0.5 t^2)^2 + 6 t k (1 - 0.5 t^2) + 9 t^2 k^2 + 2 (1 - 0.5 t^2) (t^2 - 0.5) k^2 + \\
&\quad + 6 t (t^2 - 0.5) k^3 + (t^2 - 0.5)^2 k^4 + \\
&+ (1 - 0.5 t^2)^2 k^2 + 6 t (1 - 0.5 t^2) k^3 + (9 t^2 k^4 + 2 (1 - 0.5 t^2) (t^2 - 0.5) k^4 + 6 t (t^2 - 0.5) k^5 + \\
&+ (t^2 - 0.5)^2 k^6) = (1 + t^2) \left((1 + 0.25 t^2) + 1.5 (1 + t^2) t k + (t^2 + 0.25) (1 + t^2) k^2 + \right. \\
&\quad \left. + (t^2 + 1) \right) (1 + 0.25 t^2) k^2 + 1.5 (t^2 + 1) t k^3 + (t^2 + 1) (t^2 + 0.25) k^4;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (t^2 - 0,5)^2 k^6 + 6t(t^2 - 0,5)k^5 + \\
& + ((t^2 - 0,5)^2 + 9t^2 + 2(1 - 0,5t^2)(t^2 - 0,5) - (t^2 + 1)(t^2 + 0,25))k^4 + \\
& + (6t(t^2 - 0,5) + 6t(1 - 0,5t^2) - 1,5(t^2 + 1))k^3 + \\
& + ((9t^2 + 2(1 - 0,5t^2)(t^2 - 0,5) + (1 - 0,5t^2)^2 - (t^2 + 1)(1 + 0,25t^2) - \\
& - (t^2 + 0,25)(1 + t^2))k^2 + ((6t(1 - 0,5t^2) - 1,5(1 + t^2)t)k + (1 - 0,5t^2)^2 - \\
& - (1 + t^2)(1 + 0,25t^2)) = 0.
\end{aligned} \tag{2.36}$$

Принимая $a = 20,9051629^0$, получаем

$$\begin{aligned}
t = \operatorname{tg} a &= 0,381966127; k = \operatorname{tg} x = 0,2226474416 \\
& 0.125388143656x^6 - 0.811529534406x^5 + 0.328271320286x^4 + \\
& + 0.656541386439x^3 - 0.125387586261x^2 + 1.468070920845x - \\
& - 0.32827076289 = 0.
\end{aligned}$$

Откуда из соотношения

$$\sin 60^\circ \sin(a - x) = \sin \rho_1, \quad \rho_1 = 7,227585977886^0.$$

Следует отметить, что условие касания двух окружностей с центрами в точках O_{11} и O_2 , соответственно, возможно и в том случае, если угол $O_2 O_{11} B$ не прямой. Для нахождения радиуса ρ_2 второй окружности рассмотрим треугольник $MO_2 O_{11}$. Применение теорем сферической тригонометрии дает следующее соотношение

$$\cos(\rho_1 + \rho_2) = \cos a_1 \cos b_1 + \sin a_1 \sin b_1 \cos M, \tag{2.37}$$

Из треугольника $MO_2 B$

$$\cos O = -\cos M \cos 60^\circ + \sin M \sin 60^\circ \cos(a - x + a_1),$$

где $a_1 = MO_{11}$, $b_1 = MO_2$.

Из треугольника $CO_{11} O_{12}$, выражая косинус угла O_{11} через тангенсы, приходим к уравнению

$$\cos O_{11} = \frac{\operatorname{tg} x}{\operatorname{tg} 2\rho_1}.$$

где внутренний угол $O_{11} = CO_{11} O_{12} = MO_{11} E$.

Все величины в данном выражении определены, за исключением угла O_{11}

Из прямоугольного треугольника $MO_{11}E$ следует

$$\operatorname{tg} a_1 = \frac{\operatorname{tg} \rho_1}{\cos O_{11}},$$

Обозначим через M угол EMO_{11}

$$\sin M = \frac{\sin \rho_1}{\sin a_1}.$$

Сначала применяем соотношение (2.35) для треугольника MO_2B , затем применяем соотношение для треугольника $O_{11}O_2B$

$$\frac{\sin b_1}{\sin 60^\circ} = \frac{\sin(a - x + a_1)}{\sin O}$$

Таким образом, радиус ρ_2 второй окружности определим из уравнения (2.37)

Откуда получим $\rho_1 = 7,227585978$ и $\rho_2 = 5,905344387^\circ$

Для решения уравнения (2.36) использовалось программное обеспечение ScLab 5.4. [207]. Для приведенного положения центров первых рядов шестиугольников, вписанных в окружности, изменения углов, а значит и оптимизация, возможны только для шестиугольников с центрами $O_2 - O_3$ [4-15, 208-211].

Задача 5. Определение положения центров шестиугольников равных радиусов в сферическом треугольнике с внутренними углами 36-90-60 градусов. Задача размещения на сфере правильных и неправильных шестиугольников, вписанных в окружности, т.е. фигур плоских или составленных в свою очередь из сферических треугольников (рис. 2.37) с минимальными размерами ребер, имеет эффективное решение в виде сети, на основе окружностей минимальных радиусов, т.е. окружностей на сфере, полученных при касании трех смежных окружностей, центры которых находятся на наименьшем расстоянии друг от друга [3, 167].

Оптимизация треугольной геометрической сети на сфере по критерию минимума типоразмеров элементов может быть представлена и решена размещением в системе неправильных шестиугольников, вписанных в

окружности минимальных размеров, максимума правильных шестиугольников, например, в совместимых сферических треугольниках (сегментах) икосаэдра со схемой разрезки, показанной на рисунках 2.37 и 2.38. Кроме вариантов применения свойств симметрии главных и параллельных линий окружностей сферы, в подобных разрезках должны быть реализованы возможности центральной симметрии окружностей [4-15].

На схемах рисунков 2.37 и 2.38 приведено размещение описанных окружностями шестиугольников в сферическом треугольнике (совместимом сегменте сферического икосаэдра) с внутренними углами 36, 90 и 60°. При оптимизации треугольной сети с помощью симметрии окружностей и главных линий сферы можно выделить как одну из промежуточных задач – определение положения центров окружностей первых рядов шестиугольников O_1, O_2, O_3, O_4 на совместимом сегменте сферы (рис. 2.37). Указанное размещение центров окружностей, описывающих неправильные и правильные шестиугольники, проведем на примере разрезки в виде 3920-гранника (рис. 2.37).

Итак, на первом этапе определяем положение центров O_1, O_2, O_3, O_4 шестиугольников равных радиусов в сферическом треугольнике (на рис. 2.38 показана часть этого треугольника-сегмента у внутренних углов 60 и 90 градусов). Имеется прямоугольный сферический треугольник с внутренними углами 90 и 60 градусов и катетом равном a . Требуется определить величины радиусов между центрами O_1 и O_2, O_1 и O_3, O_1 и O_4 .

Для решения поставленной задачи рассмотрим половину правильного шестиугольника, имеющую центры O_1, O_2, O_3, O_4 , а также прямоугольный треугольник O_2O_1M с катетом r_0 и гипотенузой, равной суммарному радиусу $r_1 + r_2$ и прямоугольный треугольник O_2O_0M , также с катетами r_0 и x ,

причем $x = a - 2r_0$.

Опираясь на основные формулы сферической тригонометрии, получаем систему уравнений (2.38, 2.39). Применяя теоремы косинусов и синусов к треугольнику O_2O_0M , получаем

$$\operatorname{tg} y = \frac{\operatorname{tg}(a - 2r_0)}{\cos 60^\circ}, \quad \cos y = \cos(a - 2r_0) \cos r_2,$$

$$\sin y = \frac{\sin r_2}{\sin 60^\circ}; \quad (2.38)$$

откуда следует

$$\frac{\operatorname{tg}(a - 2r_0)}{\cos 60^\circ} = \frac{\sin r_2}{\sin 60^\circ \cos(a - 2r_0) \cos r_2}.$$

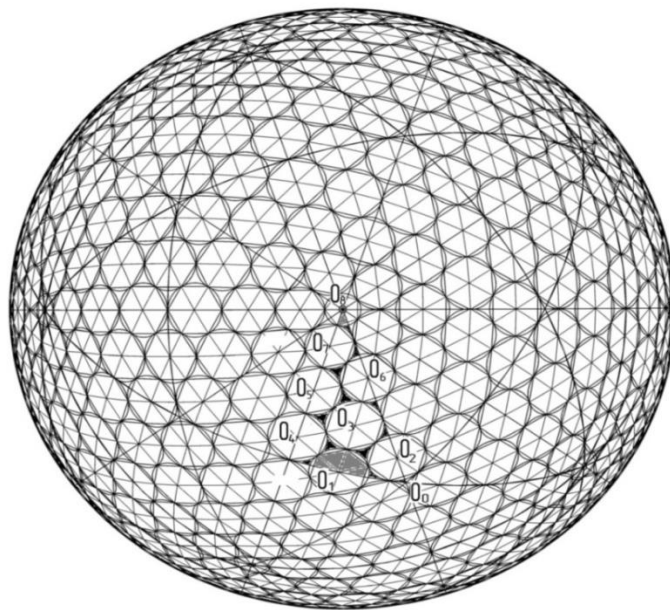


Рис. 2.37. Сфера, составленная из совместимых сферических треугольников (сегментов, представляющих собой 1/6 грани икосаэдра), с разрезкой треугольной сети в виде 3920-гранника, имеющая 20 типоразмеров элементов или 7 типоразмеров монтажных элементов (всего -15 типоразмеров); O_0 – центр грани икосаэдра и панели в виде правильного треугольника на сфере; O_1, O_2, O_3, O_4 – центры монтажных панелей в виде плоских шестиугольников и пятиугольников в сегменте.

Применяя теоремы косинусов и синусов к треугольнику O_2O_1M , получаем

$$\operatorname{tg}(r_1 + r_2) = \frac{\operatorname{tgr}_0}{\cos 30^\circ},$$

$$\cos(r_1 + r_2) = \cos r_0 \cos r_2,$$

$$\sin(r_1 + r_2) = \frac{\sin r_2}{\sin 30^\circ}; \quad (2.39)$$

Откуда следует

$$\frac{\operatorname{tg} r_0}{\cos 30^\circ} = \frac{\sin r_2}{\sin 30^\circ \cos r_0 \cos r_2}.$$

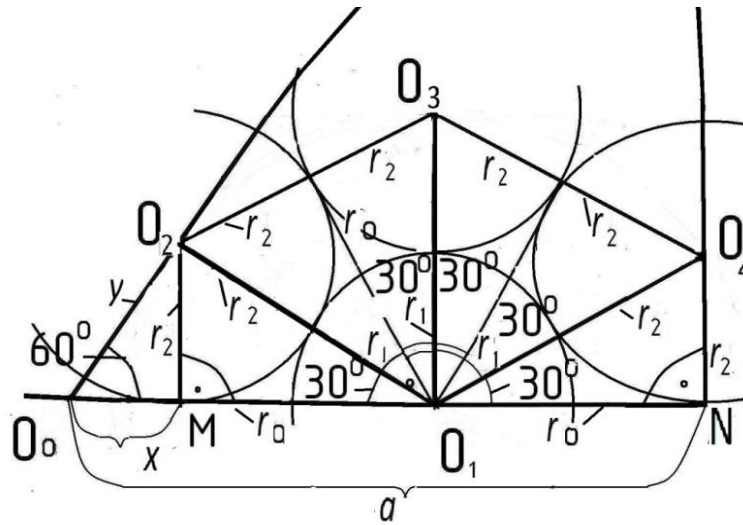


Рис. 2.38. Схемы размещения первых четырех плоских естиугольников в сегменте с внутренними углами 36, 90, 60° при решении задачи оптимизации треугольной сети с помощью свойств симметрии окружностей и главных линий сферы (главные линии являются осями в пределах сферического сегмента): O_1, O_2, O_3, O_4 – центры первых рядов панелей.

Проводя преобразования уравнений (2.38, 2.39), получим уравнение

$$\operatorname{tg} r_2 = \cos 30^\circ \sin 60^\circ \sin(a - 2r_0) = \cos 60^\circ \sin 30^\circ \sin r_0, \quad (2.40)$$

Из равенств (2.57) получаем

$$3 \sin(a - 2r_0) = \sin r_0, \quad (2.41)$$

и, проводя преобразования уравнения (2.41), получим уравнение

$$3 (\sin a \cos 2r_0 - \cos a \sin 2r_0) = \sin r_0,$$

$$(3 \sin a - \sin r_0) - 6 \sin a \sin^2 r_0)^2 = 36 \cos^2 a (1 - \sin^2 r_0) \sin^2 r_0,$$

$$9\sin^2 a - 6 \sin a \sin r_0 + \sin^2 r_0 - 12 \sin a \sin^2 r_0 (3\sin a - \sin r_0) + 36 \sin^2 a \sin^4 r_0 = \\ = 36\cos^2 a \sin^2 r_0 - 36\cos^2 a \sin^4 r_0$$

Откуда приходим к уравнению

$$9\sin^2 a - 6 \sin a \sin r_0 + \sin^2 r_0 - 36 \sin^2 a \sin^2 r_0 + 12\sin a \sin^3 r_0 + \\ + 36\sin^2 a \sin^4 r_0 = 36\cos^2 a \sin^2 r_0 - 36\cos^2 a \sin^4 r_0,$$

$$9\sin^2 a - 6 \sin a \sin r_0 + (1 - 36 \sin^2 a - 36 \cos^2 a) \sin^2 r_0 + 12\sin a \sin^3 r_0 + \\ + 36\sin^2 a \sin^4 r_0 + 36\cos^2 a \sin^4 r_0 = 0.$$

$$9\sin^2 a - 6 \sin a \sin r_0 - 35 \sin^2 r_0 + 12\sin a \sin^3 r_0 + 36 \sin^4 r_0 = 0,$$

$$36 \sin^4 r_0 + 12\sin a \sin r_0^3 - 35 \sin^2 r_0 - 6 \sin a \sin r_0 + 9\sin^2 a = 0. \quad (2.42)$$

Вводя вспомогательные обозначения

$$k = \sin a, \quad t = \sin r_0,$$

и, избавляясь от иррациональности, приходим к уравнению

$$36t^4 + 12kt^3 - 35t^2 - 6kt + 9k^2 = 0. \quad (2.43)$$

Проводя расчеты для значения катета $a = 20,9051628^\circ$, получаем,

$$36t^4 + 4,281866124t^3 - 35t^2 - 2,14093306t + 1,145898594 = 0.$$

$$\sin r_0 = 0,15581464.$$

$$r_0 = 8,9640458.$$

Тогда из соотношений, связывающих радиусы r_1 и r_2 с параметром r_0 :

$$\operatorname{tg} r_2 = \cos 60^\circ \sin 30^\circ \sin r_0,$$

$$\sin(r_1 + r_2) = \frac{\sin r_2}{\sin 30^\circ};$$

Получаем искомые значения $r_1 = 5.1824133^\circ$ и $r_2 = 5.1404432^\circ$. Для решения уравнения (2.43) использовалось программное обеспечение Scilab 5.4.1. Для найденного положения центров первых рядов шестиугольников, вписанных в окружности, в них уже определены углы, размеры сторон шестиугольников. Принимая расположение катета с размером дуги, равным a ,

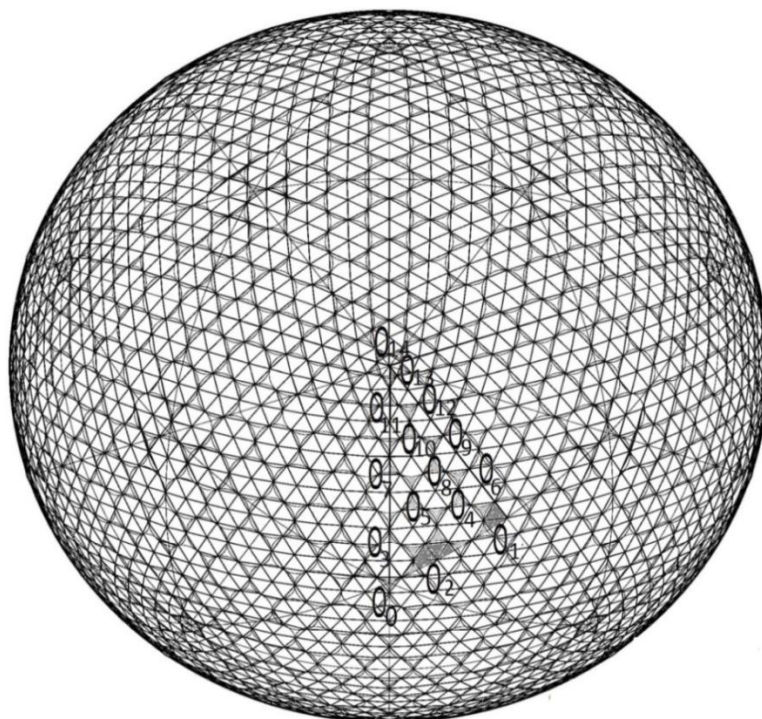
на экваторе сферы, используем при построении окружностей для остальных шестиугольников симметрию главных окружностей (линий) сферы, которые с шагом, равным r_0 , выстраиваем перпендикулярно этому экватору [10,167]. При приближении к пятиугольнику внутренняя симметрия нарушается и окружности немного смещаются относительно этих внутренних осей. Вычисления положения центров окружностей, в этих случаях, производятся методом триангуляции. Изменения углов внутренних углов ребер-сторон, а значит и оптимизация, возможны здесь для шестиугольников с центрами $O_5 - O_7$ [10,167].

Задача 6 размещения на сфере правильных и неправильных шестиугольников, вписанных в окружности, т.е. фигур плоских или составленных в свою очередь из сферических треугольников (рисунок 2.39) с минимальными размерами ребер, имеет эффективное решение в виде сети, образованной на основе окружностей минимальных радиусов, т.е. окружностей на сфере, полученных при касании трех смежных окружностей, центры которых находятся на наименьшем расстоянии друг от друга [167].

Оптимизация треугольной геометрической сети на сфере по критерию минимума типоразмеров элементов может быть представлена и решена размещением в системе неправильных шестиугольников, вписанных в окружности минимальных размеров, максимума правильных шестиугольников, например, в совместимых сферических треугольниках (сегментах) икосаэдра со схемой разрезки, показанной на рисунках 2.39 и 2.40. Кроме вариантов применения свойств симметрии главных и параллельных линий окружностей сферы, в подобных разрезках должны быть реализованы возможности центральной симметрии окружностей [167].

На схемах рисунков 2.39 и 2.40 приведено размещение описанных окружностями шестиугольников в сферическом треугольнике (совместимом сегменте сферического икосаэдра) с внутренними углами $36-60-90^\circ$.

При оптимизации треугольной сети с помощью симметрии окружностей и главных линий сферы можно выделить как одну из промежуточных задач – определение положения центров окружностей первых рядов шестиугольников $O_1, O_2, O_3, O_4, O_5, O_6$ (рис. 2.39). Указанное размещение центров окружностей описывающих неправильные и правильные шестиугольники, проведем на примере разрезки в виде 3920-гранника (рис. 2.39).



Требуется определить величины радиусов между центрами O_1 и O_2 , O_1 и O_3 , O_1 и O_4 .

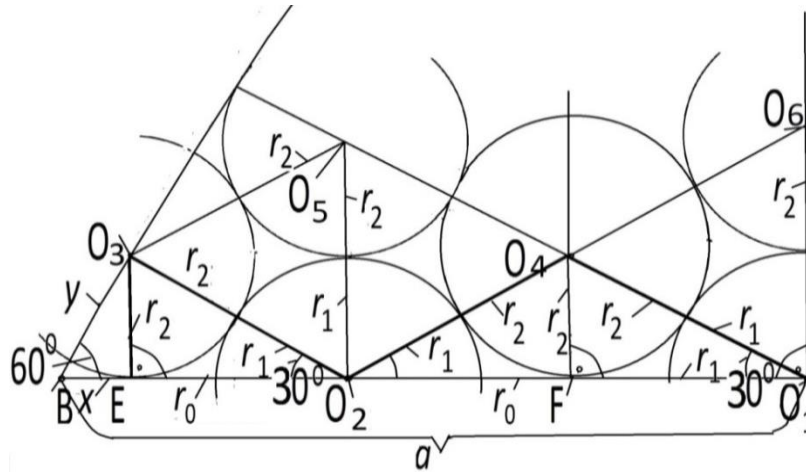


Рис. 2.40. Схемы размещения первых четырех плоских шестиугольников в сегменте с внутренними углами $36, 90, 60^\circ$ при решении задачи оптимизации треугольной сети с помощью свойств симметрии окружностей и главных линий сферы (главные линии являются осями в пределах сферического сегмента); O_1, O_2, O_3, O_4 – центры первых рядов панелей в виде плоских шестиугольников.

Для решения поставленной задачи рассмотрим четверть правильного шестиугольника, имеющую центры O_1, O_4, O_6 , и половину правильного шестиугольника, имеющую центры O_2, O_3, O_5, O_4 , а также прямоугольный треугольник O_2O_3E , с катетами r_2, r_0 и гипотенузой, равной суммарному радиусу $r_1 + r_2$, и прямоугольный треугольник O_3BE , также с катетами r_2 и x , причем $x = a - 3r_0$.

Опираясь на основные формулы сферической тригонометрии, получаем систему уравнений (2.54 и 2.55). Применяя теоремы косинусов и синусов к треугольнику O_3BE , получаем

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} y &= \frac{\operatorname{tg}(a - 3r_0)}{\cos 60^\circ}, \\ \cos y &= \cos(a - 3r_0) \cos r_2, \\ \sin y &= \frac{\sin r_2}{\sin 60^\circ}; \end{aligned} \quad (2.44)$$

откуда следует

$$\frac{\operatorname{tg}(a - 3r_0)}{\cos 60^\circ} = \frac{\sin r_2}{\sin 60^\circ \cos(a - 3r_0) \cos r_2}$$

Применяя теоремы косинусов и синусов к треугольнику O_2O_3E , получаем

$$\begin{aligned}\operatorname{tg}(r_1 + r_2) &= \frac{\operatorname{tgr}_0}{\cos 30^\circ}, \\ \cos(r_1 + r_2) &= \cos r_0 \cos r_2, \\ \sin(r_1 + r_2) &= \frac{\sin r_0}{\sin 30^\circ};\end{aligned}\tag{2.45}$$

откуда следует

$$\frac{\operatorname{tg} r_0}{\cos 30^\circ} = \frac{\sin r_2}{\sin 30^\circ \cos r_0 \cos r_2}$$

Проводя преобразования уравнений (2.44, 2.45), получим уравнение

$$\operatorname{tg} r_2 = \cos 30^\circ \sin 60^\circ \sin(a - 3r_0) = \cos 60^\circ \sin 30^\circ \sin r_0,\tag{2.46}$$

Из равенств (2.46) получаем

$$3 \sin(a - 3r_0) = \sin r_0,\tag{2.47}$$

и, проводя преобразования уравнения (2.47), получим уравнение

$$3 (\sin a \cos 3r_0 - \cos a \sin 3r_0) = \sin r_0,$$

$$\begin{aligned}3 \sin a \cos^3 r_0 - 9 \sin a \cos r_0 \sin^2 r_0 - 9 \cos a \cos^2 r_0 \sin r_0 \\ + 3 \cos a \sin^3 r_0 = \sin r_0,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}3 \sin a (\cos^2 r_0 - 3 \sin^2 r_0) \cos r_0 - 3 \cos a (3 \cos^2 r_0 \\ - \sin^2 r_0) \sin r_0 = \sin r_0,\end{aligned}$$

$$3 \sin a (1 - 4 \sin^2 r_0) \cos r_0 = 3 \cos a (3 - 4 \sin^2 r_0) \sin r_0 + \sin r_0,$$

$$3 \sin a (1 - 4 \sin^2 r_0) \cos r_0 = (3 \cos a (3 - 4 \sin^2 r_0) + 1) \sin r_0.$$

Подставим $1 + \operatorname{tg}^2 x = 1 / \cos^2 x$; $1 + \operatorname{ctg}^2 x = 1 / \sin^2 x$:

$$9 \sin^2 a \left(1 - \frac{4}{1 + \operatorname{ctg}^2 r_0}\right)^2 \operatorname{ctg}^2 r_0 =$$

$$\begin{aligned}
&= (3 \cos a (3 - \frac{4}{1 + \operatorname{ctg}^2 r_0}) + 1)^2, \\
&9 \sin^2 a (\operatorname{ctg}^2 r_0 - 3)^2 \operatorname{ctg}^2 r_0 = \\
&= (3 \cos a (3 + 3 \operatorname{ctg}^2 r_0 - 4) + 1 + \operatorname{ctg}^2 r_0)^2, \\
&9 \sin^2 a (\operatorname{ctg}^2 r_0 - 3)^2 \operatorname{ctg}^2 r_0 = \\
&= ((-3 \cos a + 9 \cos a \operatorname{ctg}^2 r_0 + 1 + \operatorname{ctg}^2 r_0)^2.
\end{aligned}$$

Откуда приходим к уравнению

$$\begin{aligned}
&9 \sin^2 a (\operatorname{ctg}^4 r_0 - 6 \operatorname{ctg}^2 r_0 + 9) \operatorname{ctg}^2 r_0 = \\
&= ((1 - 3 \cos a) + (9 \cos a + 1) \operatorname{ctg}^2 r_0)^2, \\
&9 \sin^2 a (\operatorname{ctg}^6 r_0 - 6 \operatorname{ctg}^4 r_0 + 9 \operatorname{ctg}^2 r_0) = \\
&= (1 - 3 \cos a)^2 + 2(1 + 9 \cos a)(1 - 3 \cos a) \operatorname{ctg}^2 r_0 + \\
&\quad + (1 + 9 \cos a)^2 \operatorname{ctg}^4 r_0. \\
&9 \sin^2 a \operatorname{ctg}^6 r_0 - 54 \sin^2 a \operatorname{ctg}^4 r_0 + 81 \sin^2 a \operatorname{ctg}^2 r_0 = \\
&= (1 - 3 \cos a)^2 + 2(1 + 9 \cos a)(1 - 3 \cos a) \operatorname{ctg}^2 r_0 + \\
&\quad + (1 + 9 \cos a)^2 \operatorname{ctg}^4 r_0. \\
&9 \sin^2 a \operatorname{ctg}^6 r_0 - (54 \sin^2 a + (1 + 9 \cos a)^2) \operatorname{ctg}^4 r_0 + \\
&\quad + (81 \sin^2 a - 2(1 + 9 \cos a)(1 - 3 \cos a)) \operatorname{ctg}^2 r_0 - \\
&\quad - (1 - 3 \cos a)^2 = 0.
\end{aligned}$$

Подставим $k = \operatorname{ctg}^2 r_0$.

$$\begin{aligned}
&9 \sin^2 a k^3 - (54 \sin^2 a + (1 + 9 \cos a)^2) k^2 + \\
&\quad + (81 \sin^2 a - 2(1 + 9 \cos a)(1 - 3 \cos a)) k - \\
&\quad - (1 - 3 \cos a)^2 = 0.
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Проводя расчеты для значения катета $a = 20,9051628^\circ$, получаем,

$$1.145898594x^3 - 95.37740608x^2 + 44.227627875x - 3.24906745199 = 0;$$

$$k = \operatorname{ctg}^2 r_0 = 82,76801, r_0 = 6,27265567^\circ.$$

Тогда из соотношений, связывающих радиусы r_1 и r_2 с параметром r_0 :

$$\operatorname{tg} (r_1 + r_2) = \frac{\operatorname{tg} r_0}{\cos 30^\circ} = \frac{\sin r_2}{\sin 30^\circ \cos r_0 \cos r_2}.$$

получаем искомые значения $r_1 = 3,62393^\circ$ и $r_2 = 3,60950^\circ$. Для решения уравнения (2.48) использовалось программное обеспечение [207].

Для найденного положения центров первых рядов шестиугольников, вписанных в окружности, в них уже определены углы, размеры сторон шестиугольников. Принимая расположение катета с размером дуги, равным a , на экваторе сферы, используем при построении окружностей для остальных шестиугольников симметрию главных окружностей (линий) сферы, которые с шагом, равным r_0 , выстраиваем перпендикулярно этому экватору [10,167]. При приближении к пятиугольнику внутренняя симметрия нарушается и окружности немного смещаются относительно этих внутренних осей. Вычисления положения центров окружностей, в этих случаях, производятся методом триангуляции. Изменения углов внутренних углов ребер-сторон, а значит и оптимизация, возможны здесь для шестиугольников с центрами $O_5 - O_{13}$ [10, 167].

2.5.2. Перспективные разрезы на основе икосаэдра из треугольных и шестиугольных плоских (пирамидалных) панелей.

В работе предложены и исследованы еще несколько вариантов конструктивно-технологических методов образования треугольных сетей на сфере на основе икосаэдра. Аналогичные подходы можно использовать при использовании в качестве основы октаэдр или тетраэдр.

Суть этих вариантов (рис. 2.41-2.42) разрезов [7, 8, 168] заключается в том, что сборная сферическая оболочка монтируется из трех-, пяти-, шестиугольных панелей с углами, лежащими на сфере. Разнотипные марки таких панелей одинаковым образом расположены в пределах каждой треугольной грани правильного сферического 20-гранника – икосаэдра и имеют на вершинах 20-гранника панели в виде правильных сферических пятиугольников.

В предлагаемом втором варианте разрезов сферической оболочки (рис. 2.41 а, б и 2.42) панели на центрах граней и на серединах сторон-ребер правильного сферического 20-гранника выполняются в виде правильного шестиугольника. В третьем варианте (рис. 2.41 в, г и 2.43) на серединах сторон-ребер правильного сферического 20-гранника находятся узлы соединения по углам шестиугольных панелей. Кроме этого в пределах треугольных сферических сегментов, составляющих одну шестую часть грани сферического 20-гранника, и по их сторонам выполняются сферические или плоские шестиугольники-панели с центрами и углами, лежащими на сфере и описанными своими окружностями из соответствующих центров панелей. При этом смежные пяти или шестиугольники-панели соединены между собой только в одном узле, являющимся одной из точек пересечения или касания окружностей, образующих эти сферические многоугольники-панели, а между каждыми смежными тремя такими панелями образуется треугольная панель. Все шестиугольные и пятиугольные панели для сравнения с существующими аналогами также разбиты на треугольные панели. В результате образуются сферические многогранники в виде треугольных сетей на сфере, которые образуют необходимые нам сочетания многоугольников (шестиугольников, пятиугольников и треугольников между ними).

На рисунках 2.41 а и б изображены сборные сферические оболочки в виде полного 960-гранника и полного 2880-гранника с правильными шестиугольными панелями над центрами граней O_0 правильного сферического 20-гранника. Над серединами сторон-ребер O_2 расположены также правильные шестиугольные панели, на вершинах O_1 граней правильного сферического 20-гранника – правильные пятиугольные панели. 960-гранник получен делением (условно) ребер 240-гранника и добавлением новых ребер, соединяющих предыдущие в местах деления.

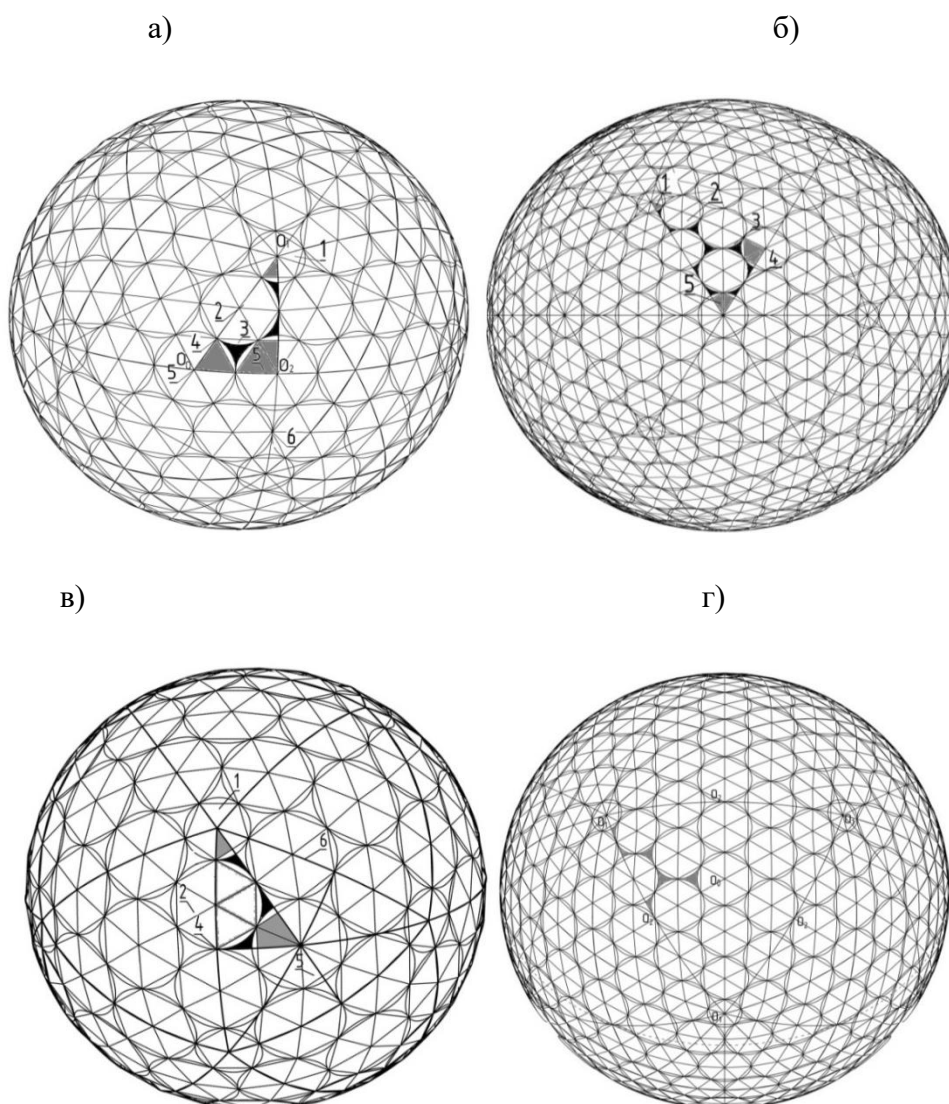


Рис. 2.41. Схемы разрезов сборной сферической оболочки на основе деления 240-гранника и 720-гранника (условно базовых): а – 960-гранник; б – 2880-гранник; в – собственно 720-гранник; г – 2160-гранник; 1 – панели в виде правильного плоского пятиугольника; 2 – панели в виде плоских шестиугольников; 3 – панели в виде треугольника; 4 – узлы соединения панелей; 5 – панели в виде правильных плоских шестиугольников; O_0 – центр грани икосаэдра.

После размещения окружностей, затем оптимизации параметров треугольной сети, положение вершин многогранников (центров и углов многоугольников) будет совпадать с положением сторон треугольных сферических сегментов, составляющих одну шестую часть грани сферического 20-гранника только для тех многоугольников, центры которых на них расположены. Для остальных положение треугольников, их составляющих,

может быть немного смещено относительно геодезической сети. Это вызвано использованием дополнительных ограничений, которые позволяют значительно снизить число типоразмеров: равных радиусов окружностей, правильных шестиугольников, осей-меридианов в пределах треугольников Шварца, как осей симметрии.

На рисунках 2.41 в, г показаны сборная сферическая оболочка в виде полного 720-гранника и полного 2160-гранника, где на серединах сторон-ребер правильного сферического 20-гранника находятся узлы соединения по углам шестиугольных панелей.

Из множества решений выбрано оптимальное решение разрезки сферы и системы координат, исходя из критерия минимума типоразмеров элементов и сборных панелей. Число ребер N последующих многогранников, может быть определено из формулы $N = 720 n^2$ (где n условное число членений ребер на подоснове в виде 720-гранника). На рисунке 2.41, а показана на сферическом сегменте, составляющем одну шестую часть грани сферического 20-гранника, разрезка 240-гранника на сфере (начальная базовая разрезка на шестиугольники, пятиугольники и затем на треугольники), состоящего из ребер только 4-х типоразмеров или из двух правильных пятиугольной и шестиугольной панелей и одного типа треугольной панели-вставки.

На рисунке 2.42, б показана разрезка 960-гранника на сфере, состоящего только из 8-ми ребер разной длины или из двух правильных пятиугольной и шестиугольной панелей, одной неправильной шестиугольной панели и трёх типов треугольных панелей-вставок. На рисунке 2.42, в показана разрезка 2160-гранника состоящего только из 13-ти ребер разной длины или из двух типов правильных пятиугольной и шестиугольных панелей, трех неправильных шестиугольных панелей и пяти типов треугольных панелей-вставок(10 типоразмеров); на рисунке 2.42, г показана разрезка 3840-гранника.

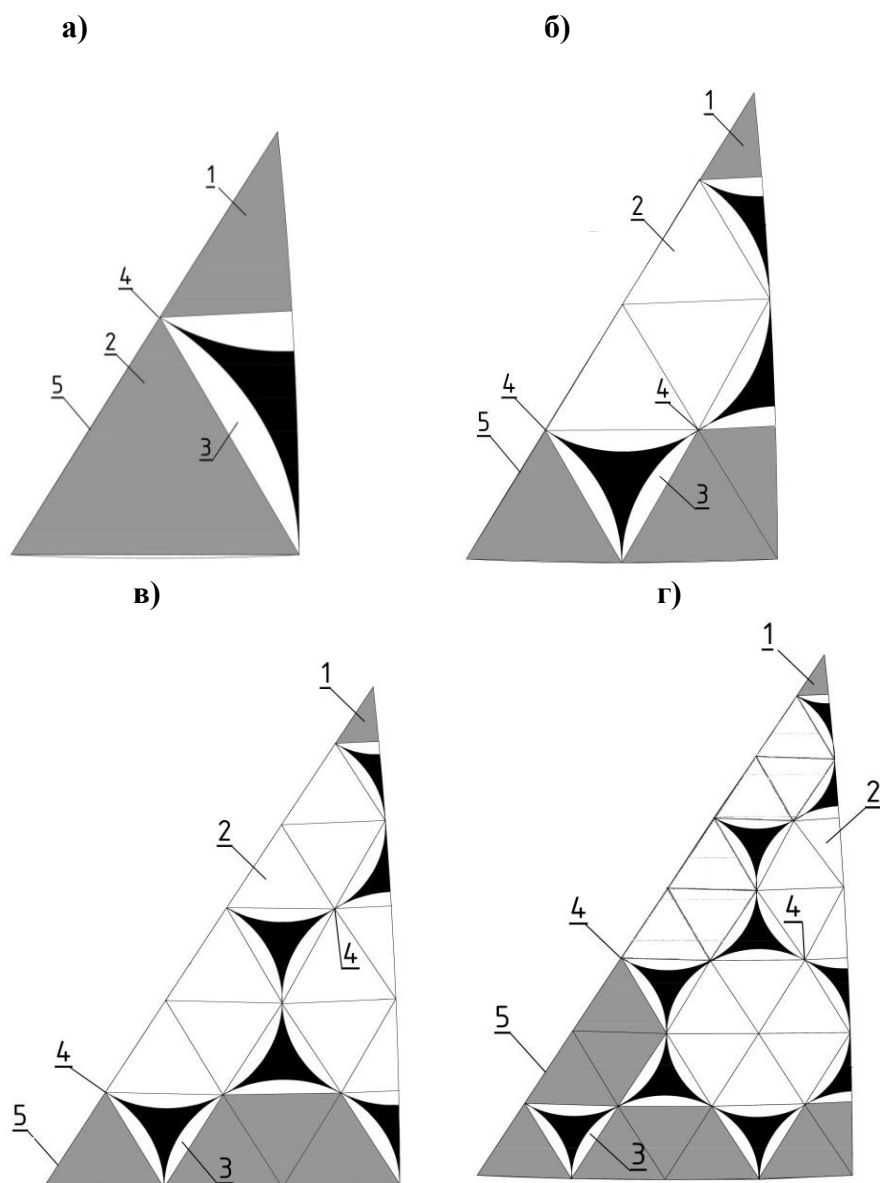


Рис. 2.42. Сегменты сборной сферической оболочки: а – 240-гранника; б – 960-гранника; в – 2160-гранника; г – 3840-гранник; 1 – панели в виде правильного плоского пятиугольника; 2 – панели в виде плоских шестиугольников; 3 – панели в виде треугольника; 4 – узлы соединения панелей; 5 – панели в виде правильных плоских шестиугольников.

На рисунке 2.43, а показана на сферическом сегменте, составляющем одну шестую часть грани сферического 20-гранника, разрезка 720-гранника на сфере (начальная базовая разрезка на шестиугольники, пятиугольники и затем на треугольники), состоящего из ребер только 7-х типоразмеров или из двух правильных пятиугольной и шестиугольной панелей, одной неправильной панели и одного типа треугольной панели-вставки.

На рисунке 2.43, б показана разрезка 2880-гранника на сфере, состоящего из ребер только 17-ти типоразмеров или из трех правильных пятиугольной и шестиугольных панелей, четырех неправильных шестиугольных панелей и шести треугольных панелей-вставок (13 типоразмеров). Для этих разрезов эффективные решения получены М.С. Туполевым(СССР), у которого число типов ребер N определяется по формуле $N = n(n+1)3/2$, где n – число членений ребер основы 60-гранника.

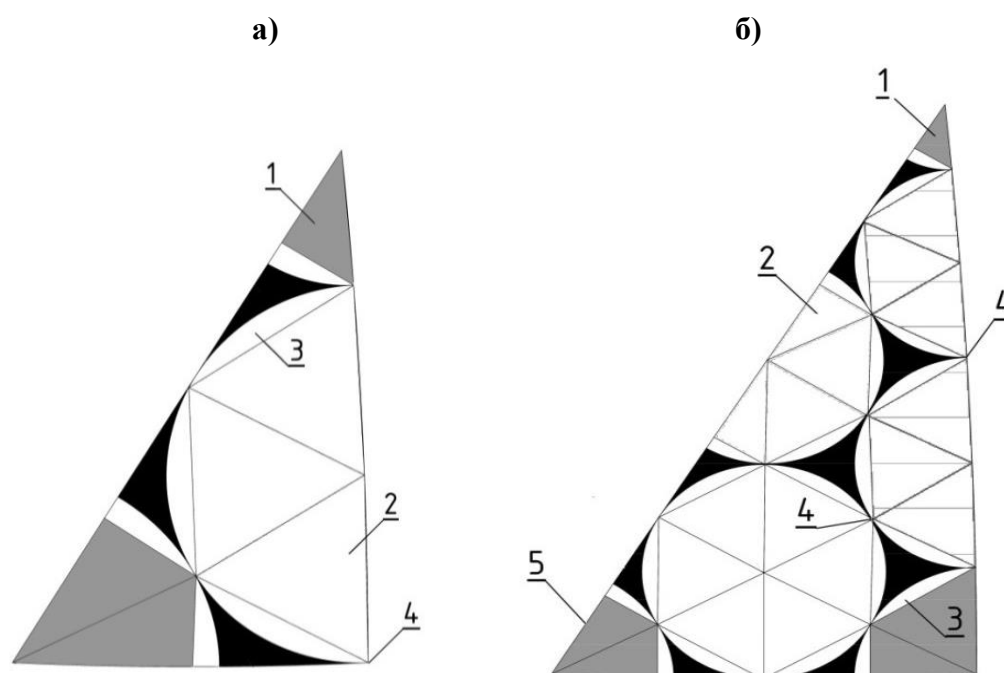


Рис. 2.43. Сегменты сборной сферической оболочки: а – 720-гранника; б – 2880-гранника; 1 – панели в виде правильного плоского пятиугольника; 2 – панели в виде плоских шестиугольников; 3 – панели в виде треугольника; 4 – узлы соединения панелей; 5 – панели в виде правильных плоских шестиугольников.

Применяя каждый способ разбивки, можно поверхность шара расчленить на определенное число шестиугольных и треугольных ячеек, начиная с приведенных рядов многогранников (рис. 2.44 и 2.45). Совокупность разрезов, полученных путем применения данного способа разбивки с последующим делением, образует семейство или систему разрезов одного вида (например, $240n^2$: 240, 960, 2160, 3860 и т.д.).

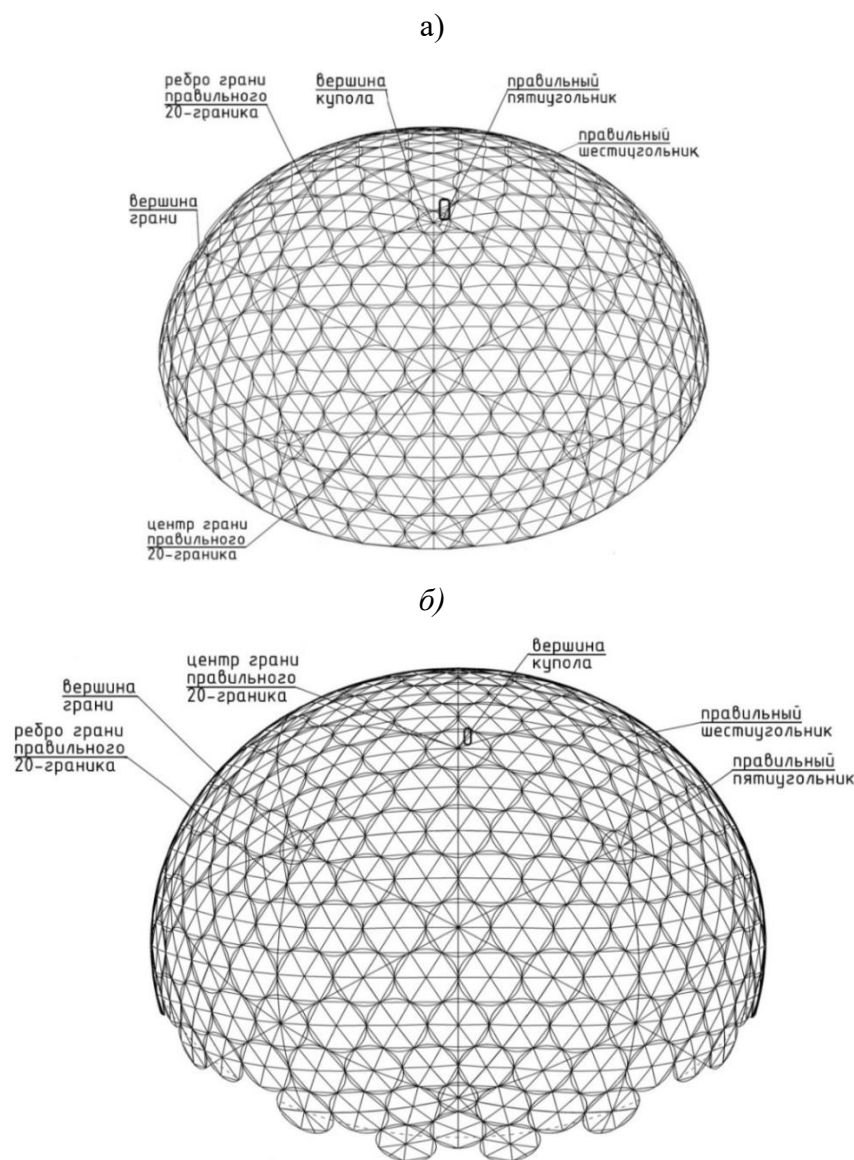


Рис. 2.44. Схема сборной оболочки с разрезкой 2880-гранника (О – вершина оболочки), состоящего из ребер 20-ти типоразмеров или из трех правильных пятиугольной и шестиугольных панелей, трех неправильных шестиугольных панелей и восьми треугольных панелей-вставок: а – оболочка с вершиной в виде правильной пятиугольной панели; б – оболочка с вершиной в виде правильной шестиугольной панели.

Проведем разбивку треугольной геометрической сети на сфере с учетом минимума типоразмеров элементов с размещением правильных и неправильных шестиугольников (вписанных в окружности минимальных размеров) в совместимых сферических треугольниках, составляющих одну шестую часть грани сферического икосаэдра, показанных на рисунках 2.44-

2.46. На рисунке 2.45 а, б показано расположение линии экватора 2 сферы по короткой стороне треугольника Шварца.

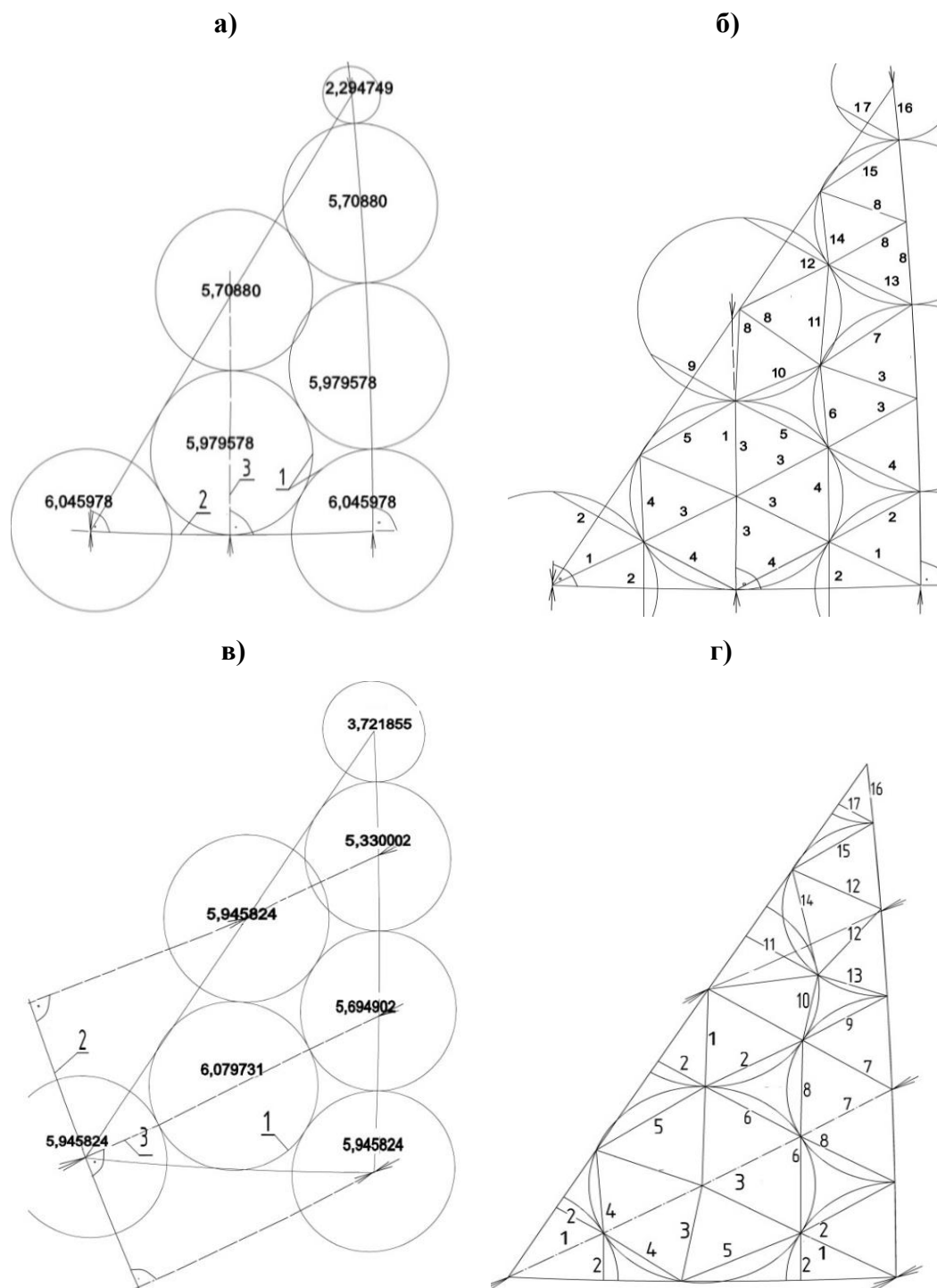


Рис. 2.45. Сегменты сборной оболочки с разрезами 2880-гранника с разными расположениями (а, б, в, г) опорной сети (осей) и экватора: 1 – окружности описывающие пятиугольники и шестиугольники, 2 – линия экватора сферы, 3 – линии меридианов; б – цифрами пронумерованы ребра 2880-гранника.

Меридиональные оси - главные линии (окружности) 3 выполнены под прямыми углами к экватору 2. С учетом ограничений в виде осей-сторон треугольника Шварца, получим разрезку 2880-гранника на сфере, состоящего из ребер только 17-ти типоразмеров или из трех правильных пятиугольной и шестиугольных панелей, четырех неправильных шестиугольных панелей и семи треугольных панелей-вставок (14 типоразмеров).

На рисунке 2.46 показано расположение линии экватора 2 сферы под наклоном 30° к короткой стороне треугольника Шварца в середине стороны-ребра грани икосаэдра. Полярные углы радиусов окружностей 1 даны на рисунках 2.45 и 2.46 в градусах. Длины ребер наиболее теоретически сложной разрезки оболочки «2880-гранника» (рис. 2.46 б) показаны в таблице 2.3. Координаты оболочки (рис. 2.44 а и 2.46 б) показаны в работе [168].

Таблица 2.3

Длины ребер 2880-гранника для диаметра 200.0 м

№ элемента по рисунку 2.45 б	Длина (м)	№ элемента по рисунку 2.45 б	Длина (м)	№ элемента по рисунку 2.45 б	Длина (м)	№ элемента по рисунку 2.45 б	Длина (м)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	10,48946	6	10,26358	11	9,827022	16	9,780301
2	10,47502	7	11,25537	12	10,99763	17	8,120396
3	9,592746	8	9,037283	13	9,222872	18	9,314929
4	11,50103	9	10,41740	14	9,789259	19	6,139684
5	11,16431	10	10,03143	15	9,090033	20	7,214230

Меридианы 3 здесь будут располагаться с разным шагом, со смещением на длинной стороне треугольника Шварца для размещения трёх равных окружностей 1.

Применяя методы оптимизации, с учетом ограничений получим более равномерную разрезку 2880-гранника на сфере, но состоящего уже из ребер 20-ти типоразмеров или из трех правильных пятиугольной и шестиугольных панелей, четырех неправильных шестиугольных панелей и восьми треугольных

панелей-вставок (15 типоразмеров). В подобной разрезке М. С. Туполева 30 типоразмеров.

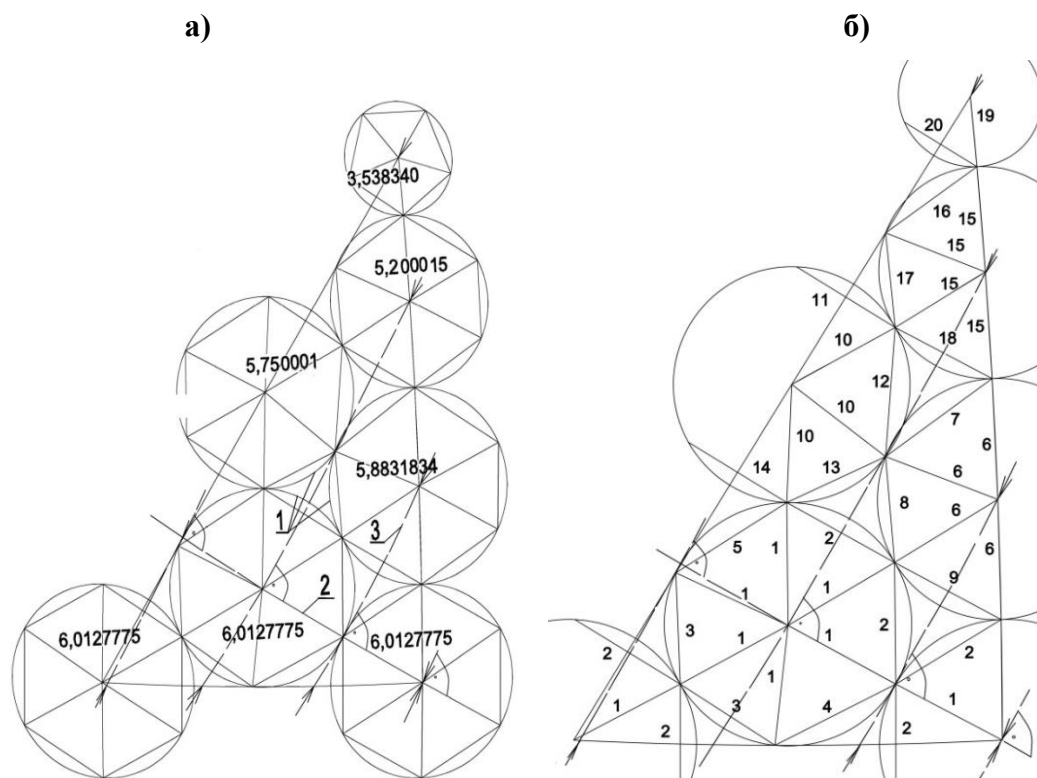


Рис. 2.46. Сегменты сборной оболочки с разрезками 2880-гранника с другим расположением (а, б) опорной сети (осей) и экватора: 1 – окружности описывающие пятиугольники и шестиугольники, 2 – линия экватора сферы, 3 – линии меридианов; б – цифрами пронумерованы ребра 2880-гранника.

2.5.3. Оптимизация расположения опорных узлов сферических разрезов на основе икосаэдра.

В геодезическом куполе, который предлагается в работе, имеется возможность такого размещения шестиугольников и пятиугольников, когда обеспечивается уменьшение не только числа типоразмеров монтажных элементов, но и числа типоразмеров опорных узлов, за счет их устройства на одном уровне ниже или выше экватора (приоритет от 07.06.2017 года). К выравниванию опорных узлов пришли все авторы наиболее применимых разрезов, но у них это привело к значительному увеличению числа типоразмеров монтажных элементов [18, 24, 27, 130, 133, 205].

Задача 7. В геодезическом куполе на основе трехсотдвадцатигранника имеется возможность такого размещения неправильных шестиугольников и правильных пятиугольников, когда для уменьшения числа опорных узлов и устройства их на одном уровне ниже или выше экватора многогранник купола может быть получен путем разбиения на панели в виде равнобедренных треугольников с вершинами в центрах шестиугольных и правильных пятиугольных пирамид-панелей, которые к тому же будут представлять в основании плоские фигуры, а между пятиугольными и шестиугольными пирамидами-панелями в этом случае располагаются несущие равнобедренные треугольные панели. Также в центрах граней икосаэдра должны быть расположены несущие панели в виде равносторонних треугольников со сторонами, равными сторонам основания панелей в виде правильных пятиугольных пирамид. Эта разрезка выполняется с сохранением минимального числа типоразмеров, которое обеспечит эффективное расположение опорных узлов значительно ниже или выше экватора и на одном, вполне определенном уровне (рисунок 2.46). Условие расположения узлов опор купола на одном уровне, т.е. на одной горизонтальной плоскости обеспечивается, если в равных и симметричных секторах, относительно меридиана, проходящего через середину O_2 ребра икосаэдра, дуги O_2A_2 и O_2B_2 , A_1A_2 и B_1B_2 будут равными.

Если анализировать возможность такого варианта треугольной сети на сфере, приходим к следующим построениям: если вершины граней правильного икосаэдра и середины сторон его граней у экватора имеют равный шаг меридиан в виде секторов 18° , то поставленное условие будет выполняться, если дуги A_1A_2 и B_1B_2 будут равны и симметрично расположены относительно оси-меридиана, проходящего по точке O_2 , находящейся на экваторе (т.е. эти дуги будут иметь значения, равные $x + x$, а дуга B_2A_2 симметрично расположена относительно этого меридиана, как показано на рисунках 2.47, 2.48).

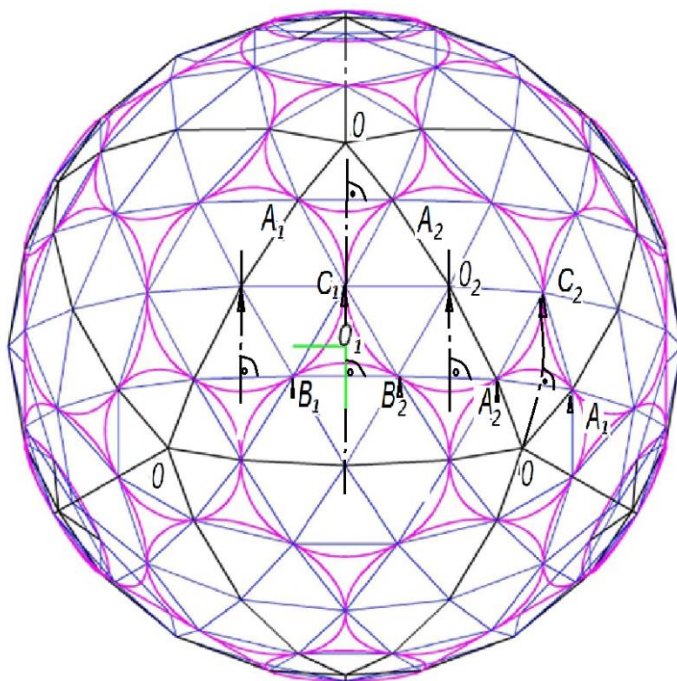


Рис. 2.47. Сфера, составленная из совместимых сферических треугольников (сегментов, представляющих собой $1/6$ грани икосаэдра), с разрезкой треугольной сети в виде 320-гранника, имеющая 4 типоразмеров элементов или 2 типоразмеров монтажных элементов (всего -4 типоразмера); O_0 – центр грани икосаэдра и панели в виде правильного треугольника на сфере; O , O_2 , – центры монтажных панелей в виде плоских шестиугольников и пятиугольников в сегменте.

Разрезка такого купола имеет 4 типоразмера стержней, три типоразмера монтажных элементов, два, но симметричных типоразмера опорного узла. Сопоставление характеристик, которые имеют указанный купол с другими, показывает, что число типоразмеров стержней купола не увеличивается. Зато число монтажных элементов по сравнению с другими, эффективными разрезками уменьшается в полтора раза и становится равным трем, число типоразмеров узлов уменьшается тоже в полтора раза, а опорных узлов в два раза.

На схемах рисунков 2.47 и 2.48 приведено размещение описанных окружностями пятиугольника и шестиугольника в сферическом треугольнике (совместимом сегменте сферического икосаэдра) с внутренними углами 36° , 90° и 60° . Указанное размещение центров окружностей описывающих

неправильные и правильные шестиугольники, выполним для разрезки работе [18]. в виде 320-гранника (рис. 2.47). При условии известного расположения центров окружностей и, соответственно, плоских пятиугольника и шестиугольника, задача формирования треугольной сети на сфере с центрами узлов, расположенных на окружности, параллельной окружности экватора (т.е. на одной отметке), сводится к решению системы уравнений в сферических треугольниках на совместимом сегменте сферы (рис. 2.47).

Размещение (**Задача 7**) равнобедренных треугольников в сферических неправильных шестиугольниках, вписанных в окружности (т.е. таких, которые соответствуют по периметру плоским шестиугольникам), проведем на примере разрезки, показанной на рис. 2.47, и ее фрагменте, показанном на рисунке 2.48. Предварительно определим параметры на одной шестой грани правильного двадцатигранника $O O O$, вписанного в сферу, на сферическом треугольнике $O_1 O O_2$. По условию внутренние углы треугольника $O = 36^\circ$, $O_1 = 60^\circ$, $O_2 = Z + 2Y = 90^\circ$, дуга $d = a + b$.

Используя известные выражения Непера [206] для сторон и углов прямоугольных сферических треугольников, получим

$$\sin 36^\circ \sin a = \sin x, \quad (2.49)$$

$$\sin 60^\circ \sin z = \sin x.$$

где a и b – радиусы окружностей, описывающих шестиугольники и пятиугольники, в виде полярного угла; x , y , c и d – катеты прямоугольных сферических треугольников в виде полярных углов; $2y$ и z – гипотенузы в виде полярных углов.

Из треугольников в центре грани $O_1 D C_1$, $C D O_2$ и $O_1 C_1 O_2$ найдем связи величины c и искомых дуг b , z и x

$$\cos b = \cos c \cos z + \sin c \sin z \cos 60^\circ. \quad (2.50)$$

Из прямоугольных треугольников $C_1 D O_2$ и $C_1 D O_1$ и уравнений (2.49)

$$\sin 60^\circ \sin z = \sin 36^\circ \sin a \quad (2.51)$$

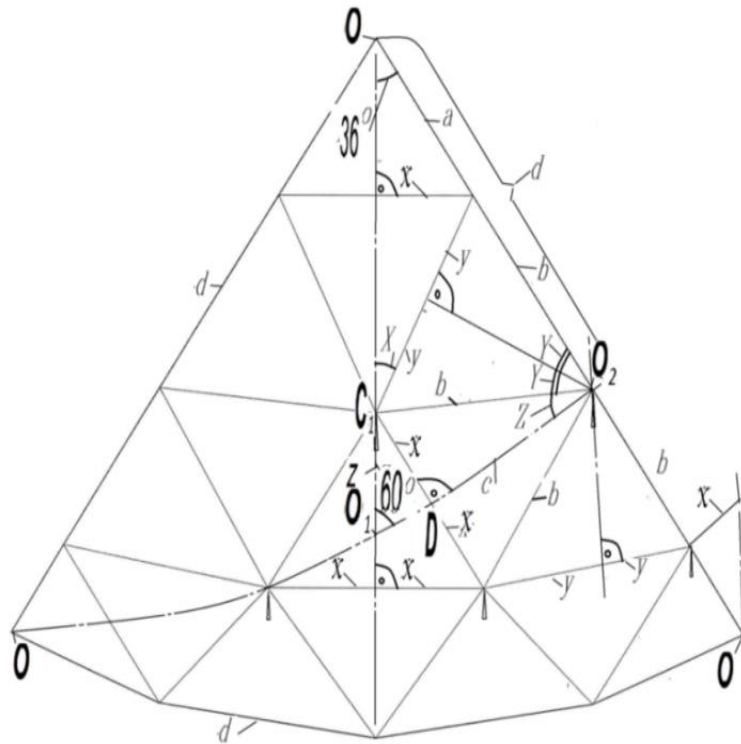


Рис. 2.48. Определение расположения ребер многогранника в сферическом треугольнике $36\text{-}60\text{-}90^\circ$ для условия опорных узлов, расположенных на одном уровне от экватора сферы

Проведем преобразования системы уравнений, используя формулы (2.50, 2.51) сферической тригонометрии [63.206],

$$\sin z = \frac{\sin 36^\circ \sin a}{\sin 60^\circ} ; \quad (2.52)$$

$$1 - \cos^2 z = \frac{\sin^2 36^\circ}{\sin^2 60^\circ} \sin^2 a;$$

Откуда

$$\cos z = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 36^\circ}{\sin^2 60^\circ} \sin^2 a} ; \quad (2.53)$$

Так как $b = d - a$,

подставим в уравнение (2.53) соотношения (2.50 , 2.51 и 2.52)

$$\cos(d - a) = \cos c \sqrt{1 - \frac{\sin^2 36^\circ}{\sin^2 60^\circ} \sin^2 a} + \sin c \frac{\sin 36^\circ \sin a}{\sin 60^\circ} \cos 60^\circ;$$

Обозначим $n = \frac{\sin 36^\circ}{\sin 60^\circ}$

$$\cos(d - a) = \cos c \sqrt{1 - n^2 \sin^2 a} + n \sin c \sin a \cos 60^\circ$$

Откуда

$$\cos d \cos a + \sin d \sin a = \cos c \sqrt{1 - n^2 \sin^2 a} + n \sin c \sin a \cos 60^\circ;$$

$$\cos d \cos a - (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d) \sin a = \cos c \sqrt{1 - n^2 \sin^2 a};$$

$$[\cos d \cos a - (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d) \sin a]^2 = \cos^2 c (1 - n^2 \sin^2 a);$$

$$\begin{aligned} & \cos^2 d \cos^2 a - 2 \cos d \cos a (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d) \sin a + \\ & + (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d)^2 \sin^2 a = \cos^2 c (1 - n^2 \sin^2 a); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cos^2 d (1 - \sin^2 a) - 2 \cos d \sqrt{1 - \sin^2 a} (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d) \sin a + \\ & + (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d)^2 \sin^2 a = \cos^2 c (1 - n^2 \sin^2 a); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cos^2 d (1 - \sin^2 a) - \cos^2 c (1 - n^2 \sin^2 a) + \\ & + (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d)^2 \sin^2 a = \\ & = 2 \cos d \sqrt{1 - \sin^2 a} (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d) \sin a; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [\cos^2 d - \cos^2 d \sin^2 a - \cos^2 c (1 - n^2 \sin^2 a) + \\ & + (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d)^2 \sin^2 a]^2 = \\ & = 4 \cos^2 d (1 - \sin^2 a) (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d)^2 \sin^2 a; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \{ \cos^2 d - \cos^2 c (1 - n^2 \sin^2 a) + [n \sin c \cos 60^\circ - \sin d]^2 - \cos^2 d \} \sin^2 a \}^2 = \\ & = 4 \cos^2 d (1 - \sin^2 a) (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d)^2 \sin^2 a; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \{ [\cos^2 d - \cos^2 c + \cos^2 c n^2 \sin^2 a] + [(n \sin c \cos 60^\circ - \sin d)^2 - \cos^2 d] \sin^2 a \}^2 = \\ & = 4 \cos^2 d (1 - \sin^2 a) (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d)^2 \sin^2 a; \end{aligned}$$

Обозначим $t = \sin a$, $m = (n \sin c \cos 60^\circ - \sin d)^2 - \cos^2 d$,

$$p = \cos^2 d - \cos^2 c.$$

$$(p + n^2 \cos^2 c t^2)^2 + 2mt^2(p + n^2 \cos^2 c t^2) + m^2 t^4 = 4 [m + \cos^2 d] \cos^2 d (t^2 - t^4);$$

$$p^2 + 2pn^2 \cos^2 c t^2 + n^4 \cos^4 c t^4 + 2pmt^2 + 2mn^2 \cos^2 c t^4 + m^2 t^4 =$$

$$= 4 m \cos^2 d t^2 - 4 m \cos^2 d t^4 + 4 \cos^4 d t^2 - 4 \cos^4 d t^4;$$

$$(n^4 \cos^4 c + 2mn^2 \cos^2 c + 4 m \cos^2 d + m^2 + 4 \cos^4 d) t^4 + [2p (n^2 \cos^2 c + m) - 4 m \cos^2 d - 4 \cos^4 d] t^2 + p^2 = 0.$$

$$\text{Обозначим } \beta_1 = n^4 \cos^4 c + 2mn^2 \cos^2 c + 4 m \cos^2 d + m^2 + 4 \cos^4 d$$

$$\beta_2 = 2p (n^2 \cos^2 c + m) - 4 m \cos^2 d - 4 \cos^4 d.$$

Получим биквадратное уравнение относительно функции $\sin^2 a$.

$$\beta_1 t^4 + \beta_2 t^2 + p^2 = 0. \quad (2.54)$$

Решается в явном виде.

$$\text{Подставим } d = 31,71747441146, c = 20,90515744789.$$

$$(0498838998125e+28)x^4 - 0.4268489762778x^2 + 0.02222222222221 = 0.$$

Сделаем замену $y = x^2$, тогда биквадратное уравнение примет вид

$$(0498838998125e+28)y^2 - 0.4268489762778y + 0.02222222222221 = 0.$$

$$\text{Решение уравнения: } t=0,235978, a=13,649279529^0$$

Предлагаемое решение разрезки позволяет значительно упростить решения опорных узлов, а также производить укрупнительную сборку элементов купола, так как основания пирамид остаются плоскими.

2.6. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ФОРМЫ СБОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ПЛОСКИХ ШЕСТИУГОЛЬНЫХ (ПИРАМИДАЛЬНЫХ) ПАНЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИКОСАЭДРА.

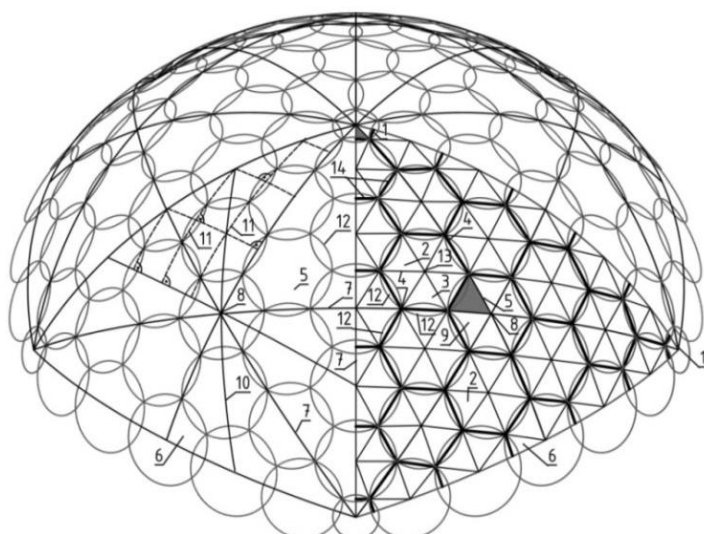
Предлагаемые геометрические схемы членения сферической оболочки разработаны путем использования в качестве исходной основы сферических правильных треугольников (треугольников Мёбиуса) – граней икосаэдра. Сферические части - многогранники геодезической или кристаллической разрезки имеют оси симметрии (вращения и зеркально поворотные), поэтому

для вариантов построения сферических сетей выполнялись разрезы только внутри совместимых сегментов граней, составляющих одну шестую часть этой грани (так называемые сферические треугольники Шварца) икосаэдра (внутренние углы в градусах 36-90-60).

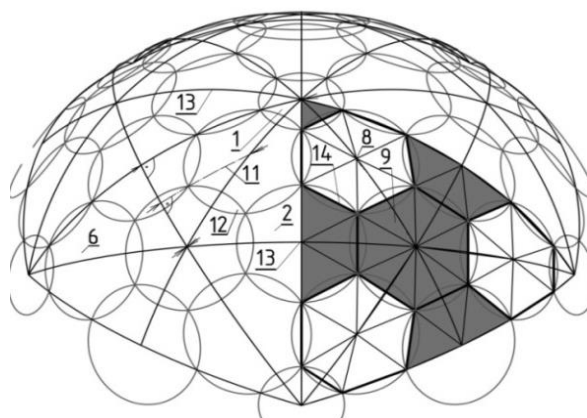
Каждая разновидность разрезки, как геометрическая основа, имеет свои технологические и конструктивные возможности и будет оптимальна только для определенного вида куполов или оболочек.

В работе предложены и исследованы несколько конструктивно-технологических подходов к образованию треугольных сетей на сфере, которые названы «Транеран». Суть предложенных вариантов (рис. 2.49 – 2.51) разрезов «Транеран» [166,4] заключается в том, что сборная сферическая оболочка монтируется из пяти-, шестиугольных панелей с углами, лежащими на сфере. Разнотипные марки таких панелей одинаковым образом расположены в пределах каждой треугольной грани правильного сферического 20-гранника – икосаэдра и имеют на вершинах 20-гранника панели в виде правильных сферических пятиугольников. Пятиугольные, и шестиугольные панели, составленные в свою очередь из треугольных панелей, с углами, лежащими на сфере, одинаковым образом полностью и частично расположены в пределах сферических треугольных сегментов, составляющих одну шестую часть граней сферического правильного 20-гранника. Стороны этих сегментов являются осями симметрии для пятиугольников и шестиугольников панелей. На центрах граней 20-гранника (рис. 2.49 а, б и в) могут быть выполнены панели в виде правильных шестиугольников, на серединах ребер правильного 20-гранника расположены шестиугольные панели (рисунок 2.49). В качестве примера более подробного описания в одном из вариантов разрезов в сборных сферических оболочках на рисунках. 2.49 а, б и в приводятся соединенные между собой панели в виде правильных пятиугольников 1 (окрашено серым цветом) и шестиугольные панели 2, составленные из треугольных панелей 3, с углами 4, лежащими на сфере.

а)



б)



в)

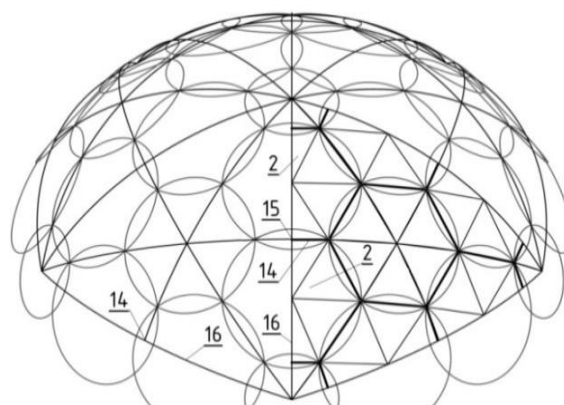


Рис. 2.49. Схемы разрезок сборной сферической оболочки на основе деления 180 и 540-гранника (условно базовых): а – 2160-гранник ; б – 720-гранник; в – собственно 540-гранник; 1 – панель в виде пятиугольника; 2 – панели в виде шестиугольников; 3 – панели в виде треугольника; 4 – узлы соединения панелей; 5 – сферические треугольные сегменты; 6 – грани правильного 20-гранника; 7 – стороны сферического сегмента; 8 – центр грани ; 9 – панели в виде правильных шестиугольников (окрашено серым цветом); 10 – дополнительные оси через центр грани; 11 – оси не через центр.

Панели одинаковым образом расположены внутри сферических сегментов 5, составляющих одну шестую часть граней 6 правильного 20-гранника, а стороны этих сегментов 5 являются осями симметрии 7, на центрах 8 граней 6 правильного 20-гранника выполнены панели в виде правильных шестиугольников 9 (окрашено серым цветом). Через центры 8 граней 6 правильного 20-гранника проходят дополнительные оси симметрии 10,

являющиеся главными окружностями сферы в пределах каждого сферического сегмента 5. Внутри этих сегментов 5 могут быть дополнительные чередующиеся оси симметрии 11, являющиеся главными окружностями сферы, которые не совпадают с центрами 8 граней 6 сферического правильного 20-гранника, шестиугольные панели 2 выполнены с углами 4, описанными окружностями 12 со своими радиусами из центров 13 панелей 1 и 2, которые лежат на сфере и могут быть размещены на осях симметрии 7 и 11. При этом каждый угол 4 пятиугольных 1 и шестиугольных 2 панелей принадлежит трём смежным панелям и выполнен в точке пересечения соответствующих трех окружностей 12, а шестиугольные панели, расположенные симметрично относительно дополнительных осей 11, имеют равные радиусы и длины ребер 14.

В сборной сферической оболочке (рис. 2.50 а, б и в) на центрах 8 граней 6 правильного 20-гранника, могут быть расположены углы 4, принадлежащие трем смежным шестиугольным 2 панелям. В сборной сферической оболочке (рис. 2.50 б) на серединах ребер граней 6 правильного 20-гранника могут быть расположены ребра, принадлежащие двум смежным шестиугольным панелям 2.

На общем виде оболочки (рис. 2.49 в), в местах расположения пятиугольных 1 и шестиугольных 2 панелей, по форме окружностей, которыми панели описаны, показано как могут быть выполнены панели в виде сферических кругов увеличенного радиуса 17, причем смежные круговые панели соединены внахлест 18 по углам 4 и открытому контуру 19 панелей. В сборной сферической оболочке, показанной на рисунке 2.49 а, б, пятиугольные 1 и шестиугольные 2 панели могут быть выполнены в виде плоских панелей 1 и 2, описанных окружностями с центрами, лежащими в плоскости панелей, и соединены по всей длине прямолинейных смежных ребер.

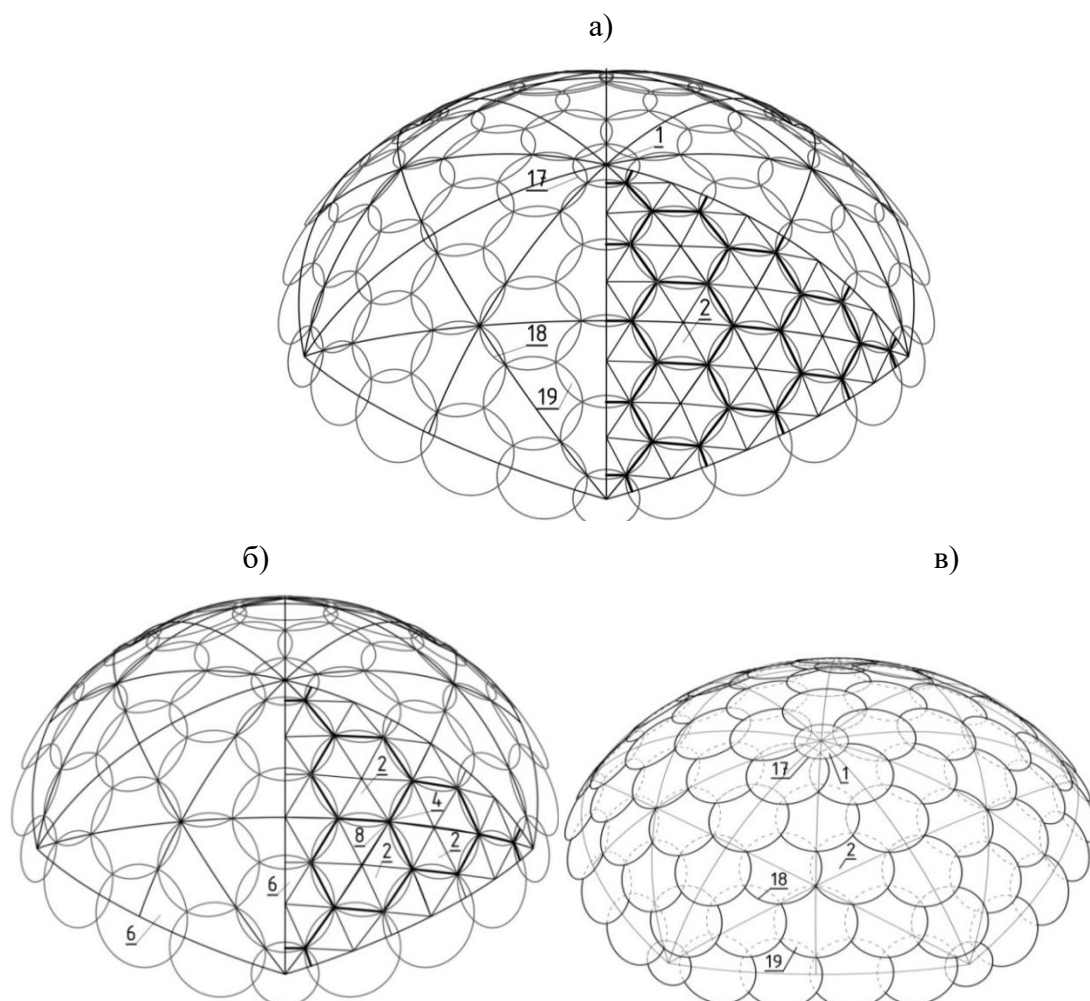


Рис. 2.50. Схемы разрезов сборной сферической оболочки на основе деления 240 и 1500-гранника (условно базовых): а – собственно 1500-гранник ; б – 960-гранник; в – 960-гранник чешуйчатой конструкции; 1 – панель в виде правильного плоского пятиугольника; 2 – панели в виде плоских шестиугольников; 3 – панели в виде треугольника; 4 – узлы (и углы шестиугольников) соединения панелей; 5 – сегменты, составляющую одну шестую часть 20-гранника; 6 – грани правильного 20-гранника; 7 – стороны сегмента; 8 – центр грани правильного 20-гранника.

На сферических треугольных сегментах 5 (рис. 2.51 и 2.52), каждый из которых составляет одну шестую часть грани 6 правильного 20-гранника, на центрах 8 граней 6 правильного 20-гранника, могут быть расположены центры 13 шестиугольных 2 панелей. На сферических сегментах 5 (рис. 2.51, 2.52, 2.53) могут быть дополнительные чередующиеся оси симметрии 11, являющиеся главными окружностями сферы (показаны вне сферического треугольника разными стрелками), которые не совпадают с центрами 8 граней 6

сферического правильного 20-гранника, шестиугольные панели 2 выполнены с углами 4, описанными окружностями 12 со своими радиусами из центров 13 панелей 1 и 2, лежащих на сфере, при этом каждый угол 4 пятиугольных 1 и шестиугольных 2 панелей будет принадлежать трём смежным панелям и выполнен в точке пересечения соответствующих трех окружностей 12, а шестиугольные панели, расположенные симметрично относительно дополнительных осей 11, имеют равные радиусы и длины ребер 14. На сферических треугольных сегментах 5 (рис. 2.51 а, б, в, г, д, е) на центрах 8 граней 6 правильного 20-гранника, могут быть расположены углы 4, принадлежащие трем смежным шестиугольным 2 панелям. На сферических сегментах 5 (рис. 2.51 а, в, г; 2.53 в, г), каждый из которых составляет одну шестую часть грани 6 правильного 20-гранника, на серединах 15 ребер 16 граней 6 правильного 20-гранника могут быть расположены ребра 14, принадлежащие двум смежным шестиугольным панелям 2.

На сферических треугольных сегментах рисунка 2.51 а показана разрезка 180-гранника на сфере, имеющего ребра трех типоразмеров; на рисунке 2.51 б – разрезка 720-гранника на сфере, имеющего ребра 6-ти типоразмеров; на рисунке 2.51 в – разрезка 1620-гранника на сфере, имеющего ребра 10-ти типоразмеров; на рисунке 2.51 г – тоже разрезка 1620-гранника на сфере с другими дополнительными осями. Число ребер N последующих многогранников, может быть определено из формулы $N = 180 n^2$ (где n - условное число членений ребер на подоснове в виде 180-гранника).

После размещения окружностей, затем оптимизации параметров треугольной сети, положение центров либо углов шестиугольников будет совпадать с положением сторон треугольных сферических сегментов, составляющих одну шестую часть грани сферического 20-гранника, либо с дополнительными осями симметрии в виде главных линий сферы для остальных шестиугольников.

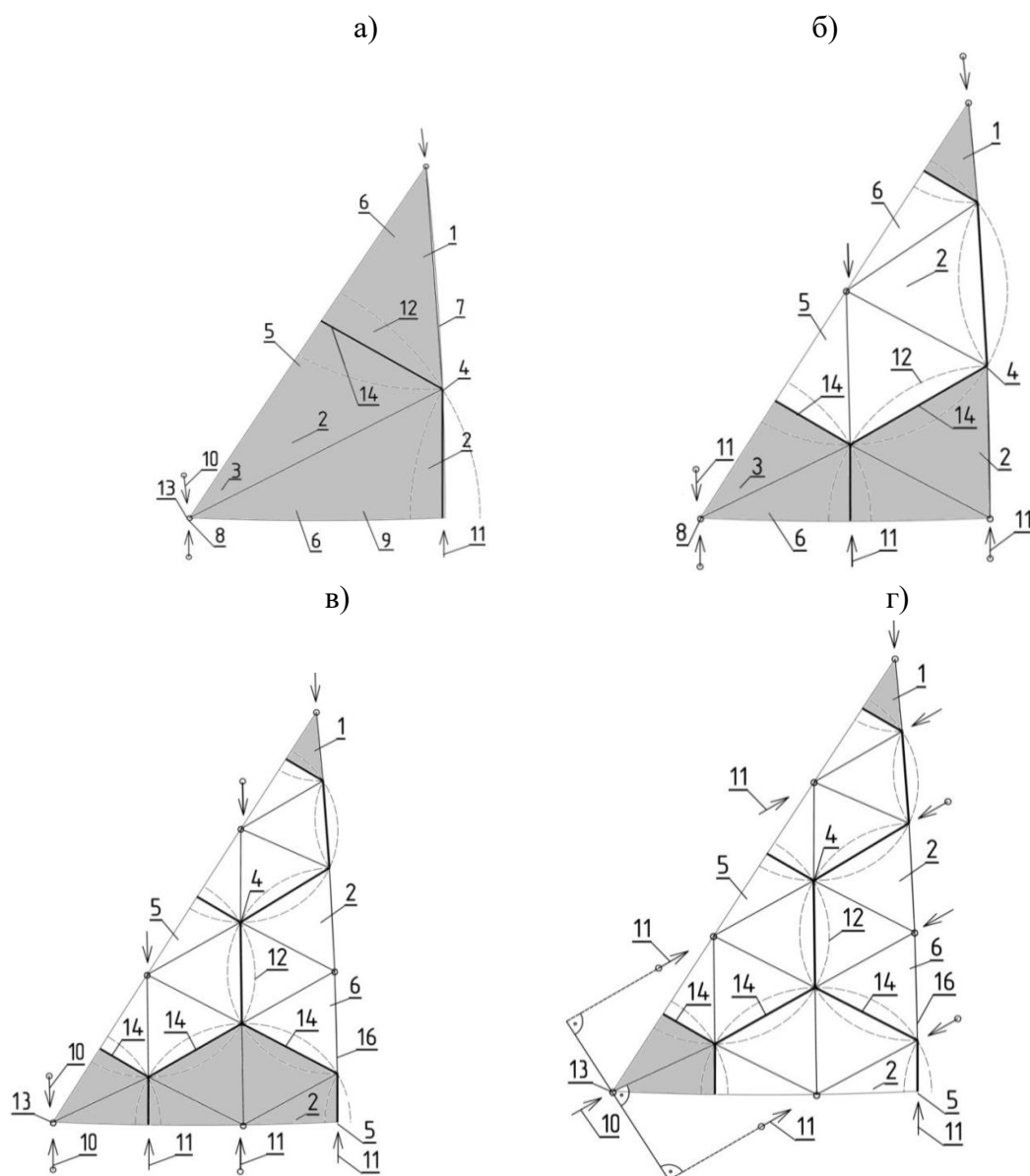


Рис. 2.51. Совместимые сегменты сборной сферической оболочки: а – 180-гранника; б – 720-гранника; в – 1620-гранника; 1 – панель в виде правильного плоского пятиугольника (окрашено серым цветом); 2 – панели в виде шестиугольников; 3 – панели в виде треугольника; 4 – узлы соединения панелей; 5 – сегменты, составляющую одну шестую часть грани 20-гранника; 6 – грани правильного 20-гранника; 7 – стороны сегмента; 8 – центр грани; 9 – панели в виде правильных шестиугольников (окрашено серым цветом).

Однако на переходе к пятиугольной панели центры шестиугольных панелей, в основном, становятся привязанными к сторонам сегментов – осям симметрии, которые являются главными ограничениями. Это вызвано также необходимостью не только снижения числа типоразмеров за счет равных

радиусов окружностей и использования правильных шестиугольников, но и обеспечения в переходных шестиугольниках углов близких к 60° .

На сферических треугольных сегментах на рисунке 2.52 а показана разрезка 540-гранника на сфере, имеющего ребра 5-ти типоразмеров, на рисунке 2.52 б – разрезка 2160-гранника, имеющего ребра 12-ти типоразмеров; на рисунке 2.52 в также показана разрезка 2160-гранника на сфере, но с другим расположением осей симметрии; на рисунке 2.52 г показана разрезка 2160-гранника на сфере с третьим расположением осей симметрии. Число ребер N последующих многогранников, может быть определено из формулы $N = 540 n^2$ (где n – условное число членений ребер на подоснове в виде 540-гранника). На сферических сегментах на рисунке 2.53 а показана разрезка 240-гранника на сфере, имеющего ребра 4-х типоразмеров; на рисунке 2.53 б – разрезка 960-гранника на сфере, имеющего ребра 7-ми типоразмеров; на рисунке 2.53 в – разрезка 1500-гранника на сфере; на рисунке 2.53 г – тоже разрезка 1500-гранника на сфере, но с другим расположением осей симметрии и имеющего ребра 8-ми типоразмеров; на рисунке 2.53 д – разрезка 2940-гранника на сфере; на рисунке 2.53 е – тоже разрезка 2940-гранника на сфере, имеющего ребра 14-ти типоразмеров, но с другим расположением осей симметрии. Число ребер N последующих многогранников, может быть определено из формулы $N = 240 n^2$ (где n - условное число членений ребер на подоснове в виде 240-гранника, например: 240, 960, 2160, 3860 и т.д.).

Для разработки алгоритма геометрического расчета разрезов, предлагаемых конструктивно-технологических систем, воспользуемся повторяемостью параметров сети на любом сферическом треугольнике Шварца (икосаэдра, октаэдра или тетраэдра) и, соответственно, на любом совместимом сферическом треугольнике или в сферическом секторе. При решения указанной проблемы предложены также автоматизированные средства в системах AutoCAD и LIRA 9.4, дополненных программными элементами.

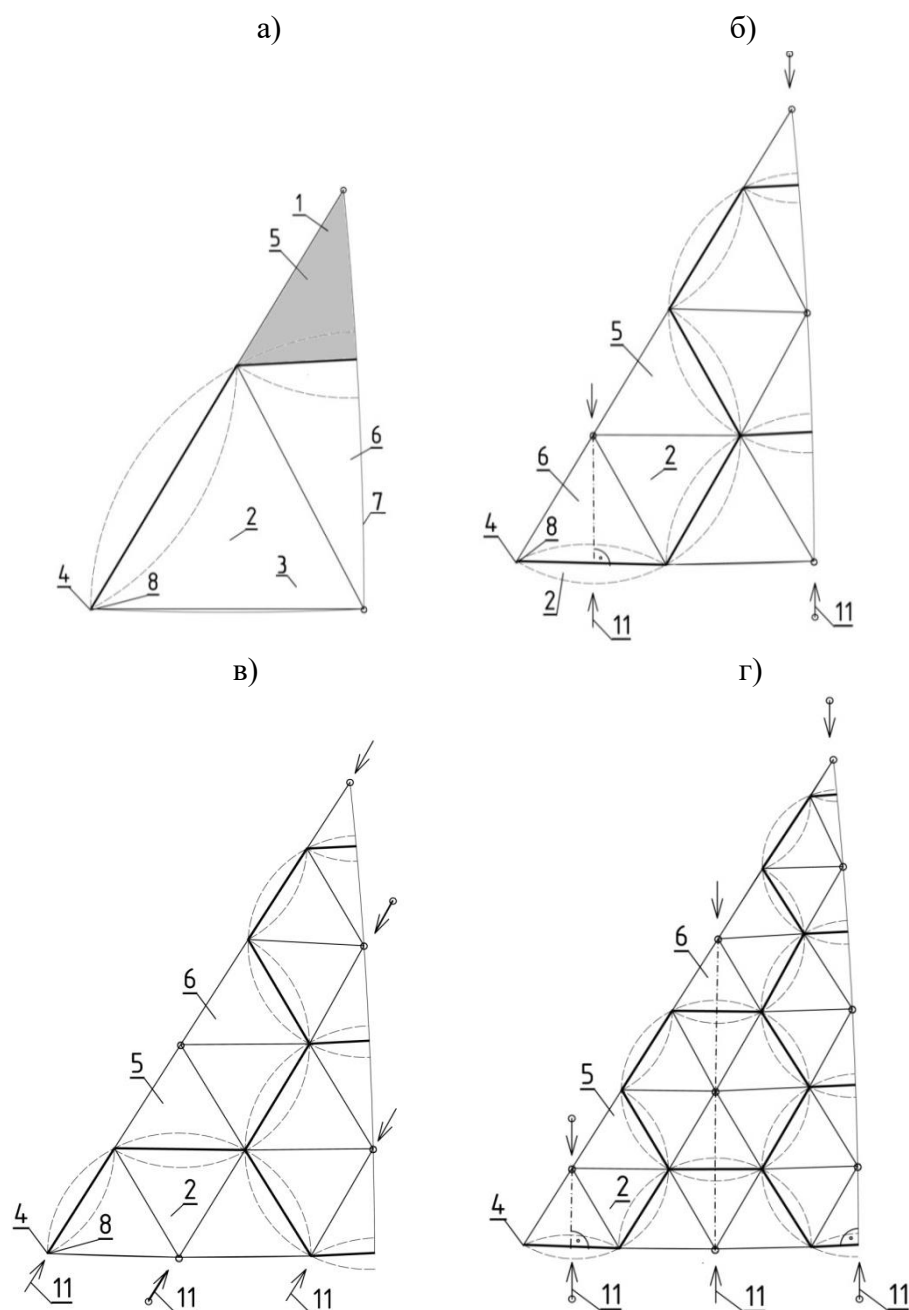


Рис. 2.53. Сегменты сборной сферической оболочки: а – 240-гранника; б – 960-гранника; в – 1500-гранника; г – 1500-гранника с дополнительными осями; 1 – панели в виде правильного пятиугольника; 2 – панели в виде шестиугольников; 3 – панели в виде треугольника; 4 – узлы; 5 – сферические треугольные сегменты, составляющую одну шестую часть грани; 6 – грани 20-гранника; 7 – стороны сегмента; 8 – центр грани.

На рисунке 2.54 показано расположение панелей в одном из эффективнейших вариантов разрезки – 1620-граннике, реализующем все конструктивно-технологические возможности предложенного способа разбивки сферы.

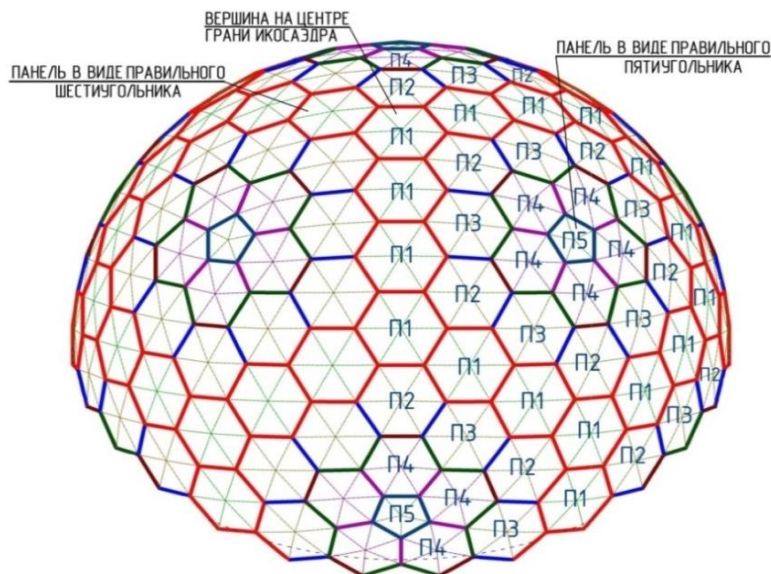


Рис. 2.54. Схема сборной оболочки с разрезкой 1620-гранника, состоящего из ребер 10-ти типоразмеров ребер или из двух правильных пятиугольной и шестиугольных панелей, трех неправильных шестиугольных панелей (П1-П5).

На рисунке 2.53 а показано расположение линии вспомогательного экватора сферы, проведенного по короткой стороне треугольника Шварца или посередине стороны-ребра грани икосаэдра. Дополнительные меридиональные оси – главные линии (окружности) выполнены, соответственно, под прямыми углами к экватору. Меридианы здесь будут располагаться с равным шагом, поэтому первый ряд окружностей дает правильные шестиугольники, второй ряд равных окружностей дает два неправильных шестиугольника, но одного радиуса (рис. 2.53). Третий ряд, а точнее, одна окружность выполнена с центром, смещенным по длинной стороне треугольника Шварца и дает неправильный шестиугольник (см. рис. 2.55 а). На рисунке 2.55 б показаны длины ребер разрезки в виде «1620-гранника, составляющие 10-ти типоразмеров и, которые позволяют собирать этот купол из двух правильных пятиугольной и шестиугольных панелей, трех неправильных шестиугольных панелей. Для части подобных типов разрезов эффективные решения получены Р. Б. Фуллером (США), у которого число типов ребер M определяется по формуле $M = 2m$, где m – число членений ребер основы 60-гранника (1500-гранник – 10 типоразмеров). Для подобных разрезов эффективные решения

получены М.С. Туполевым, у которого число типов ребер N определяется по формуле $N = n(n+1)3/2$, где n – число членений ребер основы 180-гранника (1620-гранник – 18 типоразмеров). На рисунке 2.54 выполнены варианты укрупнительной сборки, а затем последовательность сборки укрупненных элементов купола показана на рисунке 2.55.

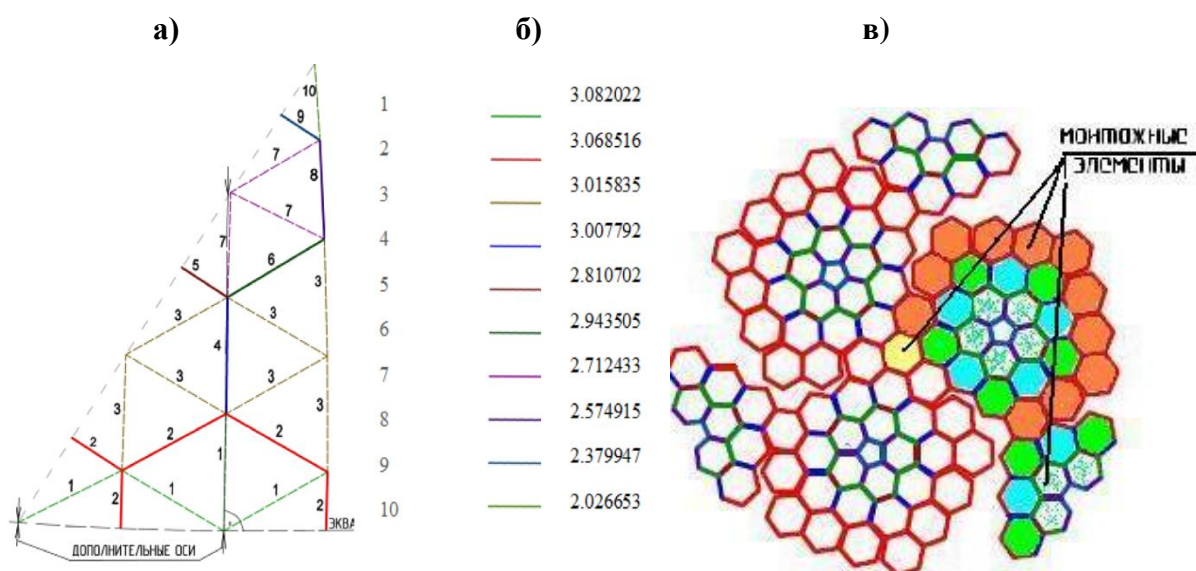


Рис. 2.55. Монтажные элементы и блоки сборной сферической оболочки: а) – схема расположения панелей и элементов, цифрами пронумерованы ребра, радиусы пунктиром; б) номера и длины ребер в м для диаметра сферы 44 м, в) – схема блокировки панелей.

В работе [166] даны координаты для оболочки в виде «1620-гранника» – для купола со сферическим диаметром 44 м. Она позволяет вычертить основные архитектурно-строительные чертежи покрытия здания, монтажные схемы (см. рис. 2.54) и их фрагменты в любом ракурсе, выполнить конструирование купола, а также все статические и динамические расчеты.

2.7. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СТЕРЖНЕВЫХ ОБОЛОЧЕК КУПОЛОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ВЕСА, МИНИМУМА ТИПОРАЗМЕРОВ И ТРУДОЗАТРАТ.

Оптимизация треугольной геометрической сети на сфере по критерию минимума типоразмеров элементов может быть представлена как было сказано выше как постоптимизация и решена размещением в системе неправильных

шестиугольников, вписанных в окружности минимальных размеров, максимума правильных шестиугольников, например, в совместимых сферических треугольниках (сегментах) икосаэдра со схемами разрезки, показанными на рисунке 2.34.

Кроме вариантов применения свойств симметрии главных и параллельных линий окружностей сферы, в подобных разрезках должны быть реализованы возможности центральной симметрии окружностей [3-19]. На схемах рисунка 2.36 приведено размещение описанных окружностями шестиугольников в сферическом треугольнике (совместимом сегменте сферического икосаэдра) с внутренними углами 36, 90 и 60° работе [167]. При оптимизации треугольной сети с помощью симметрии окружностей и главных линий сферы можно выделить как одну из промежуточных задач – определение положения центров окружностей шестиугольников, (рисунки 2.34: центры первых рядов шестиугольников O_0, O_1, O_2). «Постоптимизация» по критерию минимума типоразмеров элементов здесь проведена размещением в системе неправильных шестиугольников, вписанных в окружности минимальных размеров с центрами O_1 и O_2 , максимума правильных шестиугольников (рис. 2.34). Целевая функция будет выглядеть, как минимум среднеквадратического отклонения центральных внутренних углов только шестиугольников по отношению к углу 60°

$$\sum_{i=1}^{n-1} (A_i - 60^\circ)^2 + (B_i - 60^\circ)^2 + (C_i - 60^\circ)^2 + (D_i - 60^\circ)^2 \rightarrow \min. \quad (2.55)$$

Углы A_i, B_i, \dots связаны соотношениями, подобными (2.30-2.32), т.е. окружности, в которые вписаны шестиугольники, либо касаются, либо пересекаются.

Оптимальное значение отклонений углов для пары шестиугольников, вписанных в окружности с неизменным расположением их центров, для схемы разрезки на рисунке 2.36, очевидно равно: $A_1 - 60^\circ = A_2 - 60^\circ = -0.826834^\circ, B_1 - 60^\circ = -0.826834^\circ, B_2 - 60^\circ = -0.413417^\circ, C_2 - 60^\circ = 0.413417^\circ, D_2 - 60^\circ = 0$.

Автором в работе [15] предложены варианты оптимизации преднапряжения сквозных стержневых сферических оболочек по критерию массы с различной степенью статической неопределимости конструкций. Эта оптимизация наиболее хорошо работает при применении гибких связей или стержней с односторонними связями. Целевая функция для соответствующих ограничений может быть выражена для расчетного сочетания нагрузок в виде зеркальных функций Радцига:

$$y = \sum_{i=1}^n | \dot{N}_{i1}^0 X_1 + \dot{N}_{i2}^0 X_2 + \dots + \dot{N}_{i0}^0 X_k + \dot{N}_{ip}^0 | \frac{l_i}{R_i} \gamma_i \rightarrow \min \quad (2.56)$$

\dot{N}_{i1}^0 – усилие – вектор в j – стержне от единичного усилия в i – стержне;

X_α – усилие предварительного напряжения в лишнем стержне ;

\dot{N}_{ip}^0 - усилие стержне статически неопределимой системы от нагрузки.

R_i - расчетное сопротивление материала стержня;

l_i – длина стержня.

Если известно расположение сжатых и растянутых стержней, то с ограничениями целевая функция может быть выражена в виде

$$y = - \sum_{i=1}^n (\dot{N}_{i1}^0 X_1 + \dot{N}_{i2}^0 X_2 + \dots + \dot{N}_{i,k}^0 X_k + \dot{N}_{ip}^0) \frac{l_i}{R_i} \gamma_i + \\ + \sum_{j=1}^m (\dot{N}_{j1}^0 X_1 + \dot{N}_{j2}^0 X_2 + \dots + \dot{N}_{j,k}^0 X_k + \dot{N}_{jp}^0) \frac{l_j}{R_j} \gamma_j \rightarrow \min. \quad (2.57)$$

Для решения задачи симплекс-методом систему оптимизации нужно представить в вид

$$\begin{aligned}
& \left(\sum_{j=1}^m \dot{N}_{j1}^0 \frac{l_j}{R_j} \gamma_j - \sum_{i=1}^n \dot{N}_{i1}^0 \frac{l_i}{R_i} \gamma_i \right) X_1 + \left(\sum_{j=1}^m \dot{N}_{j2}^0 \frac{l_j}{R_j} \gamma_j - \sum_{i=1}^n \dot{N}_{i2}^0 \frac{l_i}{R_i} \gamma_i \right) X_2 + \dots \\
& \dots + \sum_{j=1}^m \dot{N}_{j,m}^0 \frac{l_j}{R_j} \gamma_j - \sum_{i=1}^n \dot{N}_{i,n}^0 \frac{l_i}{R_i} \gamma_i \Big) X_n + y_0 = \\
& \sum_{i=1}^n \dot{N}_{ip}^0 \frac{l_i}{R_i} \gamma_i - \sum_{j=1}^m \left(\dot{N}_{jp}^0 \right) \frac{l_j}{R_j} \gamma_j; \tag{2.58}
\end{aligned}$$

с ограничениями

$$\dot{N}_{i1}^0 X_1 + \dot{N}_{i2}^0 X_2 + \dots + \dot{N}_{i,k}^0 X_k + y_1 = -\dot{N}_{ip}^0;$$

...

$$\dot{N}_{j1}^0 X_1 + \dot{N}_{j2}^0 X_2 + \dots + \dot{N}_{j,k}^0 X_k + y_{i1} = -\dot{N}_{jp}^0;$$

...

$$X_\alpha \geq 0; \alpha = 1, 2, \dots, k.$$

где $\dot{N}_{ip}^0, \dot{N}_{jp}^0$ - усилия от сочетания нагрузки в i, j - стержне статически определенной системы, образованной из заданной, путём удаления лишних связей; $\dot{N}_{i,k}^0, \dot{N}_{j,k}^0$ - усилия от единичной силы, заменяющего лишнюю связь; X_k - неизвестные усилия с учетом преднапряжения в лишнем стержне, с номером k ; R_i - расчетное сопротивление материала стержня; l_i - длина стержня; γ_i - жесткостная характеристика материала стержня.

Уточнением выводов работы по применению данного метода должно быть использование его только для отдельных сочетаний нагрузок. При современном развитии программных средств не уменьшает значения данного подхода.

Оптимизация, проведенная численными методами для структуры параграфа 2.4.1 (рис. 2.19-2.22), может быть представлена изолиниями масс конструкций при различных сочетаниях жесткости опор, высоты подъема конструкции, расстояния между поясами (рис. 2.21, 2.22). Проанализировав данные графиков, можно сказать, что меньшую массу будет иметь конструкция

со стойками повышенной жесткости, высокие в подъеме и с малыми расстояниями между поясами.

2.8. КЛАССИФИКАЦИЯ СЕТЧАТЫХ И ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Определение эффективности разрезки с применением технологических подходов для простейших случаев может быть реализовано с учетом интенсивности использования возможностей симметрии окружностей, описывающих шестиугольники в предлагаемых треугольных сетях на сфере (рис. 2.56). Достаточно определить к какой категории (Π , P , C , T , Y или Φ - количество разных радиусов шестиугольников, соответствующих данной категории) относятся шестиугольники и количество совпадений (одинаковых) их радиусов и контурных элементов X , тогда можно посчитать число типоразмеров элементов треугольной сети работе [3-19, 166-168]:

$$N = 2\Pi + 3P + 4C + 5T + 6Y + 7\Phi - X. \quad (2.59)$$

При разбивках без промежуточных треугольников следует учитывать уменьшение типоразмеров, так как три элемента каждой шестиугольной пирамиды принадлежат и смежным шестиугольникам (уменьшение на 1,5 типоразмера для каждой пирамиды)

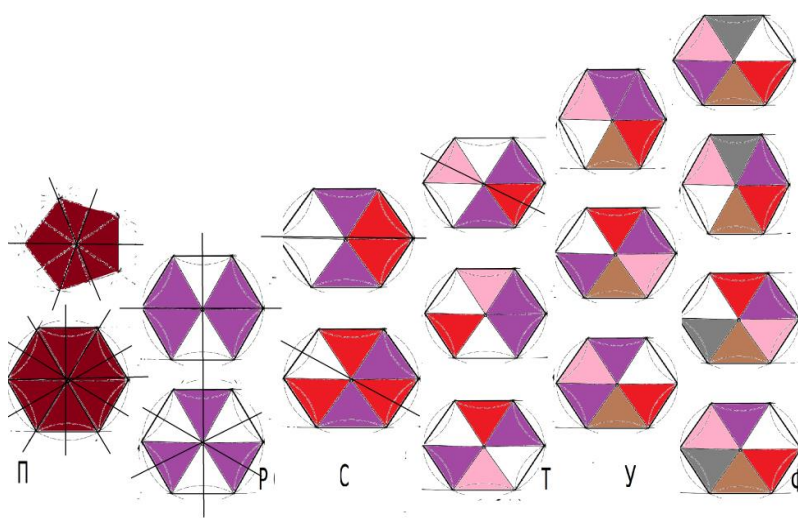


Рис. 2.56. Число типоразмеров у фигур для вариантов симметрии: для фигур Π - 2 (правильные шестиугольники или пятиугольники и т.п.); P - 3; C - 4; T - 5; Y - 6; Φ - 7.

На основе предложенных способов разбиения сферы внутри совместимых треугольников (сегментов) $360/n-90-90^\circ$ составлены базовые сферические структуры, которые предоставляют следующие четыре системы разбивки оболочки:

- одноконтурная система из плоских или пространственных шести- и пятиугольников с треугольниками между ними (система «ТAnT1 — рис. 2.1);
- одноконтурная система из плоских или пространственных шести- и пятиугольников с треугольниками между ними (система «ТAnT2 — рис. 2.2);
- двухконтурная система, состоящая из пяти- и шестигранных пирамид, вершины которых соединены стержнями (система «ТAnТПС1» — рис. 2.1);
- двухконтурная система, состоящая из пяти- и шестигранных пирамид, вершины которых соединены стержнями (система «ТAnТПС2» — рис. 2.2).

Классификация разрезов проведена путем буквенной индексации видов разрезов и цифрового обозначения отдельных типов разрезов внутри системы. Приняты следующие обозначения для различения разрезов на сфере: разрезы на совместимых сферических треугольниках, составляющих 30 часть сферы обозначаются двумя или тремя большими буквами («ТА30Т», «ТА30ТПС», и т. п.), что означает, соответственно, однополосную, двухполосную или пространственную стержневую системы, которые делят полусферу на 30 сегментов и состоящую из шестиугольников из треугольников. Способы образования шестиугольных сетей с треугольниками обозначены дополнительными цифровыми и буквенными индексами. Способ «ТА30°Т» — это такая разбивка, которая делит полусферу на сегменты 30° , и состоящую из шестиугольников и из треугольников, что позволяет собирать сферический купол из стержней и плоских (складчатых, сферических и произвольно пространственных) шестиугольных и треугольных панелей (см. рис. 2.1-2.9). Разрезы способа «ТА30ТПС» дают возможность собирать двухсетчатый (двухполосной) купол такой же разрезки, что и у однополосных

куполов, но из шестиугольных пирамидальных стержневых и пространственных элементов(см. рис. 2.1-2.9).

На основе разбиения сферы с помощью секторов 60° и 120° , составлены базовые сферические структуры, которые предоставляют следующие четыре системы разбивки оболочки:

- одноконтурная система из плоских или пространственных шестиугольников с треугольниками между ними (система «ТАТ 60° » — рис. 2.9, 2.13);

- одноконтурная система из плоских или пространственных шестиугольников с треугольниками между ними (система «ТАТ 120° » — рис. 2.10, 2.14);

- двухконтурная система, состоящая из шестиугольных пирамид, вершины которых соединены стержнями с треугольниками между ними (система «ТАТ 60° ТПС» — рис. 2.9, 2.11, 2.13);

- двухконтурная система, состоящая из шестиугольных пирамид, вершины которых соединены стержнями с треугольниками между ними (система «ТАТ 120° ТПС» — рис. 2.11, 2.14).

Системы разрезов оболочек определенного способа образования обозначены цифровыми и буквенными индексами.

На основе разбиения сферы с помощью секторов 60° и 120° , состоящих из только плоских шестиугольных панелей (или пирамид), составлены базовые сферические структуры, которые предоставляют следующие шесть систем разбивки оболочки:

- одноконтурная система из плоских или пространственных шестиугольников (система «ТА 60° » — рис. 2.15);

- из плоских или пространственных шестиугольников(пирамид) (система «ТА 120° » — рис. 2.14);

- двухконтурная система, состоящая из шестиугольных пирамид, вершины которых соединены стержнями (система «ТА60°ПС» — рисунки 2.15, 2.16);
- двухконтурная система, состоящая из пирамид, вершины которых соединены стержнями (система «ТА120°ПС °» — рис.2.14);
- одноконтурная система, состоящая из составных сетчатых сферических оболочек в виде сборных шестиугольных модулей с доборными элементами(система «ТА60°С» — рис. 2.17-2.19);
- двухконтурная система, состоящая из составных сферических оболочек(структур) в виде сборных шестиугольных модулей с доборными элементами(система «ТА60°ПСС» — рис. 2.18-2.20).

На основе разбиения сферы с помощью сегментов, составляющих одну шестую часть грани(так называемых сферических треугольником Мёбиуса) икосаэдра, формирующихся только из плоских пятиугольников и шестиугольников и треугольников между ними составлены следующие две базовые системы, которые предоставляют два способа разбивки сферы:

- одноконтурная система из плоских или пространственных шести- и пятиугольников с треугольниками между ними (система «20ТАТ320» — рис. 2.28-2.46);
- двухконтурная система, состоящая из пяти- и шестигранных пирамид, вершины которых соединены стержнями (система «20ТАТ320ПС» — рис. 2.28-2.46).

Классификация разрезов проведена путем буквенной индексации видов разрезов и цифрового обозначения отдельных типов разрезов внутри системы (см. рис. 2.28-2.48). Приняты следующие обозначения для различения разрезов на сфере: разрезки на икосаэдральных треугольниках обозначаются цифрой 20, а также одной, двумя или тремя большими буквами («20ТАТ320», «20ТАТ320ПП», «20ТАТ320ПС» и т. п.), что означает, соответственно, системы «Транер» пятиугольниками, шестиугольниками и треугольниками между ними.

Далее следует цифра, означающая количество треугольных граней на сфере и однополосную, двухполосную или пространственную стержневую системы.

На основе разбиения сферы с помощью сегментов, составляющих одну шестую часть грани (так называемых сферических треугольником Мёбиуса) икосаэдра), формирующихся только из плоских пятиугольников и шестиугольников (пирамид) составлены следующие две базовые системы, которые предоставляют два способа разбивки сферы:

- однополосная (одноуровневая) система из плоских или пространственных шести- и пятиугольников (система «20ТА180» — рис. 2.49-54);
- двухполосная (двухуровневая) система из плоских или пространственных шести- и пятиугольников в одном из поясов («20ТА540» — рис. 2.49-54).

Выводы по главе 2

В данной главе приведены теоретические обоснования возможности конструктивно-технологического формообразования с помощью окружностей на сфере и применения рациональных опорных сетей для центров этих окружностей:

1. Исследованы теоретически перспективные геометрические формы сетчатых сборных сферических оболочек с шестиугольными, треугольными и на вершинах n-угольными панелями. Разработаны геометрические формы сетчатых сборных сферических оболочек в виде секторов с шестиугольными и треугольными панелями.

2. Разработана теория конструктивно-технологического формообразования на стадии геометрии разрезов сетчатых сборных сферических оболочек в виде секторов из плоских и пирамидальных шестиугольных панелей. Выполнена программа расчета геометрических параметров.

3. Проведено обоснование разрезки двухсетчатого модуля для составного структурного покрытия. Предложены побочные эффективные формы сетчатых

оболочек положительной и отрицательной кривизны из сборных плоских правильных шестиугольных панелей.

4. Исследовано конструкционно-технологическое формообразование сборных сферических оболочек из сборных плоских шестиугольных и треугольных панелей на основе икосаэдра, и, соответственно, для октаэдра и тетраэдра. Предложена теория геометрического формообразования сборных сферических оболочек из сборных плоских шестиугольных панелей на основе икосаэдра.

5. Уточнена теория оптимизации предварительного напряжения пространственной стержневой конструкции с односторонними связями по критерию минимума веса;

6. Проведена классификация конструктивно-технологических форм сетчатых и геодезических сферических оболочек.

3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СБОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ КУПОЛОВ-ОБОЛОЧЕК.

3.1.1. Особенности расчетных моделей сборных геодезических куполов-оболочек.

Возможности предлагаемых сборных панельных или пирамидально-каркасных геодезических куполов-оболочек позволяют эффективно решать задачи проектирования впаарушенных конструкций покрытий зданий. Собранные из укрупненных элементов - панелей купола-оболочки имеют повышенную жесткость и это обеспечивает их общую и местную устойчивость. Однако включение проёмов, разрежение несущих элементов усложняет работу геодезического купола и делает эту систему сквозной стержневой сферической оболочкой.

Предлагаемые ниже конструктивные решения куполов-оболочек на основе новых разрезов, представленных в гл. 2 могут быть использованы при создании одноясных или двухясных оболочек, изготавливаемых из различных материалов. Обычно одноясные оболочки применяются при небольших и средних перекрываемых пролетах, а двухясные – при средних и больших пролетах. Кроме того, на конструкции оболочек влияют функциональные назначения зданий, которые могут быть отапливаемыми или неотапливаемыми, стационарными или временными, а также особенности их нагружений, а именно, необходимость восприятия подвешиваемых к ним сосредоточенных нагрузок. Отметим, что конструкции сборных оболочек на основе указанных разрезов могут изготавливаться из различных материалов, но пока предпочтение отдается стали и дереву.

Для оценки предложенных конструктивно-технологических решений проведен анализ проектирования стальных куполов небольших пролетов с

соотношениями стрелы подъема к пролету более 0,5-0,6, особенно востребованных для вспомогательной застройки. Но многие выводы могут быть применены и для вспарушенных куполов наиболее эффективных пролетов от 30 до 100 м. Разработанные купола-оболочки имеют предложенные в главе 2 разрезки на основе геодезического 320-гранника по приведенной классификации 20ТАТ320 [4].

При проектировании купола из пирамидальных стальных каркасных панелей должны быть определены значения геометрических отклонений и параметров геометрии конструкции при расчете по деформированной схеме, а также задачи теоретической оценки величины критической узловой нагрузки. Также необходимо иметь в виду, что при сборке купола имеется возможность сортировки уже изготовленных деталей по размерам для укрупнительной сборки панелей и затем сортировки самих панелей для их размещения в системе покрытия. Это уже естественным способом позволяет произвести рациональную раскладку панелей с учетом деформированных схем покрытий. С помощью сортировки и зеркальной укрупнительной сборки панелей можно преодолеть влияние несовершенств на формирование начальных форм потери устойчивости сетчатого или геодезического купола.

В геодезических куполах предлагаемых разрезов имеется возможность такого размещения неправильных шестиугольников и правильных пятиугольников, когда обеспечивается уменьшение не только числа типоразмеров элементов, но и числа типоразмеров опорных узлов, за счет их устройства на одном уровне ниже или выше экватора (глава 2, рис. 2.31 а, 2.47), как показано на рисунке 3.1. Разрезка такого купола имеет 5 типоразмеров стержней, 2 типоразмера монтажных элементов и два симметричных типоразмера опорного узла (см. рис. 3.1).

Для обеспечения надёжности сборных геодезических куполов принимаем различные варианты шарнирных соединений и варианты жестких узловых соединений между панелями и внутри панелей. Эти соединения должны

обеспечить необходимую монтажную жесткость, как отдельных каркасных панелей-пирамид, так и монтажных частей купола (рис. 5.1-5.3) при сборке и установке его в проектное положение [29].

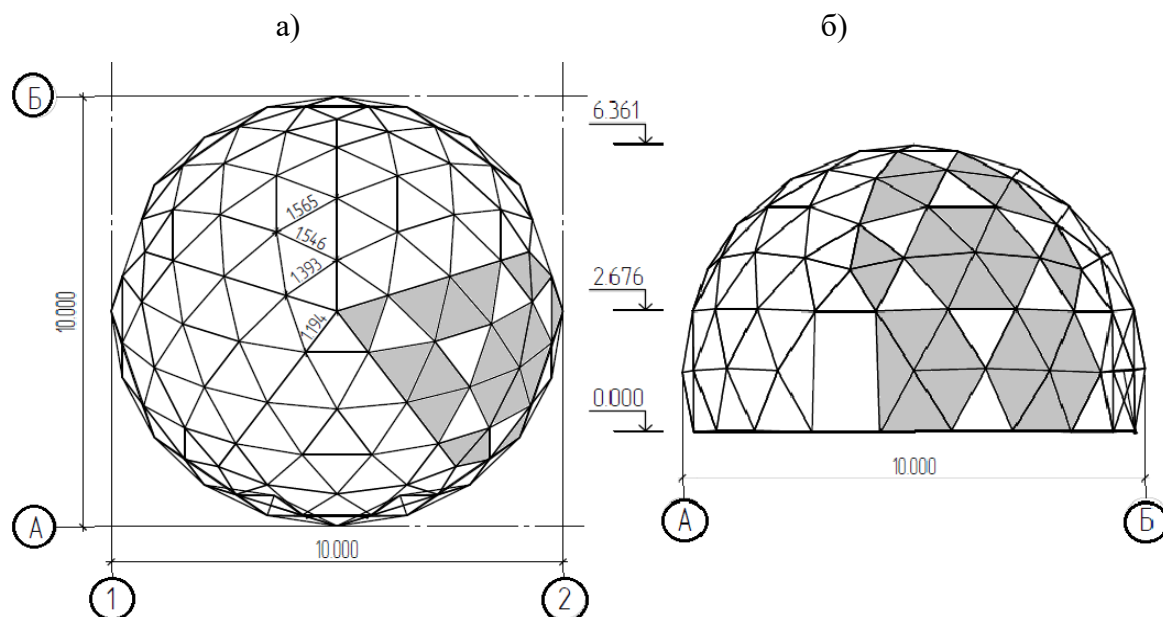


Рис. 3.1. Схема каркаса покрытия на основе 320 – гранника, имеющего 3 типоразмера монтажных несущих элементов: а – вид сверху; б - боковой вид.

3.1.2. Исследование конструктивно-технологических решений геодезических куполов

Важной особенностью сборных геодезических куполов из панелей является наличие как минимум двух вариантов панелей: шестиугольной и пятиугольной (для октаэдральной разрезки четырехугольной панели). Поэтому конструктивные решения этих панелей могут существенно усложняться. Для изготовления панелей необходимы разные станки либо эти станки могут переналаживаться под другие углы и расположение элементов.

Первый вариант узловых решений панелей сборных сферических куполов предлагаемых разрезов отличается исключительной простотой в изготовлении и сборке (рис. 4.15 и 5.3). Узлы однополосного купола, собираемого из монтажных панелей в виде правильных пятиугольников и шестиугольников (рис. 3.1, 5.3, 3.2 и 3.5), увеличивают монтажную жесткость при сборке, и позволяет собирать быстро и надежно небольшие купола ручной

собираются из трубчатых стержней. Для создания компактного узла торцы труб стержней сплющиваются с перегибом, из-за чего у элементов образуется утонение, облегчается соединение элементов под углами 50-72 градуса и уменьшается узловой элемент. Рассмотрим последовательно каждое из соединений варианта П.1 (рис. 3.2). Соединения под буквами «а, б, в и г» являются неразъемными сварными соединениями трубчатых стержней. Они обеспечивают жесткие соединения внутри отправочных марок каркасных панелей и панелей в виде правильных пятиугольников и шестиугольников при монтаже. В этом варианте предусмотрены монтажные соединения самих панелей на болтах (вариант П.2. рис. 3.3 а, б).

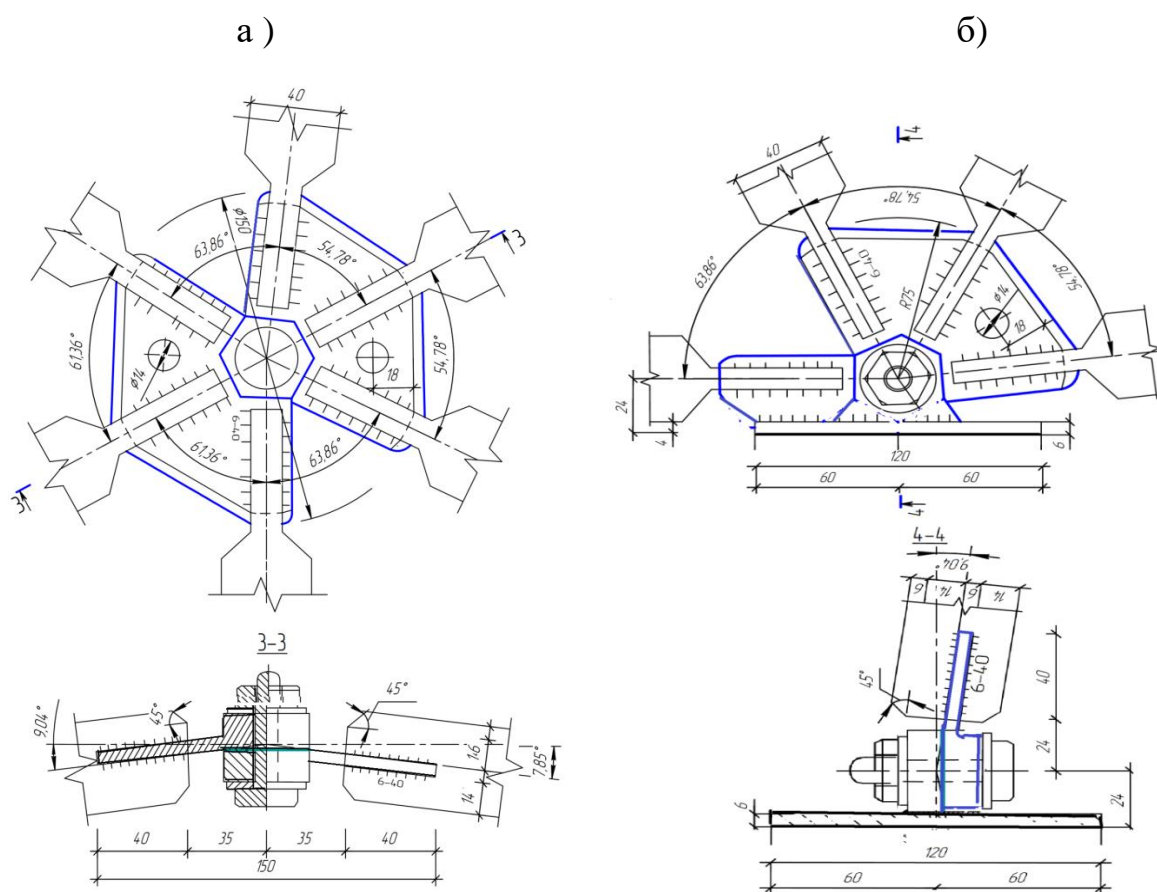


Рис. 3.3. Вариант П.2 монтажных узлов купола из пирамидальных панелей: а – соединение панелей при монтаже; б – соединение опорных элементов и панелей.

Из плоскости панелей они обеспечивают монтажную жесткость только при соединении более трех узлов.

Разработанные узлы выполнены со штампованными узловыми

элементами толщиной не менее 4 мм с формой в виде конуса не менее 40 мм высотой. Таким образом, при монтаже собираются четыре типа отправочных марок, две из которых опорные и две рядовые.

В процессе разработки конструктивно-технологических решений сборных геодезических куполов (рис. 3.1, 5.16) также были предложены только сварные узлы однопоясного купола, собираемого по уже апробированной методике (рис. 3.4) из монтажных панелей в виде правильных пятиугольников и шестиугольников (рис. 3.4-3.6). Купол-навес собирается с узлами по III и IV варианту из укрупненных элементов [29], которые в свою очередь собираются из трубчатых стержней.

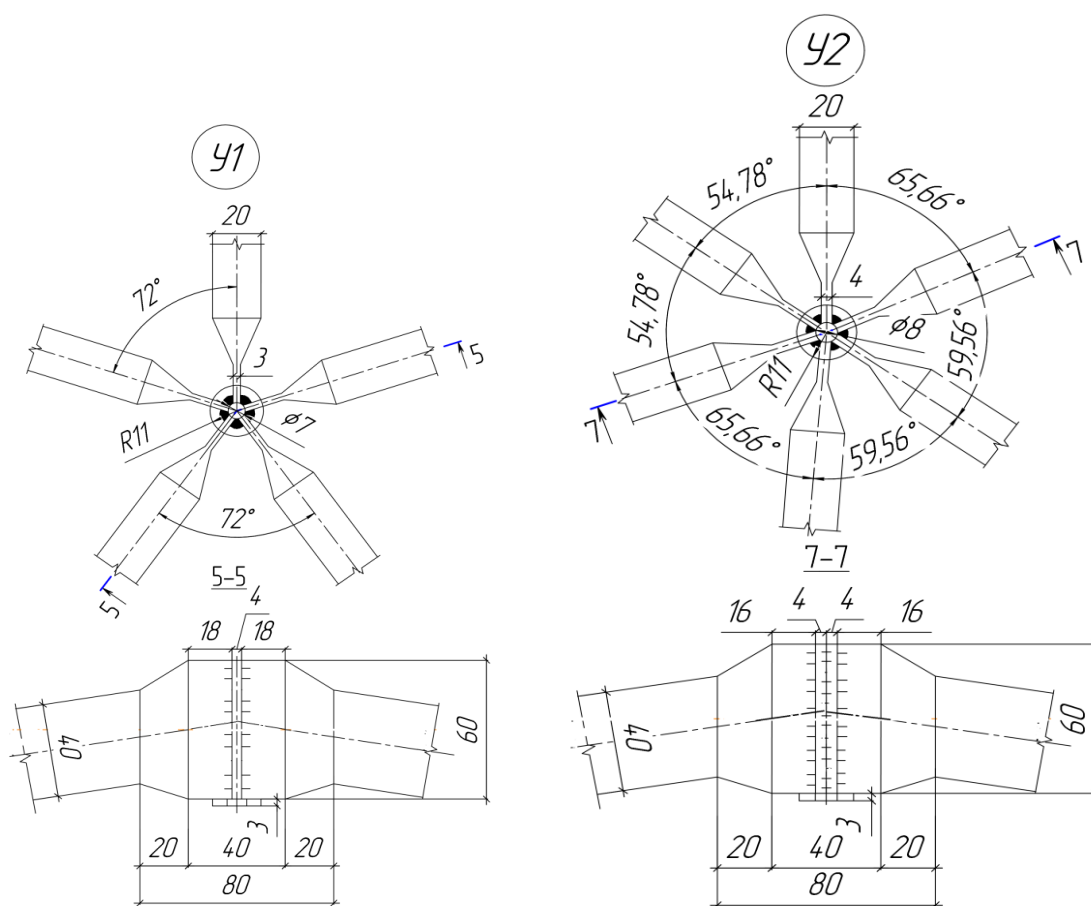


Рис. 3.4. Вариант III решения узлов внутри монтажных панелей купола.

Для создания компактного узла торцы труб стержней также сплющиваются с перегибом, из-за чего у элементов образуется утонение, облегчающее соединение элементов под углами 50-72 градуса.

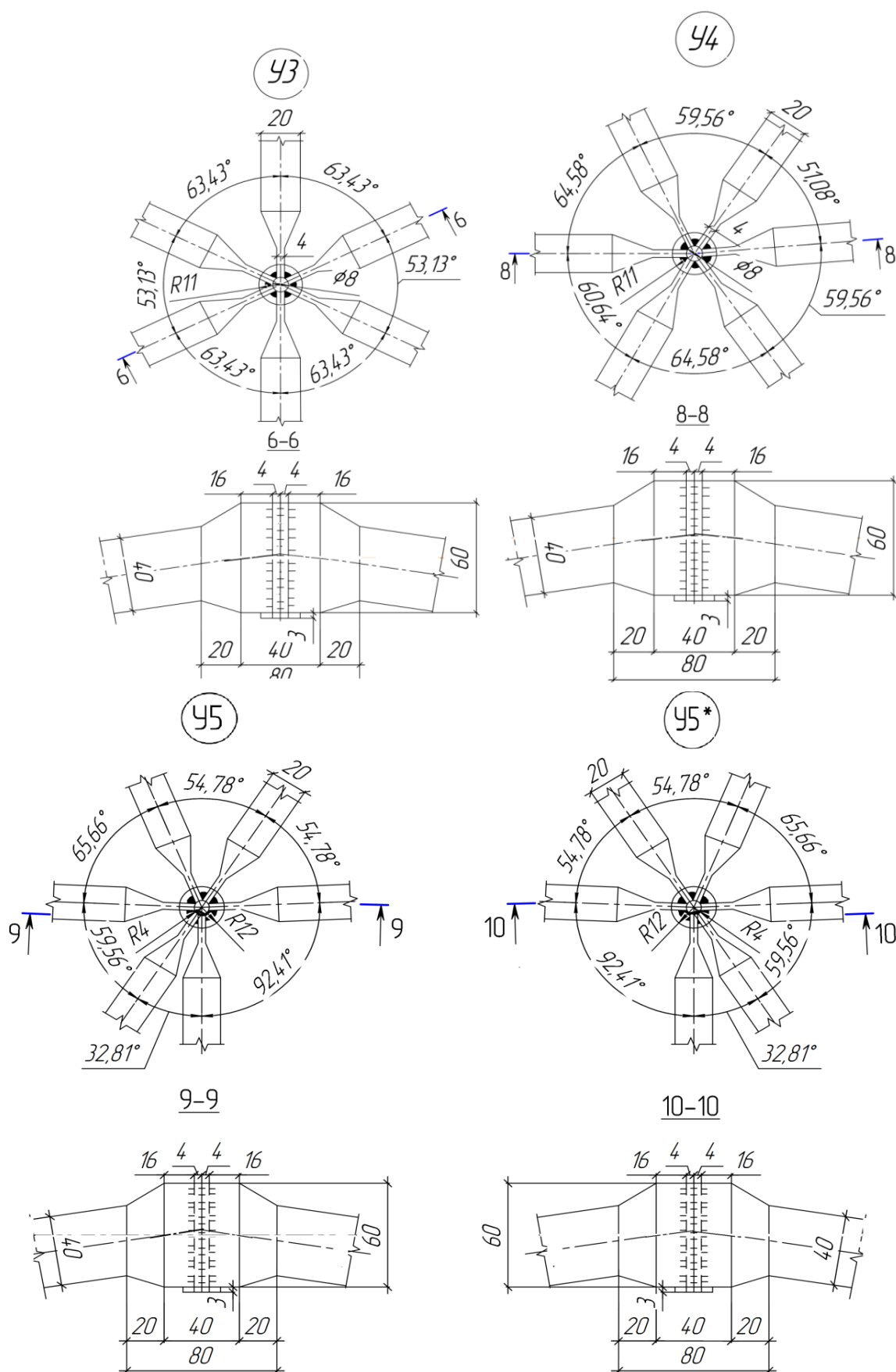


Рис. 3.5. Вариант III решения узлов внутри панелей и монтажных узлов панелей купола.

Здесь отсутствуют узловые элементы соединения, в отличие, от предыдущих соединений. Стержни 7 в узлах сборного купола-оболочки, могут быть соединены по варианту IV (рис. 3.7) с помощью цилиндрических обойм 14 с пазами 15, выполненными заранее или по месту для сборки плоских по основанию пятиугольных и шестиугольных пирамид-панелей или ромбов. Стержни попарно соединены с обоймой ванной сваркой 16, затем к опорным пирамидам-панелям присоединяются опорные пластины 17, причем часть узлов со стержнями без обойм монтажных панелей свариваются прихваткой 18, а ванной сваркой соединяются в построечных условиях готовые монтажные панели и стержни. Сверху обоймы закрываются крышками 19, которые могут служить для крепления покрытия оболочки. Соединение выполнено с подкладкой в обойме, либо обойма сама служит подкладкой.

Оси стержней в предложенных соединениях пересекаются в центре узлов, благодаря чему образуются конструкции с четкой расчетной схемой. Узел воспринимает усилия как растяжения и сжатия, так и моменты с поперечными усилиями, поэтому необходимы развитые сечения в рядовых и монтажных соединениях. Узловые соединения данного типа позволяют несколько изменять длину стержня при изготовлении за счет паза в сплюсненном торце стержней. Они обеспечивают необходимый угол поворота при сборке и изготовлении монтажных панелей без нарушения центрирования элементов в узлах. В противном случае, так как стержни куполов имеют различную пространственную ориентацию в каждом из узлов, возникает необходимость индивидуального изготовления узлов и большого количества типоразмеров узловых элементов.

Разработанное узловое соединение прошло экспериментальную проверку при испытаниях крупномасштабной модели. и фрагментов купольного покрытия (см. главы 4 и 5).

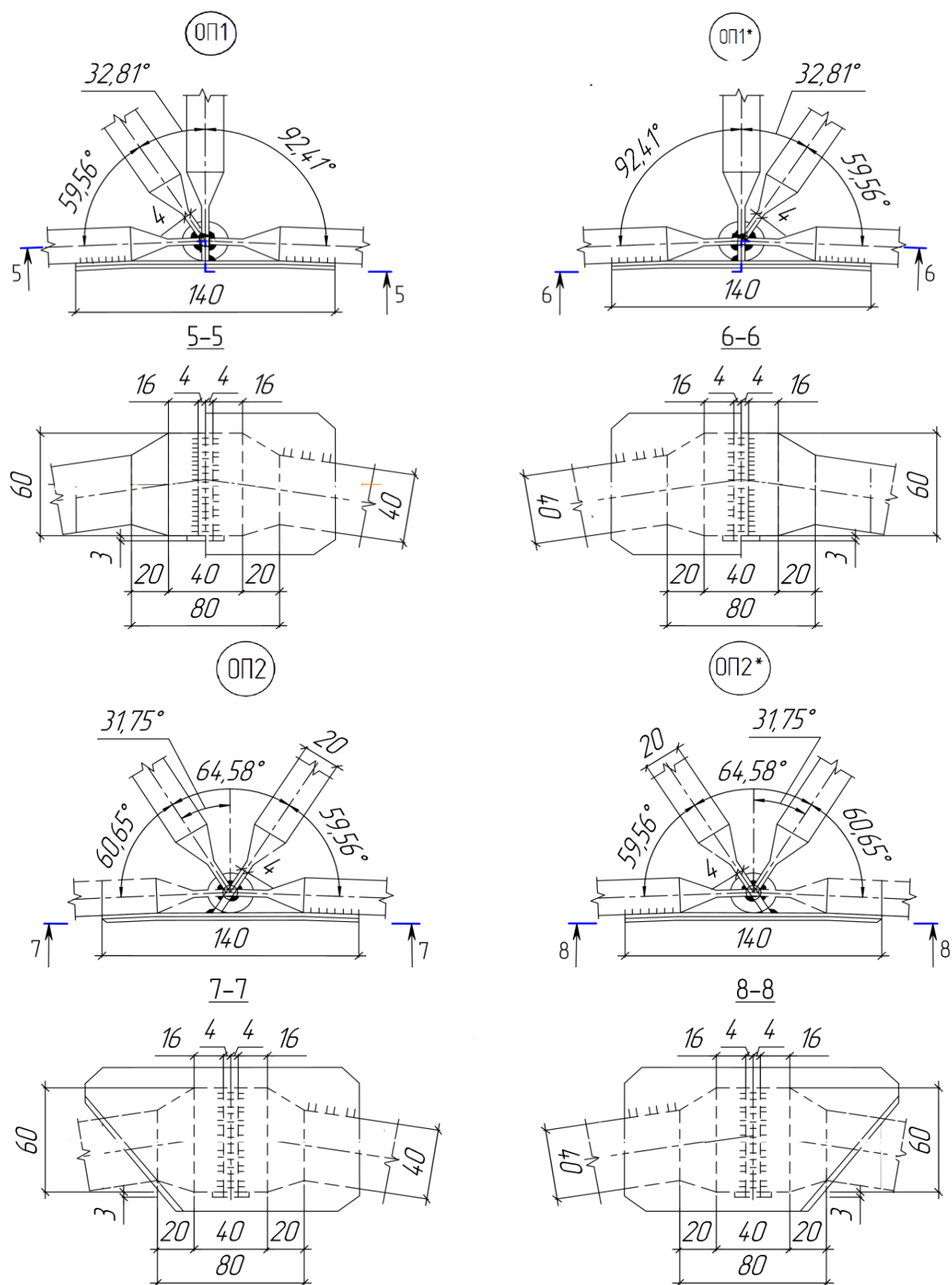


Рис. 3.6. Вариант III опорных узлов панелей купола.

Новизна соединений подтверждена авторским свидетельством и патентами [28,136,137].

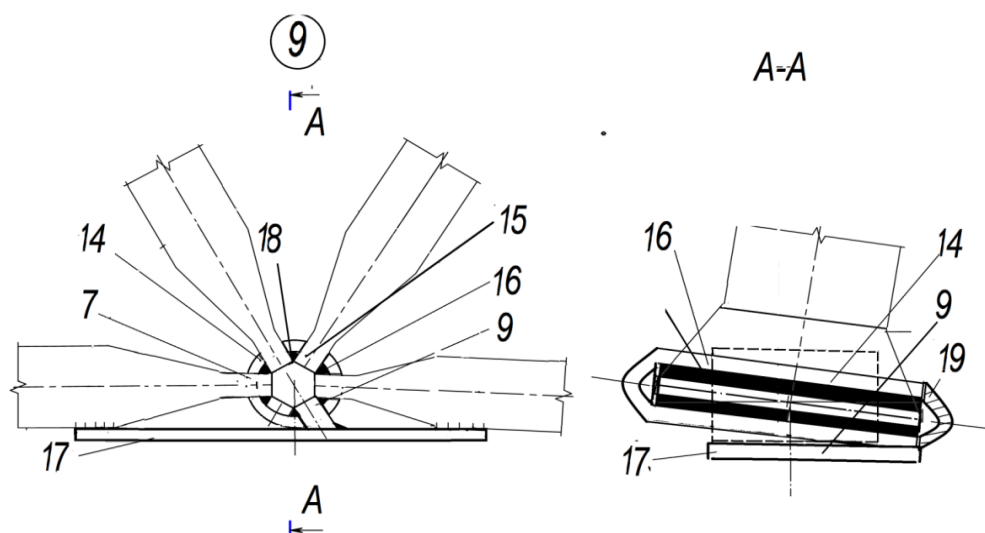


Рис. 3.7. Вариант IV соединений на примере опорных узлов панелей купола.

При разработке конструктивного решения сборного геодезического купола (рис. 3.1, 5.3) были предложены также болтовые жесткие узлы однопоясного купола (по V варианту), выполняемого по специально разработанной методике из монтажных пирамидальных панелей, которые также собираются из готовых стержней и узловых элементов (конусных или цилиндрических), однотипных с монтажными (рис. 3.8).

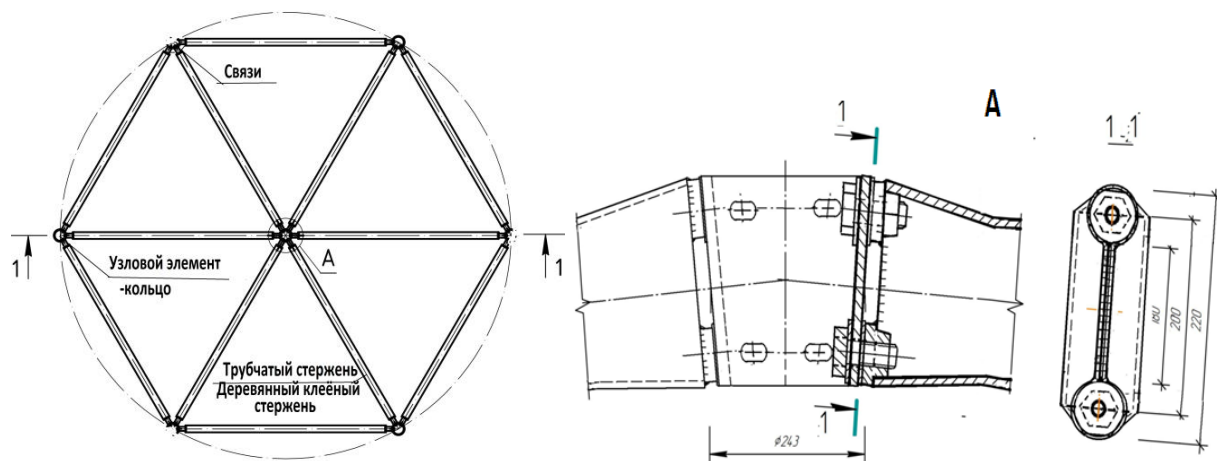


Рис. 3.8. Вариант V соединений трубчатых стержней со сплюснутыми торцами для пирамидальных панелей купола с узловым элементом в виде конусного кольца.

Для создания компактного узла торцы труб стержней сплющиваются с перегибами под фланцы с резьбой, из-за чего у элементов также образуется утонение, облегчающее соединение элементов под углами 40-80 градусов.

Здесь имеются развитые узловые элементы соединения, в отличие, от предыдущих сварных узловых соединений. Узловой элемент представляет собой кольцо с фрезерованными отверстиями двух и более рядов, которые позволяют жестко соединять болтами стержни под произвольными углами в пределах от 45-75 градусов.

Узловой элемент может быть выполнен с крышками или ребрами жесткости внутри для снижения материалоемкости соединения. Аналогично выполнено узловое соединение стержней купола-оболочки из деревянных клеёных элементов (рис. 3.9). Здесь использована возможность решения поворота в узлах с помощью цилиндрических фланцев с резьбой, привариваемых к концам арматурных стержней, которые затем вклеиваются в деревянные элементы, или возможность вклеивания этих стержней под небольшими углами к волокнам древесины. Цилиндрические фланцы с внутренней резьбой могут быть вклеены как наравне с торцами деревянных элементов, так и в виде развитых фланцев, могут быть оставлены снаружи и воспринимать все усилия сжатия от пристыкованных элементов (рис. 3.9).

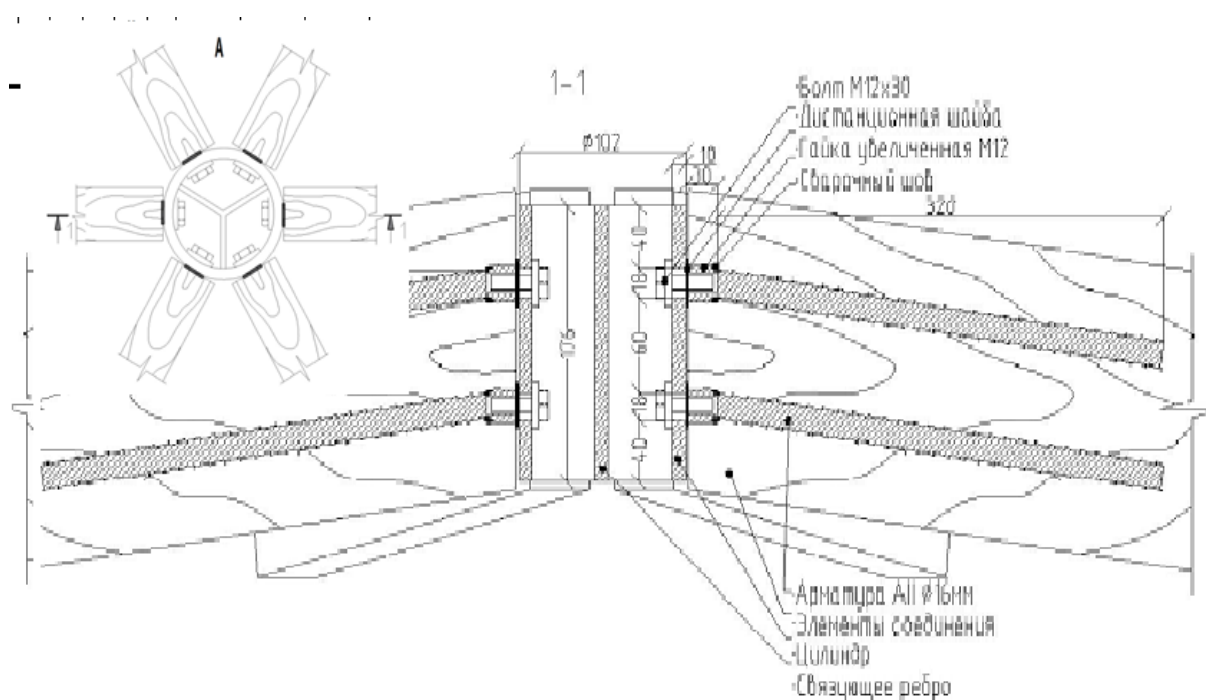


Рис. 3.9. Вариант У соединений трубчатых стержней со сплюснутыми торцами для пирамидальных панелей купола с узловым элементом в виде конусного кольца.

Отклонения фактических продольных и угловых размеров деревянных элементов от проектных должны быть минимальными, поэтому изготовление элементов и укрупнение в монтажные панели рекомендуется производить в специальных кондукторах.

Предложенные узлы (рис. 3.2 - 3.9) обладают относительно низкой трудоемкостью изготовления (отклонения геометрических размеров элементов при изготовлении не превышают допуск 1,0-3,0 мм) и пониженной материалоемкостью при соблюдении условия равнопрочности сечений в соединительных узлах.

3.1.3. Исследование напряженно-деформированного состояния геодезических куполов-оболочек.

Рассмотренные выше конструкции геодезических куполов могут иметь различные варианты крепления панелей и опирания на стойки. Для анализа этих вариантов были проведены численные исследования с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР-2013» (схемы статического расчета и деформированные схемы, рис. 3.11-3.13).

Продольные усилия, моменты и поперечные силы в стержнях и перемещения в узлах определены от наиболее невыгодных сочетаний нагрузок. Данные приведены для двух вариантов креплений панелей и для двух способов опирания: А - к шарнирно-подвижным опорам с затяжками; Б – с затяжками на уровне второго этажа и к шарнирно-подвижным опорам (опорным пластинам с затяжками). Сравнение расчетных схем и нагрузок, а также распределение усилий в схемах А – жесткие узлы купола без затяжек, Б – жесткие узлы с затяжками (рис. 3.10 а б) показывает, что расчетные усилия и максимальные напряжения с затяжками отличаются не более, чем на 15 %, от усилий без затяжек, но усложняют узлы и утяжеляют купол (рис. 3.10-3.12). Для дальнейшего анализа выберем основной вариант расчетной схемы с жесткими узлами и с опиранием на одном уровне без промежуточных затяжек.

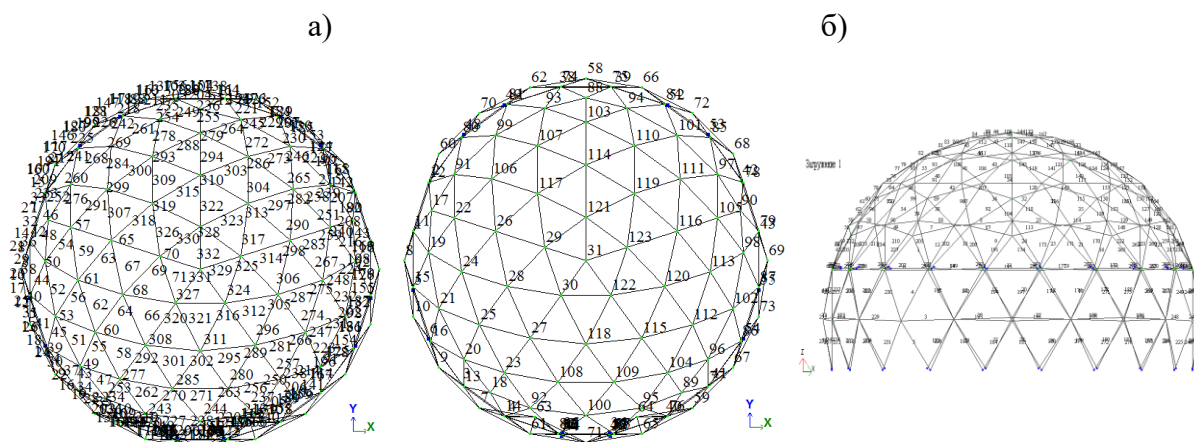


Рис. 3.10. Схема закреплений для одинаковых нагрузок в двух вариантах купола из пирамидальных панелей: а – без промежуточных затяжек; б – с затяжками на уровне этажа.

Предельное состояние по первой группе наступает в результате появления пластического шарнира в узлах купола с однотипными стержнями и узлами на экваторе. Далее происходит нарастание перемещений на этом уровне купола и с учетом пластической работы узлов стальных стержней наступает предельное состояние второй группы с горизонтальными перемещениями более 10 мм. Перераспределение усилий даёт запас несущей способности до 20-30%.

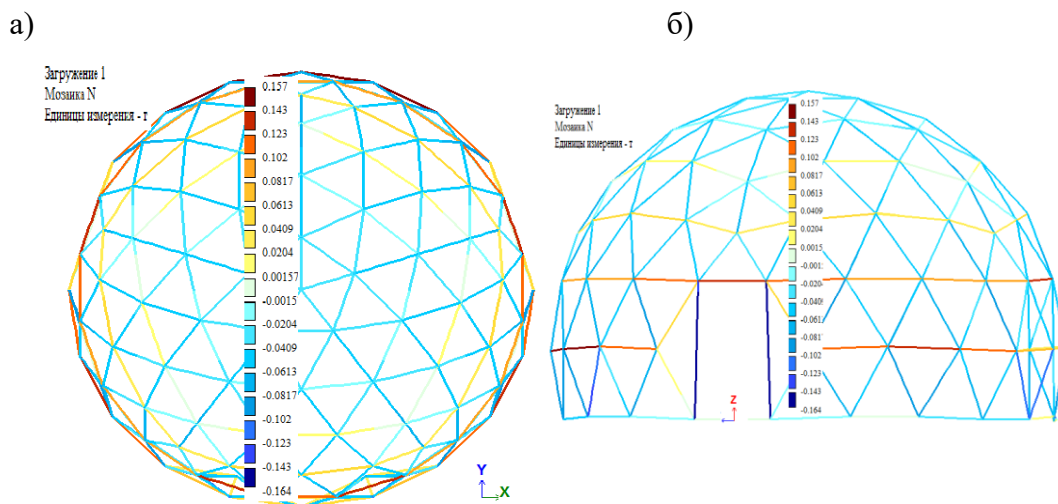


Рис. 3.11. Мозаики продольных усилий (а, б) для расчетного нагружения на каждый узел купола с затяжками на уровне опор

Влияние сборки с сортировкой, затем зеркальной сборки реализуем для проверки на испытательной модели подобного купола (рис. 4.19) и в расчетных моделях (рис.3.10-3.12).

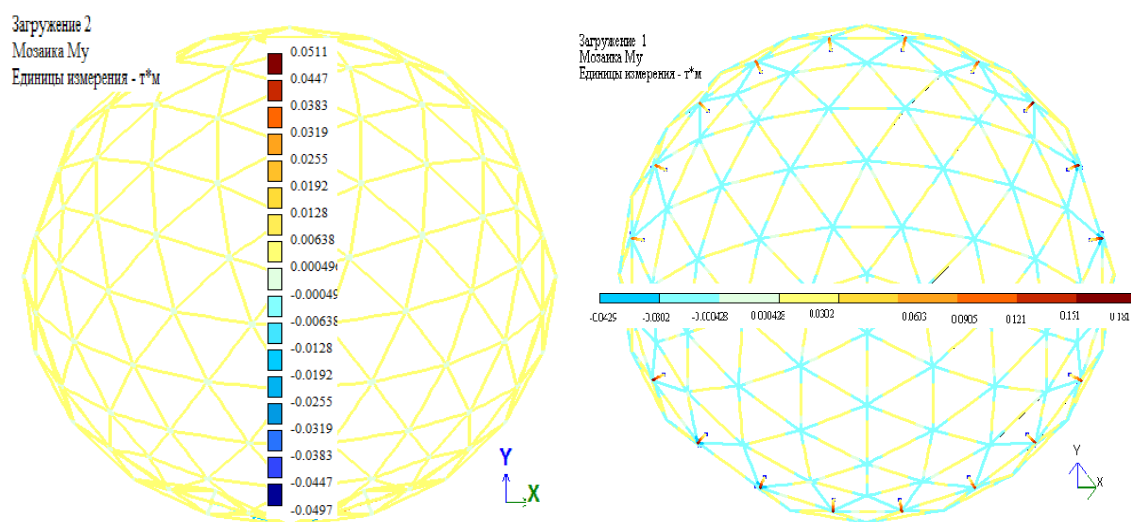


Рис. 3.12. Мозаики моментов для расчетного нагружения купола: а - с проемами и затяжками по контуру; б - с затяжками на уровне первого этажа.

Вокруг пяти осей подобных геодезических куполов расположены на схемах парные шестиугольные пирамидальные панели, которые собираем зеркальным образом, одну на готовой другой. Как показал эксперимент, даже такие операции приводят к снижению критических нагрузок на центральные узлы панелей купола.

Проверка устойчивости отдельных элементов и общей устойчивости панельных геодезических куполов-оболочек.

При проектировании куполов всех типов обязательной является проверка степени геометрической нелинейности несущей конструкции, которая оценивается [154,156,164] соотношением суммарной расчетной нагрузки и критической нагрузки F_{cr} .

При жестком соединении между панелями однопоясного геодезического купола соотношение жесткостей соединения на стыках этих панелей и жесткостей соединений внутри самих панелей влияет на величину общей критической нагрузки. В варианте с шарнирными стыками между панелями проявляется также влияние укрупнения элементов покрытия.

Как показал эксперимент, это влияние проявляется даже при применении

укрупнительной сборки стержневого купола с одинаковыми узлами соединения как внутри пирамидальных панелей, так и на стыках между ними, только за счет нивелирования геометрических отклонений при сборке с предварительной сортировкой элементов по длине, и за счет создания укрупнённых фрагментов поверхности с выверенной точностью.

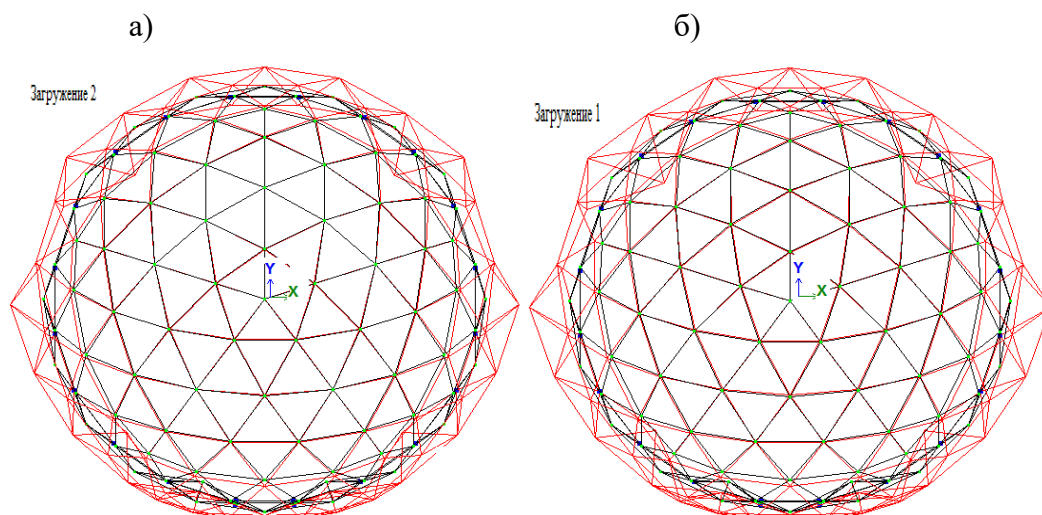


Рис. 3.13. Перемещения узлов и элементов купола с проемами от расчетной нагрузки (М1:173): а – без учета геометрической нелинейности, $f^*_{\text{макс.}} - 4,421$ мм); б – с учетом геометрической нелинейности, $f^*_{\text{макс.}} - 5,315$ мм.

Для определения критической узловой нагрузки предварительно вычисляется угол наклона панелей к касательной плоскости β , параметр начального отклонения ξ_0 и параметр прогиба узла ξ .

Угол наклона панелей к касательной плоскости в узле $\beta = l/2 R$, где l – минимальная длина панели купола. R - радиус кривизны.

Расчетное значение параметра начального отклонения:

$$\xi_0 = 0,65\delta/\beta^2 l. \quad (3.1)$$

где δ – допуск на изготовление стержней по длине и самой панели купола, принимаем $\delta = 1,0$ мм.

Безразмерный параметр прогиба узла $\xi = \alpha / \beta$; безразмерный параметр начального прогиба узла $\xi_0 = \alpha_0 / \beta$; здесь α – угол поворота стержня в радиальной плоскости в процессе деформирования, α_0 -- начальный угол поворота стержня по отношению к номинальному положению.

При $p=F/F_{cr}$ p – коэффициент снижения критической нагрузки; $m= F_2/F_1$ - параметр неравномерности нагружения соседних узлов; F_1 - нагрузка на рассматриваемый узел, F_2 - нагрузка на соседний узел (для постоянной и ветровой нагрузок $m=1$, для снеговой $m=0,5$).

Однако выше приведенная существующая методика такова, что формулы не учитывают варианты эксплуатационных нагрузок с соотношением m для загруженных и незагруженных узлов менее 0,5. Поэтому предлагаем усилие в наиболее нагруженном стержне панели с учетом его возрастания в процессе деформирования панельного купола определять по формуле [113] с учетом малых значений m для жестких панелей и шарнирных монтажных стыков

$$N_{ef} = N \times k_1, \quad (3.2)$$

где k_1 - коэффициент возрастания продольной силы, определяется по формуле: $k_1 = 1/(1 - \xi_0 - \xi_{kp})$. Он также ограничивается значением 1,65 для снеговой нагрузки.

По усилию N_{ef} подбираем сечение стержня из условия устойчивости как центрально-сжатого элемента. Рекомендуется принимать гибкость стержней не более 80-90, в противном случае необходимо учитывать влияние снижения их продольной жесткости на величину критической нагрузки.

$$P_{cr} = 2EA\beta^3 p, \quad (3.3)$$

где E - модуль упругости материала стержня, P_{cr} - критическая нагрузка на узел, A - площадь сечения стержня сетчатого купола, p - параметр, принимаемый по графику [115]).

Максимальная узловая нагрузка на узел $P < P_{cr}$.

По сути, расчет на местную устойчивость оценивает работу сетчатого или геодезического купола при симметричных формах деформирования его стержней по отношению к действию основных внешних сил и потеря устойчивости происходит в наиболее нагруженных элементах. Поскольку оценка асимметричных форм потери устойчивости недостаточно проработана, лучше воспрепятствовать образованию этих форм конструктивно-

технологическими методами, которые легко реализуются в предлагаемых в данной работе конструктивных системах.

3.1.4. Особенности монтажа сборного геодезического купола

Для геодезического купола наиболее простым и проверенным способом сборки является способ «подрачивания» с подвешиванием купола за вершину, а затем за собранные части. Но такое решение неэффективно при сборке легких конструкций небольших куполов, которые нашли широкое применение в практике строительства. Поэтому для сборки небольших и вспарушенных куполов разработан и внедрен способ возведения подъемом с поворотом собранной части относительно монтажных шарниров опор (рис. 3.14).

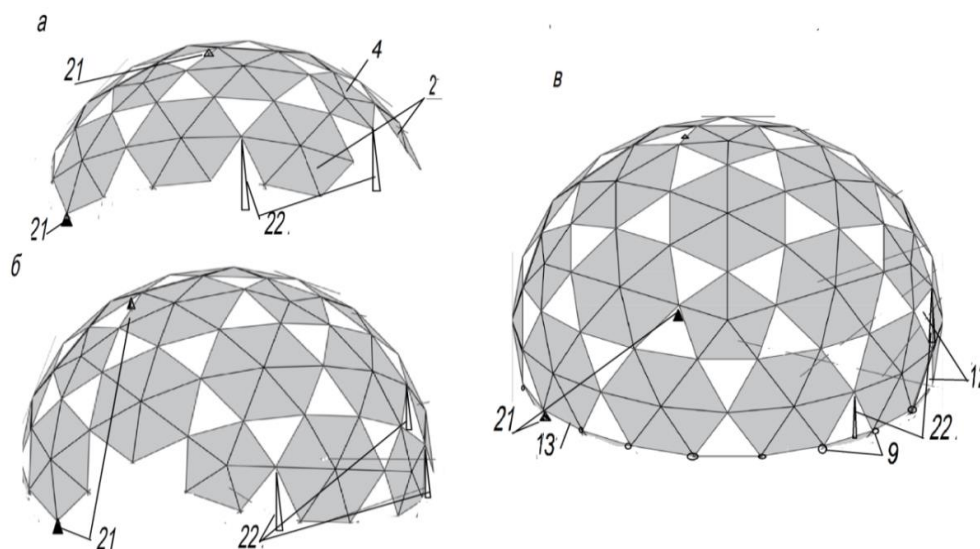


Рис. 3.14. Монтаж из панелей легкого тентового купола.

В небольших сетчатых и геодезических однопоясных куполах стержни каркаса незначительно отличаются по длине, имеют малый разброс расчетных усилий и поэтому могут быть запроектированы одного сечения. При сборке легких куполов-навесов при пролетах до 10-12 м не используются подъемные средства (рис. 3.14). При больших пролетах можно использовать реечные домкраты для вывешивания купола и грузоподъемные механизмы для монтажа панелей.

На подготовленном основании площадки размечаются точки расположения опор купола. На выбранной части круга собираются опорные

панели с двумя монтажными опорами и затяжками. Собранный часть поворачивается в первое монтажное положение на рис. 3.14 а. Затем присоединяются последовательно ярусы панелей с последовательными поворотами, пока вся сборка не завершается оставшейся опорной частью с установкой на постоянные опоры (рис. 3.14 б, в).

При сборке и монтаже куполов, у которых жесткость монтажных узлов составляет менее 20% от изгибной жесткости стержней, перемещения опорных узлов при монтаже могут превысить 20-25 мм; монтажная жесткость, равная 50 % жесткости стержней, дает перемещения качающихся опор относительно поворотных опор до 6 мм для купола навеса диаметром 10 м (рис. 3.15)..

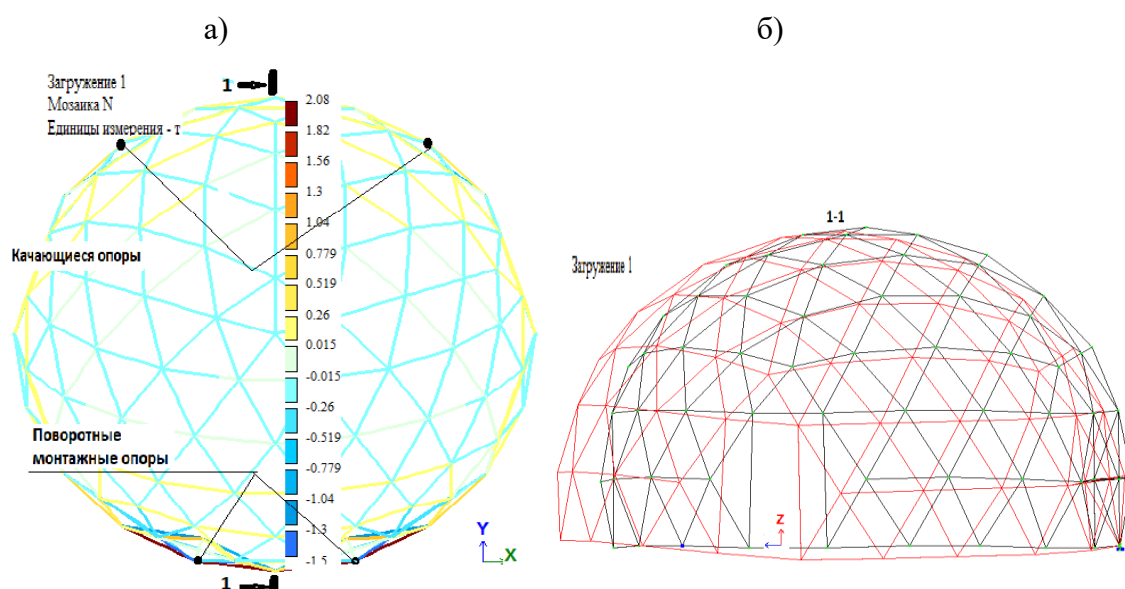


Рис. 3.15. НДС купола при монтаже: а - мозаика продольных усилий; б –перемещения узлов и элементов с проемами, $f^*_{\text{макс.}}$ - 6,421 мм.

Значительное влияние на перемещения при монтаже в вставленных куполах оказывают вырезы элементов для организации проемов. Так отсутствие вырезов снижает приведенные значения перемещений в два-три раза.

3.2. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ КАРКАСНО-ПАНЕЛЬНЫХ ПРЕДНАРЯЖЕННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

3.2.1. Исследование конструктивно-технологических решений сферических оболочек из преднапряжённых панелей.

Еще одной возможностью обладают предлагаемые сборные панельные или пирамидально-каркасные геодезические купола и сферические оболочки. Они позволяют эффективно применить предварительное напряжение на отдельных элементах данных систем, а именно на каркасных панелях или панелях-оболочках. Преднапряженные панели также увеличивают жесткость купола в целом и изменяют в лучшую сторону работу купола на местную устойчивость. Для оценки предложенных эффективных конструктивно-технологических решений проведем анализ примеров проектирования сборных куполов-оболочек пролетами 12,0 – 96,0 м, с соотношениями стрелы подъема к пролету от 0,2 до 0,5. Подобные купола целесообразно создавать на основе сетчатых сферических оболочек радиально-кольцевой основой по приведенной классификации «ТАлТ» [4] и на основе аналога этой системы из одних правильных шестиугольных панелей с треугольными панелями между ними в виде поверхности положительной гауссовой кривизны.

При разработке конструкции купола из преднапряженных каркасных панелей также должны быть решены задачи определения значений геометрических отклонений и параметров геометрии конструкции при расчете по деформированной схеме, а также оценка величины критической узловой нагрузки. Необходимо иметь в виду, что при сборке купола имеется возможность сортировки уже изготовленных деталей по размерам для укрупнительной сборки панелей и, затем сортировки самих преднапряженных панелей для их размещения в системе покрытия. Это естественным способом позволяет произвести рациональную раскладку панелей с учетом деформированных схем покрытий. С помощью зеркальной укрупнительной сборки панелей и сортировки по параметрам преднапряжения также имеется

панелями и специфические варианты узлов внутри панелей. Эти соединения также должны обеспечить необходимую монтажную жесткость, как отдельных панелей, так и монтажных частей купола (рис. 3.18) при сборке и установке его в проектное положение [29], если панели соединены не менее, чем в трёх узлах.

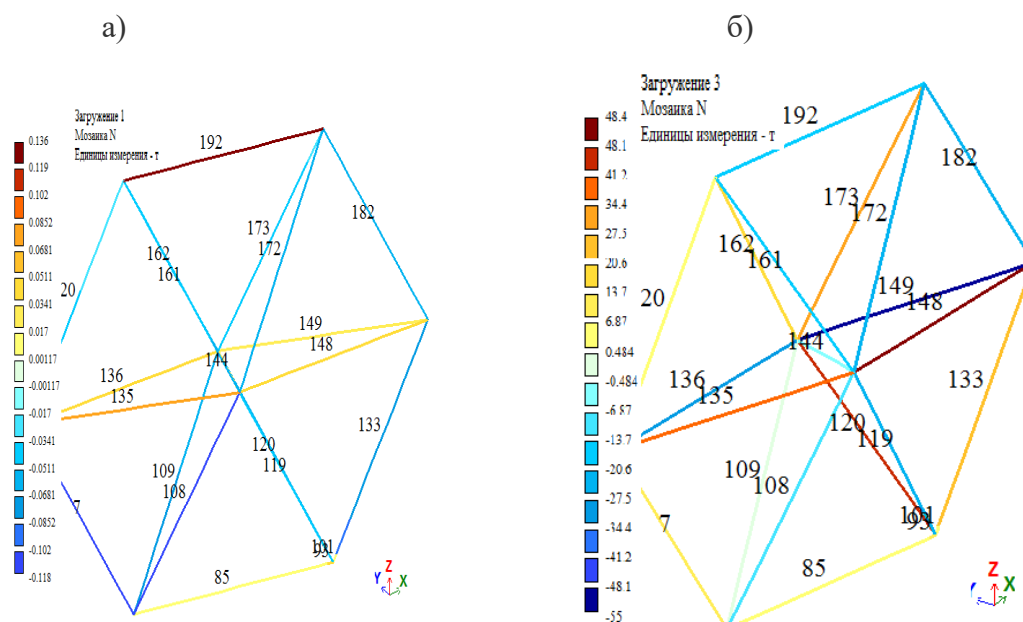


Рис. 3.17. Мозаика продольных усилий для монтажной нагрузки (а) и расчетной нагрузки (б).

Конструктивно-технологические решения сборной оболочки (рис. 3.16 и 2.5 а, б) диаметром 30 м основано на эффективной разрезке, координаты которой приведены в таблице 2.1 приложения 2. Купол собирается из укрупненных элементов – преднапряженных каркасных панелей, которые в свою очередь собираются из трубчатых и арматурных стержней (рис. 3.16 б). Для создания преднапряжения конструкция панели выполнена по типу велосипедного колеса, в котором гибкие (с малой изгибной жесткостью) радиальные предварительно напряженные элементы - из повышенной прочности арматуры (А500), либо полосовой стали. Такое решение стало возможным, благодаря компактным монтажным узлам панелей с двумя проушинами и поворотным вкладышем, который обеспечивает и упрощает соединение панелей под разными углами от 5 до 15 градусов. Проанализируем конструктивно-технологические решения панелей с предварительным

напряжением. Соединения панели (рис. 3.16 б) производятся неразъемными сварными трубчатыми стержнями по контуру и с гибкими арматурными раскосами. Они обеспечивают жесткость конструкции внутри отправочных марок каркасных панелей или панелей в виде правильных пятиугольников и шестиугольников при монтаже. В этом варианте предусмотрены шарнирные монтажные соединения на болтах (рис. 3.18). Из плоскости панелей они обеспечивают монтажную жесткость при соединении не менее трёх узлов.

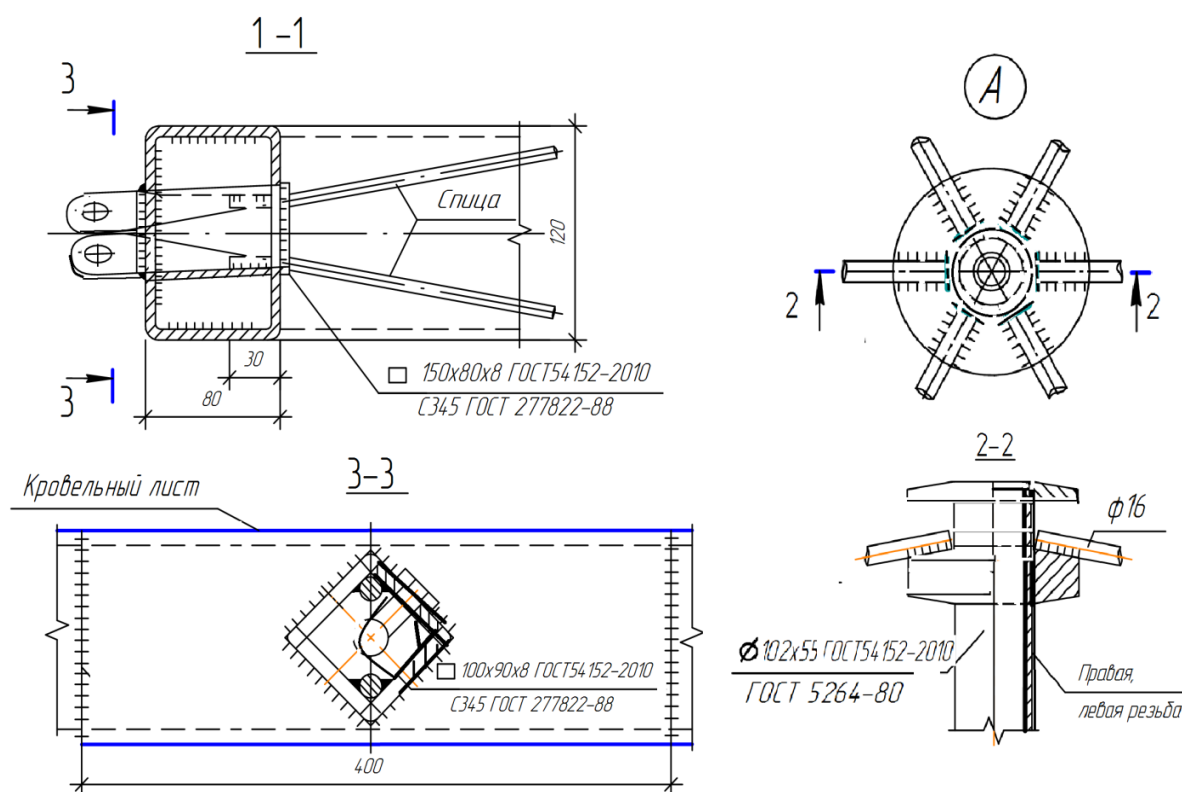


Рис. 3.18. Конструктивно-технологическое решение двухпоясной панели сетчатого купола, обеспеченное эффективной разрезкой: 1 – жесткий каркас панели; 2 – узловая вставка; 3 – узловый элемент и квадратной трубы; 4 – гибкие раскосы в виде спиц; 4 – фланец с резьбой; 6 – распорка с правой и левой резьбой.

В сечении элементов контура каркаса возникают в основном сжимающие напряжения, а растягивающие напряжения близки к нулю. Гибкая арматура способна воспринимать только усилия растяжения; при переходе к усилиям сжатия гибкие стержни выключаются из работы, что не означает разрушения панели, а приводит к увеличению перемещений в направлении выключенных элементов.

Из анализа НДС купола и панелей следует, что для схем с гибкими стержнями и преднапряжением характерно предельное состояние второй группы с нарастающими перемещениями в опорных панелях.

3.2.2. Исследование конструктивно-технологических решений составных оболочек из преднапряжённых панелей

Составные сборные оболочки (рис.2.24, 3.19 - 3.21) также могут быть выполнены в виде сборной конструкции их шестиугольных панелей 1 с узловыми элементами 2, с каркасом из бортовых 3 и внутренних 4 ребер и с обшивкой 5. Шестиугольные и треугольные панели, расположенные в показанном на рисунке 3.19 порядке, образуют поверхности вращения положительной гауссовой кривизны. Панели 1 выполнены в виде несущих каркасных плоских правильных шестиугольников 1, между которыми установлены треугольные панели.

Для сборки составной оболочки положительной кривизны к узлам (рис. 3.19-3.21) панелей крепятся узловые фасонки контурных стержней 14, к которым прикреплены парные проушины под углом около 45 градусов к плоскости панели 1. Для соединения смежных монтажных элементов 1 и 14 между собой в одном из узлов стержня 14 между проушинами 11 установлены и закреплены с возможностью поворота болтами 12 узловые вкладыши 13.

Для стыковки сомкнутой сборной оболочки, собираемой из одинарных оболочек к узлам 2 (рис. 2.25 б) панелей крепятся контурные 14 и стыковочные стержни 15 с узловыми фасонками с обеих сторон этих стыковочных стержней. Узловые элементы здесь используем такие же, как на рисунках 3.20 и 3.21.

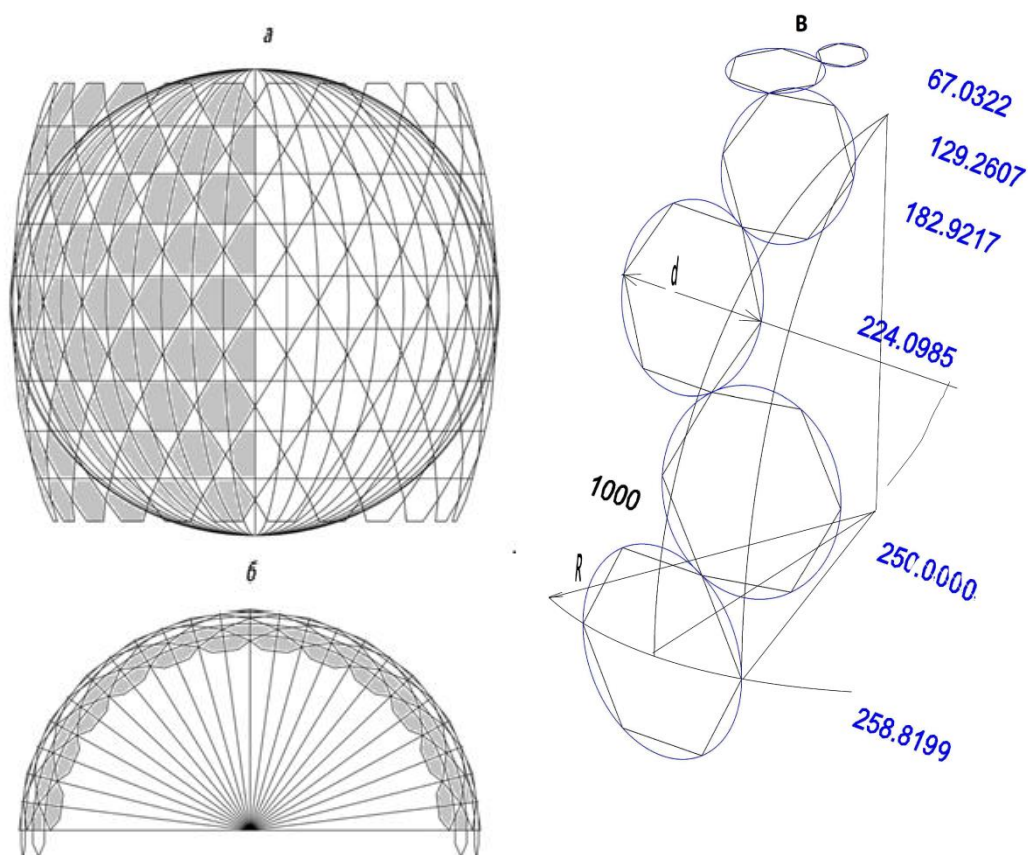


Рис. 3.19. Виды сбоку и сверху сборных оболочек положительной гауссовой кривизны из преднапряженных панелей с каркасом в виде правильных шестиугольников: а – фасад, б - вид сверху; в – радиусы панелей разных рядов для начального радиуса 1000 см.

Разработанное для данных схем узловое решение прошло экспериментальную проверку при испытаниях фрагментов купольного покрытия (см. главу 4). Присоединение стержней контура сборной оболочки отрицательной гауссовой к узлам 2 (рис. 3.20) панелей происходит в таком же порядке, так как у них используются такие же концевые детали. Только сами панели, шестиугольные и треугольные, соединяются между собой в другом порядке. Новизна соединения вариантов оболочек покрытия подтверждена приоритетом от 07.06.2017 №2017119859. Наиболее технологичны монтажные соединения панелей с односторонним поворотом у каждого узла панели на 45 градусов. Кососимметричное присоединение к панели вызывает небольшую концентрацию напряжений в самом устройстве узла, но дальше усилия перераспределяются с четкой передачей по осям стержней (рис. 3.20 а).

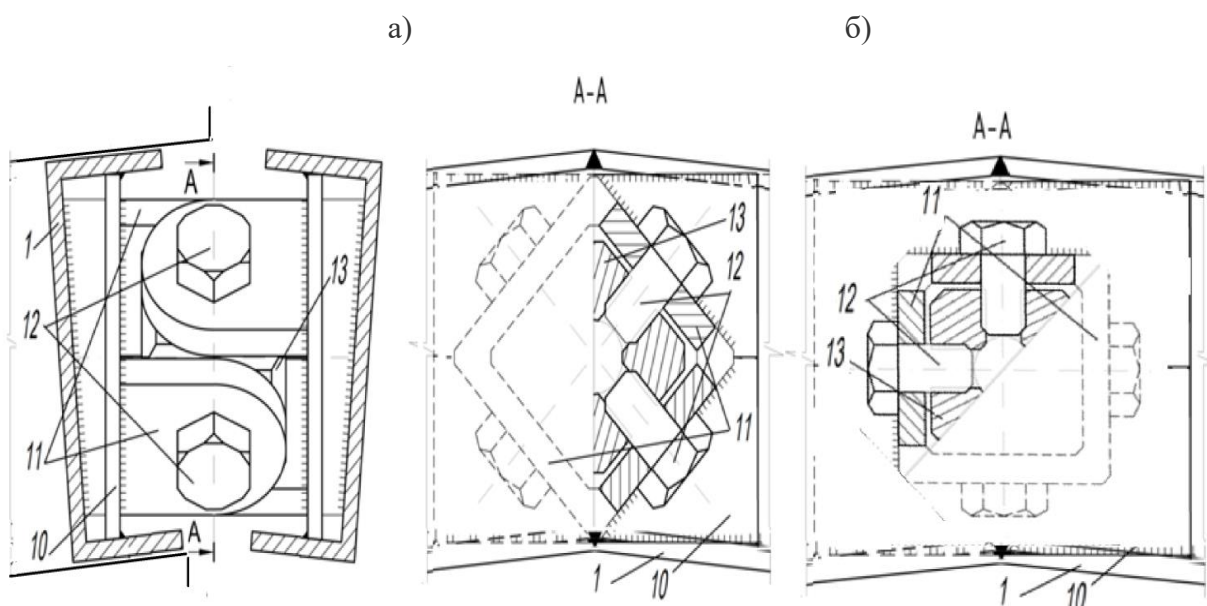


Рис. 3.20. Узловое соединение между каркасными панелями (1У вариант): а – кососимметричное соединение; б - симметричное.

Для отдельных разрезов куполов это может вызвать создание начальных асимметричных форм потери устойчивости.

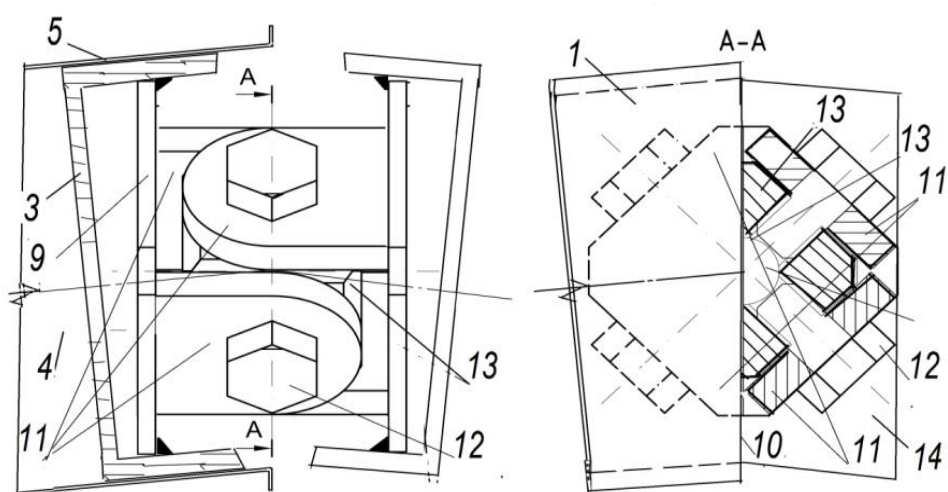


Рис. 3.21. Стыковое соединение для составных купольных покрытий из каркасных панелей (1 вариант):

Поэтому для отдельных схем куполов вполне приемлемы решения узлов с парными проушинами без поворота на 45 градусов, а простое чередование вертикальных и горизонтальных проушин на стыкуемых панелях (рис. 3.20 б).

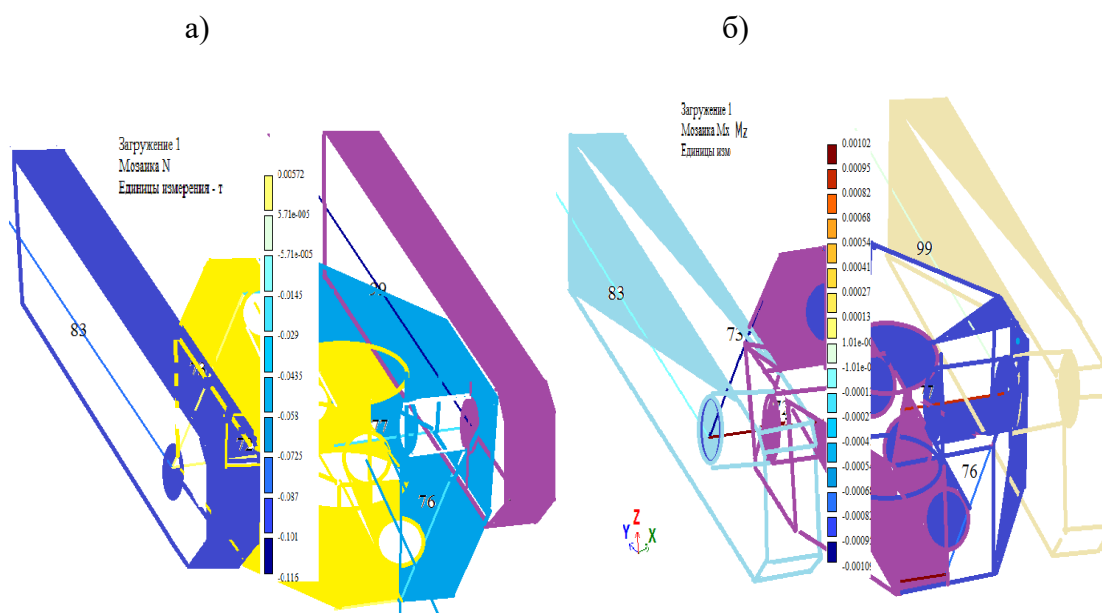


Рис. 3.22. Мозаика продольных усилий (а) и моментов (б) для расчетного нагружения купола

Панели оболочки положительной кривизны также могут быть выполнены из преднапряженных каркасных панелей (рис. 3.23) или панелей-оболочек с каркасом из металла или частично с применением сжатых клееных или цельнодеревянных стержней. Соединения деревянных элементов к узлам выполняются с помощью вклеенных стальных концевых деталей [28] или на уже показанных узловых соединениях на вклеенной арматуре с цилиндрическими фланцами (рис. 3.9).

В сетчатых куполах несущие элементы примыкают друг к другу под различными углами, поэтому в случае выполнения узловых деталей многоугольной формы требуется несколько типоразмеров таких деталей. Чтобы преодолеть неточности сборки оболочки за счет ненесущих треугольных вставок между шестиугольными панелями, предложено решение каркасных обшивок в виде треугольных пирамид (рис. 3.23). В предварительно-напряженных панелях из тонкостенных профилей с соединениями внутри панелей на заклёпках геометрические отклонения в основном связаны с острыми углами наклона гибких раскосов. Постоянная высота панели обеспечивается центральной распоркой неизменной длины с резьбой (правой и

левой), что позволяет также создавать заданное преднапряжение (рис.3.18, 3.23).

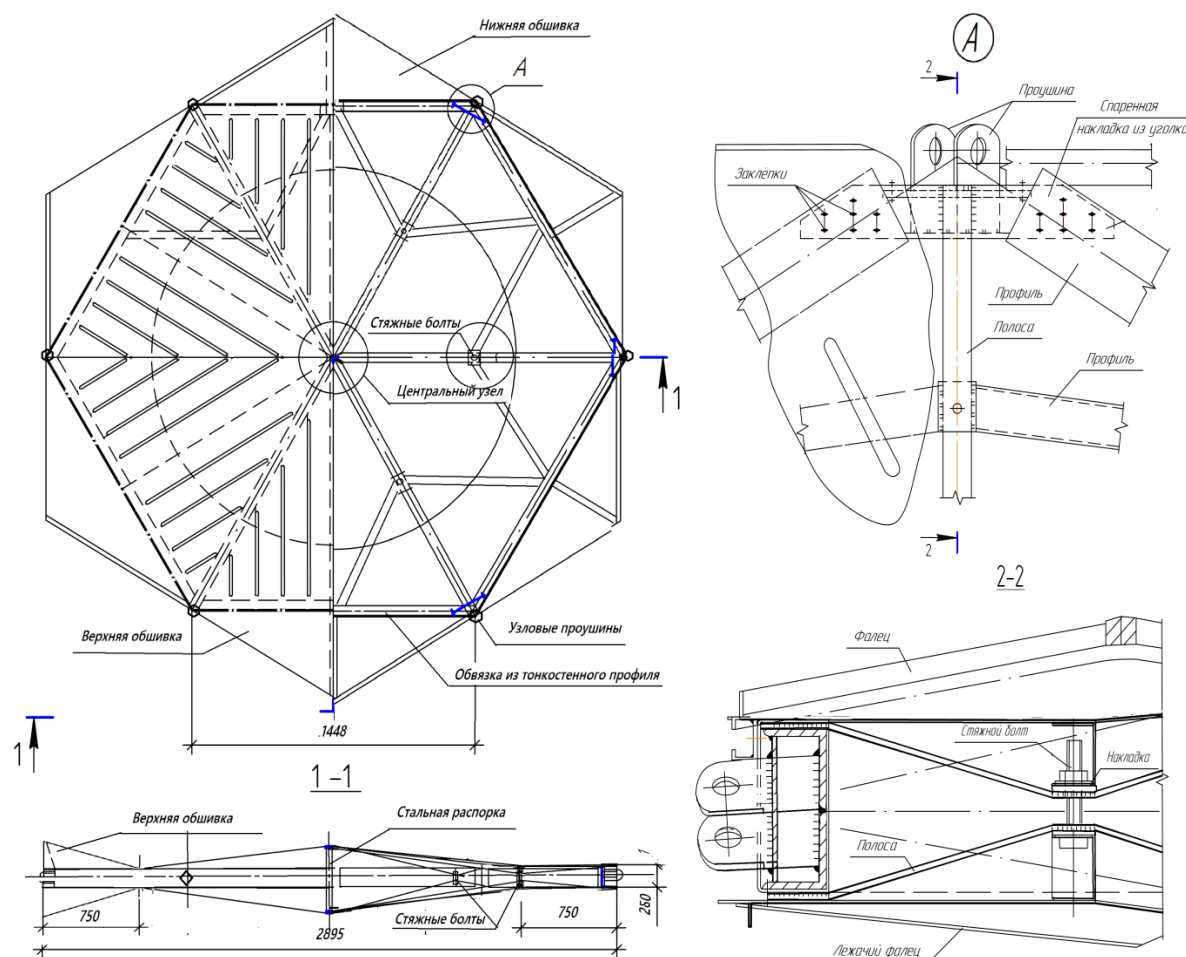


Рис. 3.23. Стыковое соединение для составных купольных покрытий из каркасных панелей (1 вариант):

Также преднапряжение может регулироваться и увеличиваться до нужной величины стяжными болтами на серединах полосовых раскосов. Для стыка с другими панелями обшивка над треугольными несущими вставками составляется из трёх частей с неполными каркасами и размеры вставки могут регулироваться за счет изменяемой высоты получаемой треугольной пирамиды.

Основные особенности применения сборных панельных оболочек с сетчатой разрезкой связаны с предварительным напряжением конструкций. При монтаже из преднапряженных панелей следует учитывать влияние несовершенств на местное преднапряжение панелей. Неплоскостность панелей

при сборке в кондукторах также, как и прочие линейные размеры составляет 1-3 мм. Поскольку жесткость развитых преднапряженных панелей выше, чем обычных, то эти отклонения повлияют незначительно не только на форму оболочки, но и на местное и общее преднапряжение.

При монтаже сборного покрытия способом «подъема с поворотом конструкции в целом» [29] могут использоваться также реечные домкраты для пролетов до 12 м. При больших пролетах можно использовать гидравлические домкраты, которые либо имеют эксцентриситет опирания, либо устанавливаются наклонно.

Вначале, как показано на рисунке 3.14, собираются первые ряды опорных элементов. Далее собираются ряды панелей для придания жесткости собранной части. Собранный ряд поднимается с поворотом вокруг монтажных опор в положение для установки следующих монтажных панелей. В завершение купол устанавливается в проектное положение на опорные элементы противоположного ряда и монтажные опоры заменяются на рабочие опорные элементы.

3.3 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДВУХПОЯСНЫХ СЕТЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК НА ОСНОВЕ СЕКТОРОВ

3.3.1. Варианты расчетных моделей двухпоясных оболочек.

Для оценки предложенных эффективных сборных двухпоясных куполов-оболочек приведем анализ конструктивно-технологических решений для различных пролетов с соотношениями стрелы подъема к пролету более 0,25-0,5. В качестве геометрической схемы двухпоясных сетчатых куполов-оболочек принимается разрезка ТА60 по приведенной в главе 2 классификации в виде сеток двух радиусов с разностью, равной высоте конструкции [4]. Основные опирания выполним на стойки с эксцентриситетом внутрь купола и с опорным кольцом по контуру.

При разработке купола-оболочки из пирамидальных двухпоясных каркасных панелей также должны быть решены задачи определения значений геометрических отклонений и параметров геометрии конструкции при расчете по деформированной схеме, а также оценка величины критической узловой нагрузки. Также необходимо иметь в виду, что при сборке купола имеется возможность сортировки уже изготовленных деталей по размерам для укрупнительной сборки панелей и, затем сортировки самих панелей для их размещения в системе покрытия.

В сборных оболочках предлагаемых разрезов имеется возможность такого размещения неправильных и правильных шестиугольников, когда обеспечивается уменьшение не только числа типоразмеров элементов, но и числа типоразмеров опорных узлов, а также «разрежения» опорных узлов до минимума 6 или 12 (глава 2, рис. 2.15, 2.16 а, 2.18), как показано на рисунках 3.24, 3.25, 3.27. Разрезка таких сборных сферических оболочек имеет 10-20 типоразмеров стержней, 6-15 типоразмеров монтажных элементов и один-два симметричных типоразмера опорных узлов (см. рис. 3.24) или максимально два типоразмера опорных узлов. Проанализируем эффективные расчетные схемы и соответствующие им НДС с обобщенными, нагрузками от

собственного веса купола, веса покрытия, а также временных снеговой и ветровой нагрузок (рис. 3.24-3.25), а затем варианты эффективных конструктивно-технологических решений, обусловленных предлагаемыми разрезками.

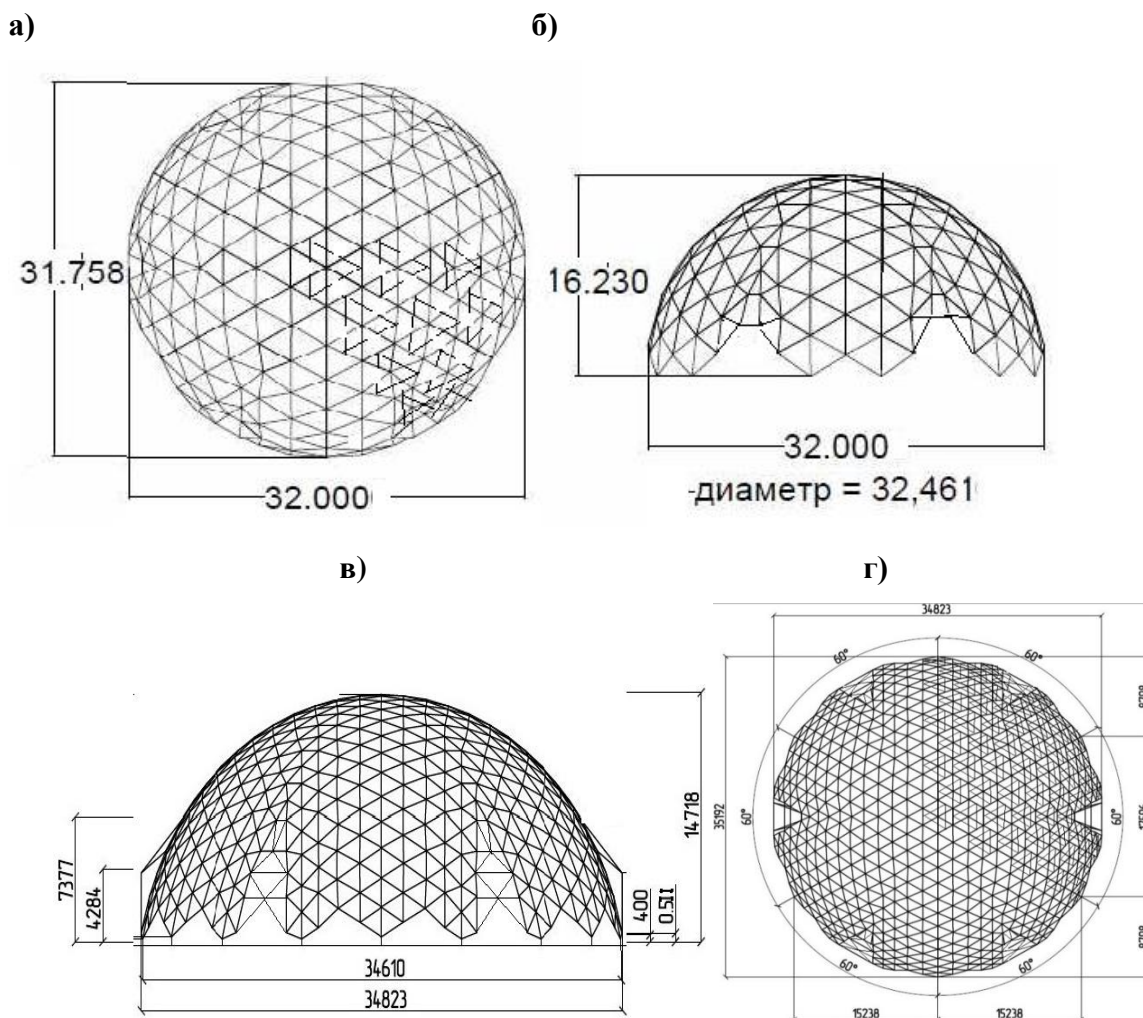


Рис. 3.24 Схемы куполов-оболочек с плоскими шестиугольниками и с секторами 60° : а - схема купола диаметром 32 м и схема связей покрытия на секторе 60° ; б - вид сбоку; в – вид сбоку схемы диаметром 42 м и пролётом 35 м; г - схема покрытия и связей на секторах $2 \times 60^\circ$.

Рассмотрим двухпоясные сетчатые купола-оболочки пролетом 32-35м с опиранием на стойки (высотой до 700 мм) с эксцентриситетом внутрь купола и с затяжками по контуру (рис. 3.24) и двухпоясной сетчатый купол-оболочку пролетом 56м, опирающийся на опорное железобетонное кольцо (рис.3.25). В качестве геометрической схемы двухпоясных сетчатых куполов-оболочек

принимается разрезка ТА60 по приведенной автором в классификации в главе 2.

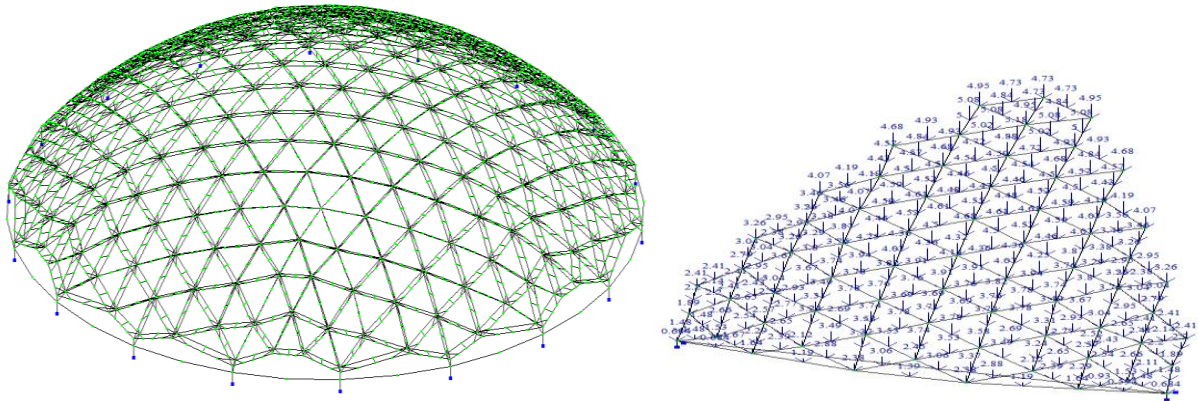


Рис. 3.25.Схема купола спорткомплекса пролетом 56 м(а). Вес снега на каждый из 6 секторов (б - загрузка 1-9)

Предложенная для пологих сферических двухпоясных оболочек разрезка (рис. 3.25) образована шестиугольными и плоскими в основании пирамидами, так как шестиугольники вписаны в окружности, размещенные на сфере. Её геометрия соответствует оптимальным данным по типоразмерам, приведенным на рис. 3.41-3.46.

Оптимизация численными методами для вспарушенных куполов-оболочек возможна только по высоте конструкции, так как стрела подъема (покрытие цирка) определена эксплуатационными условиями (рис.3.26).

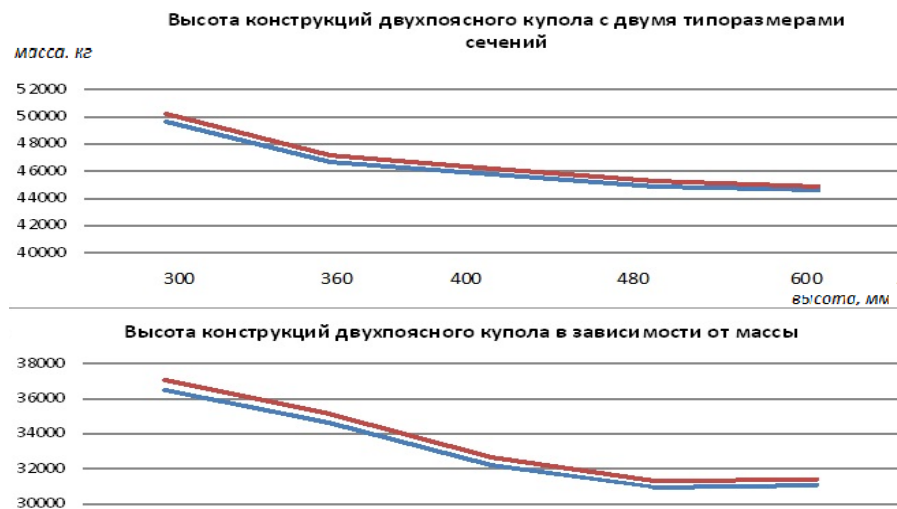


Рис. 3.26. Графики оптимизации высоты двухпоясной купольной конструкции по критерию массы конструкции.

Высота конструкций, из которых составлены панели вспарушенных куполов с однотипными сечениями поясов, была выбрана близкой к оптимальной 400 мм (рис. 3.26). При выборе высоты конструкции исходили из габаритов монтажной панели и также из того, что вес отправочной марки для ручной сборки не должен превышать 50 кг.

3.3.2. Исследование конструктивно-технологических решений и узловых стыков двухпоясных оболочек из укрупненных неполных панелей.

Рядовые и монтажные соединения двухпоясных каркасных панелей из ферм, предложенных для стальных куполов-оболочек конструируем с учетом их расположения в узлах излома верхнего и нижнего поясов (рис.3.24 и 3.25). Для обеспечения необходимых переломов в узлах стержневые элементы поясов 1-3 метровых отправочных марок купола (рис. 3.24) привариваются к фланцам только после соответствующего косо́го реза их торцов. Аналогичные поясные элементы 2-4-метровых вставок и надворотных элементов (отправочные марки Ф906-Ф980), имеющей нулевой и отрицательный перегиб, отличаются прямым резом и обратным резом торцов элементов.

Кроме того, к собранным на монтаже фермам на серединах верхних или нижних поясов для прикрепления связей (из плоскости ферм) размещаются плоские проушины из полосового проката, приваренные продольными швами в заводских условиях к стержневым элементам замкнутого профиля указанных поясов. Монтажные стыки нижнего пояса фермы воспринимают продольное усилие растяжения поясного элемента, усилие сжатия и местную поперечную силу (рис. 3.30). Такая нагрузка во фланцевых соединениях без предварительного напряжения болтов (тип Б) вызывает в последних одновременное действие и растяжения, сжатия и среза, вынуждая их работать в условиях сложного напряженно- деформированного состояния [57, 158]. Более предпочтительны здесь фланцевые соединения с предварительным натяжением

болтов (тип А), величина которого такова, что продольная нагрузка не может разжать стянутые фланцы, а поперечная – преодолеть трение между ними.

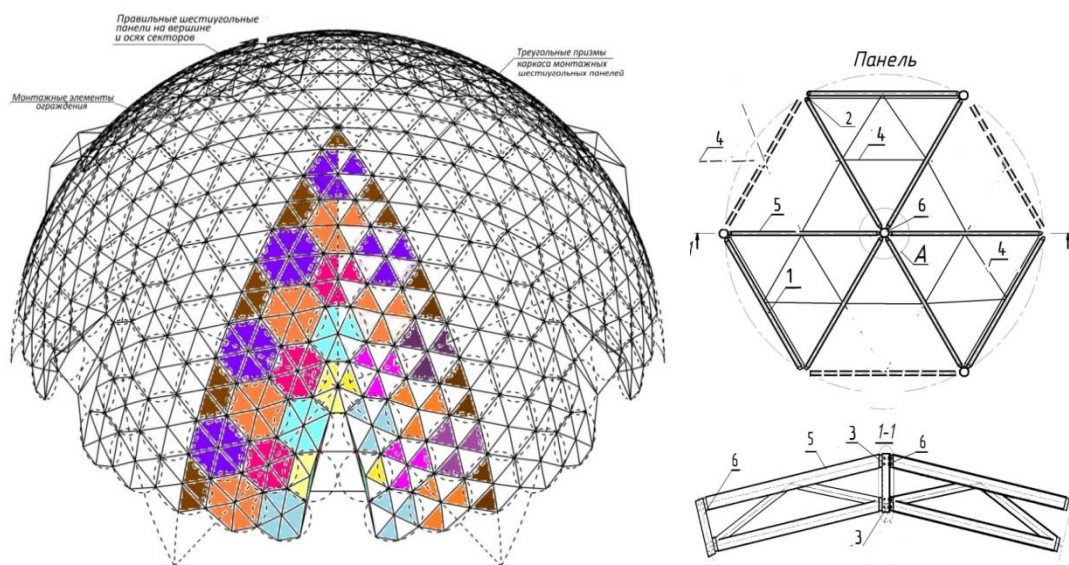
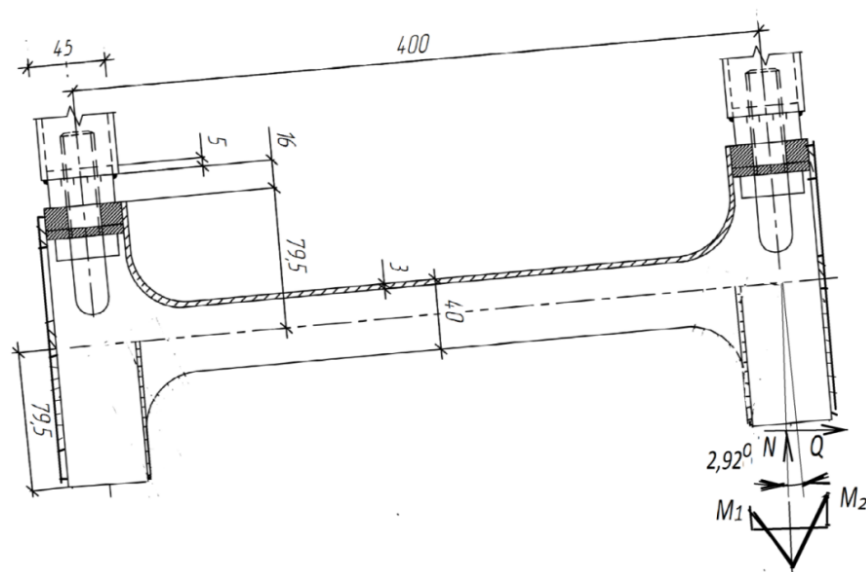


Рис. 3.27. Конструктивно-технологическое решение двухпоясного сетчатого купола:

а- схема сборной сферической оболочки из 6 секторов с углами на вершине 60° и с разрезкой из шестиугольных панелей; б - неполные монтажные панели купола со связями: 1 – ферма каркаса; 2 -временная связь на сварке; 3 - фрезерованные отверстия под болты; 4 - связи; 5 - стойка с трубчатыми узловыми элементами.

Рассмотрим расчет узлового элемента впарушенного купола-обоочки (рис.3.27). Для соединения с фланцами ферм принимаем болты не менее М16 класса 10.9. Расчетное усилие обеспечивает работу болта при растяжении с преднапряжением, чтобы фланцевое соединение соответствовало типу А. Рассчитываемое болтовое соединение размещаем безмоментно (симметрично) относительно центра тяжести сечения поясного элемента, как можно ближе к нему и с учетом минимально допустимых расстояний от профиля и ребра жесткости до оси болта и от оси болта до края фланца [58]. При этом каждый из болтов должен быть равноудален от профиля (см. фрагмент на рис. 3.28). Рассчитываемый фланец растянутых стыков приваривается к поясному элементу односторонними угловыми швами. Для обеспечения необходимой длины таких швов используются подрезка фланца до толщины не более 1,2 толщины профиля (см. на рис. 3.28).

а)



б)

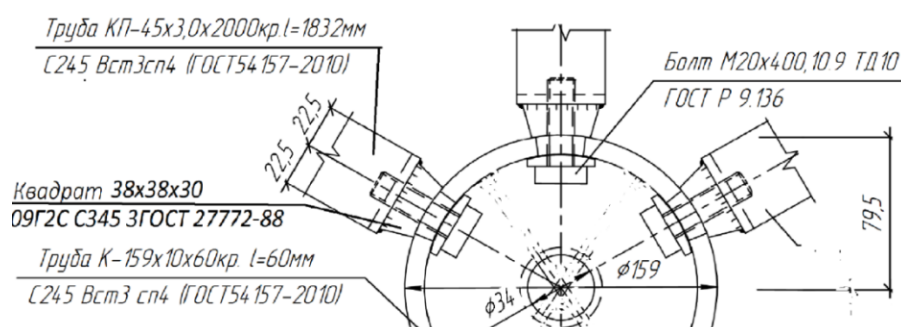


Рис. 3.28. Схемы монтажного стыка поясов фермочек: а - вид с местным разрезом; б - вид на узел сверху.

Для повышения степени унификации болтовые соединения, рассчитанные в растянутых стыках нижнего или верхнего поясов ферм, принимаем и в сжатых стыках верхнего пояса, где болты можно затягивать без их предварительного напряжения.

Высота фланца опорного узла подбираем таким образом, чтобы он для четкости опирания выступал минимум на 10 мм ниже сварного шва, соединяющего его с профилем пояса. Для лучшей пригонки опорные торцы фланцев необходимо фрезеровать. В монтажных стыках верхнего и нижнего пояса (рис. 3.28-2.30) фланцы имеют те же размеры, что и в опорных узлах купола.

Расчет однотипных рядовых и монтажных узлов проводим в основном на сжатие сосредоточенными силами P в секторах с $\alpha \approx 30^\circ$ (рис.3.29). Определяем нормальную силу и момент в трубе узлового элемента для наиболее невыгодного положения стержней.

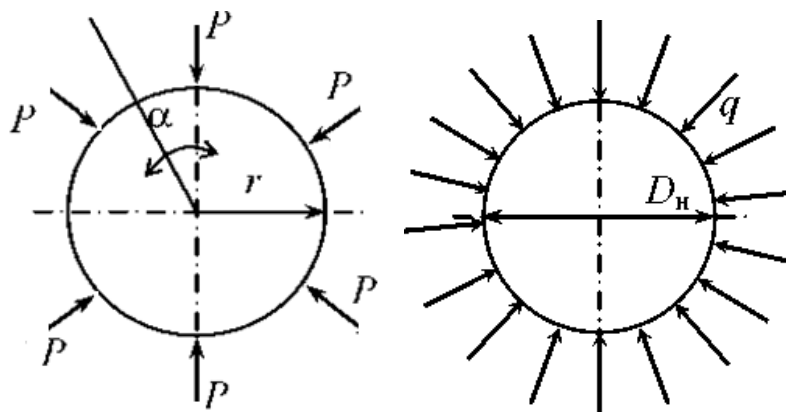


Рис.3.29 Расчетная схема узлового кольца

Проанализируем соединения и работу этого варианта ферм на монтажных и опорных узлах. На рисунках 3.27-3.30, 3.31-3.34 показаны соединения двух основных монтажных элементов: неполных панелей, опорных стоек и доборных элементов также в виде ферм.

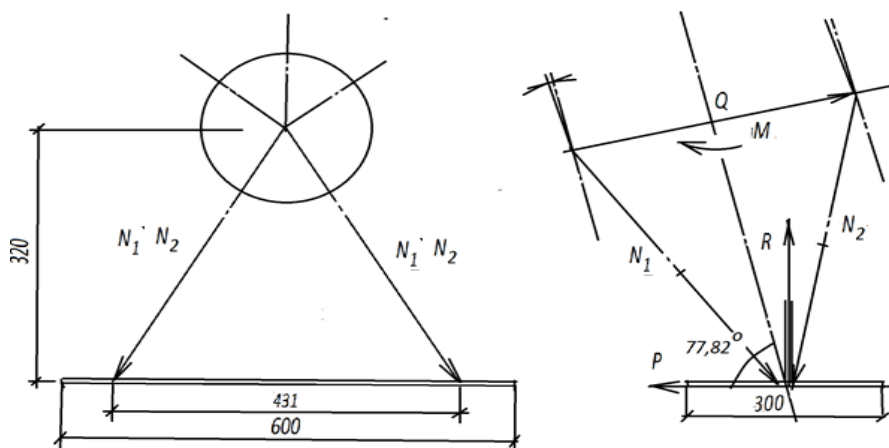


Рис. 3.30. Схема усилий для опорного узла марки Об купола.

Они обеспечивают соединения укрупнённых отправочных марок в виде неполных каркасных панелей-шестиугольников и двух других монтажных элементов по схеме, показанной на рис. 3.27. Панели в свою очередь состоят из ферм, которые образуют неполный каркас с временными и постоянными

связями (рис.3.27 б). В плоскости ферм они обеспечивают не только монтажную жесткость панелей, но и расчетную. Фермы соединены между собой через узловые элементы, уже показанные на рис. 3.28, 3.31-3.32.

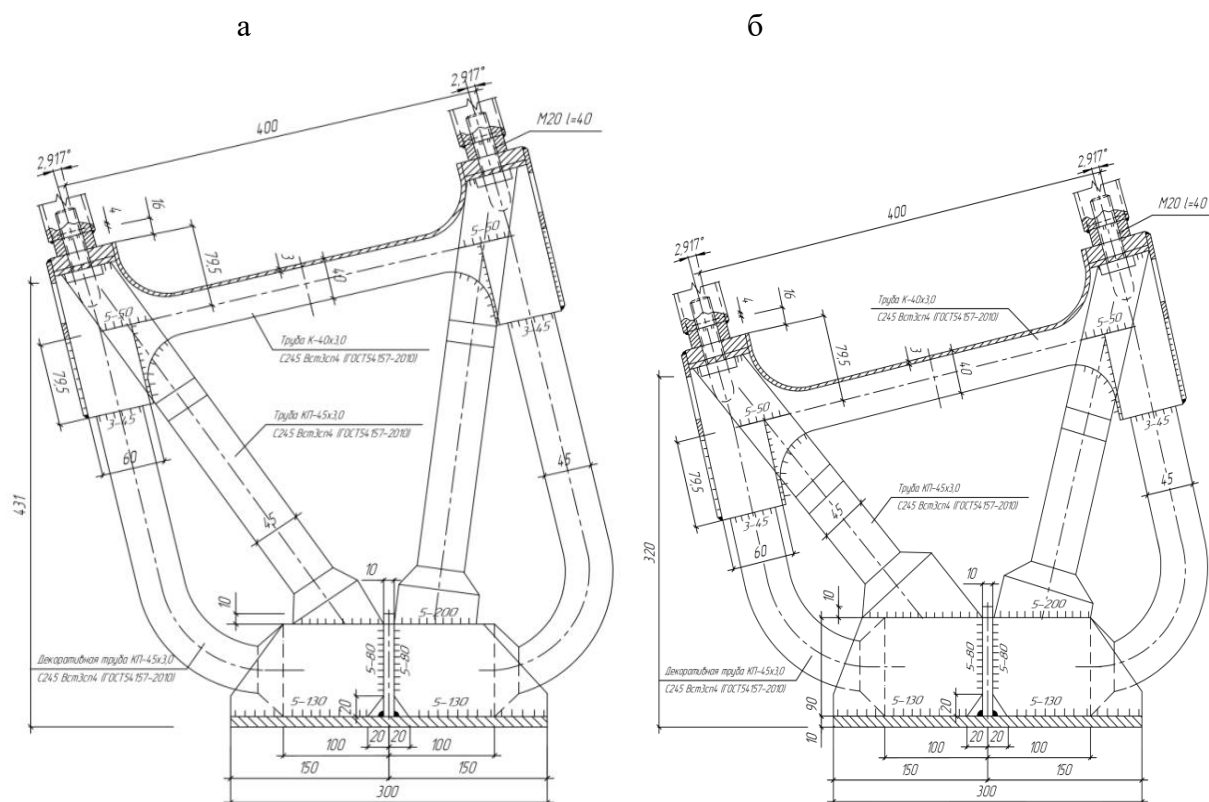
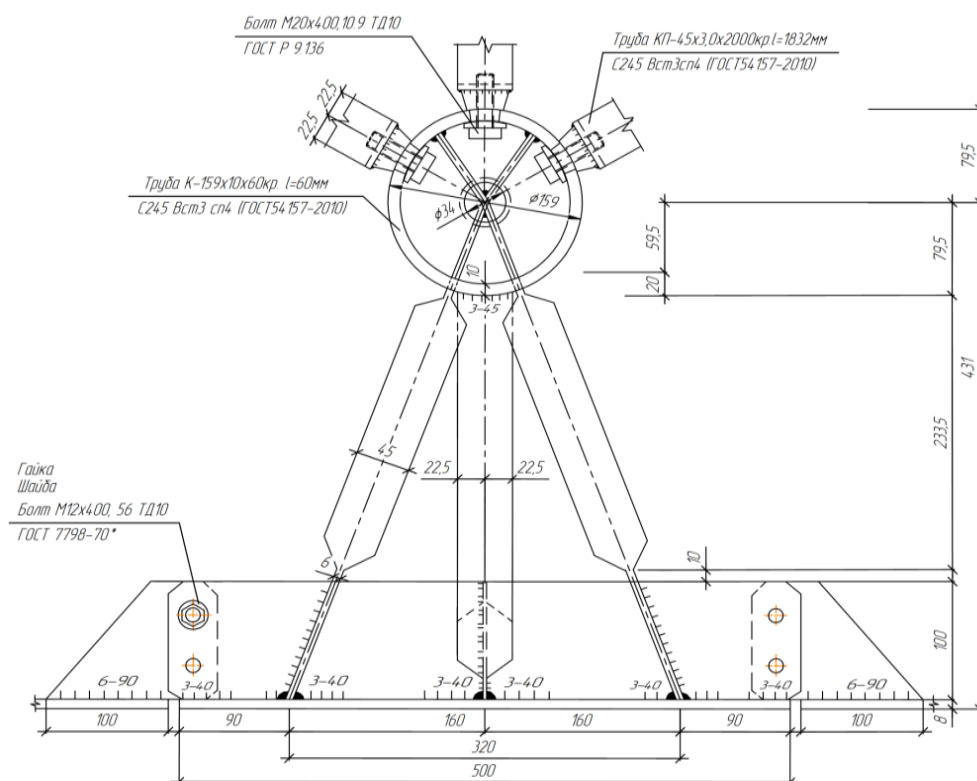


Рис.3.31. К расчету баз стоек: два типа опорных стоек впаируемого купола: а – марки О12 и б - О6.

Трубчатые торцы поясов ферм привариваются к фланцам (фланцы имеют резьбовые отверстия под узловые болты) с поясками на толщину металла труб, для лучшей проварки швов. Эти узлы отправочных марок ферм являются неразъемными сварными соединениями трубчатых стержней, как и соединения на сварке трубчатых раскосов и стоек к поясам ферм. Оси стержней ферм пересекаются в центре узлов, благодаря чему образуются конструкции с четкой расчетной схемой. Узел воспринимает усилия как растяжения и сжатия, так и моменты с поперечными усилиями, поэтому нет надобности в большем развитии сечений, как в рядовых соединениях, так и в монтажных. Опорные раскосы рассчитываем с учетом геометрической нелинейности для опорного

раскоса. Проверка устойчивости раскоса из плоскости действия изгибающего момента в виду симметричности сечения труб не требуется.

а



б

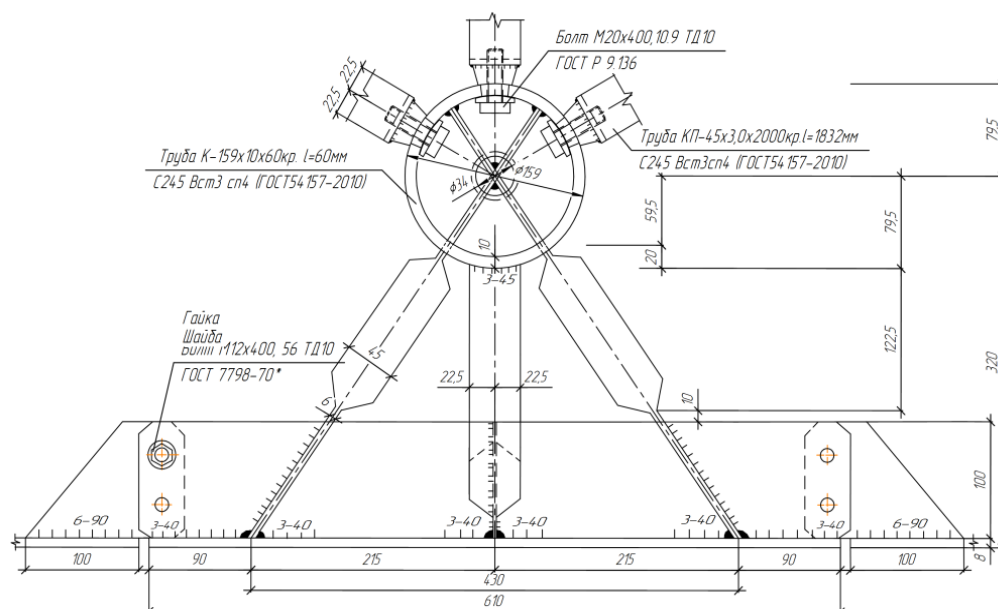


Рис.3.32. К расчету баз стоек: два типа опорных стоек: а – марки О12; б - О6.

Материалы опорной части предлагаемого купола выбираем как для временного сезонного сооружения. Так как элементы опор купола предают

нагрузку непосредственно и через ребро 520x100x8 мм, то нагрузку на стойку передаем через опорную плиту 520x260x8 мм, далее на подготовленное грунтовое или (другое) покрытие. Толщину опорной плиты и ее размеры в плане назначаем конструктивно, с учетом свесов (15...20 мм) плиты по контуру стойки для размещения ребер (рис. 3.33).

Задаемся шириной плиты и проверяем расчетом на прочность этой плиты, исходя из размещения на ней опорных стержней и сварных швов (рис. 3.33).

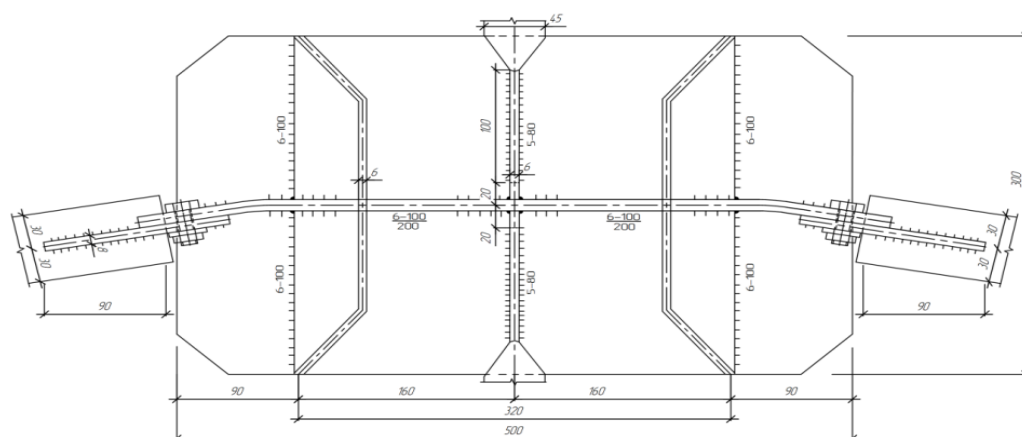


Рис. 3.33. Конструкция меньшей опорной плиты (стойки условно не показаны).

Прочность покрытия площадки при такой ширине плиты будет обеспечена (рис. 3.31-3.33).

Для обеспечения надёжности сборных двухпоясных куполов принимаем варианты жестких узловых соединений между панелями и внутри панелей и шарнирные соединения поясов. Такие соединения обеспечивают необходимую монтажную жесткость, как отдельных каркасных панелей-пирамид, так и монтажных частей купола (рис. 3.47-3.48) при сборке и установке его в проектное положение [29].

3.3.3. Исследование НДС сферических двухпоясных оболочек

Расчетные схемы, схемы нагружений и результаты расчета куполов предоставлены на рис. 3.24-3.25, 3.34-3.36. Принятые сечения приведены в работе [4].

Расчет на прочность элементов двухпоясного купола, подверженных внецентренному сжатию силой N , выполняем как для ригеля с жестко защемленными опорными частями. Расчетные длины элементов верхнего пояса ферм также принимаем как для неразрезного стержня постоянного сечения с различными сжимающими или растягивающими усилиями, моментом и поперечными силами (рис. 3.34, 3.39) на участках (число участков равной длины 2) в предположении шарнирного сопряжения элементов решетки и связей и определяем их как в плоскости пояса фермы или опорного раскоса, так и из плоскости пояса фермы.

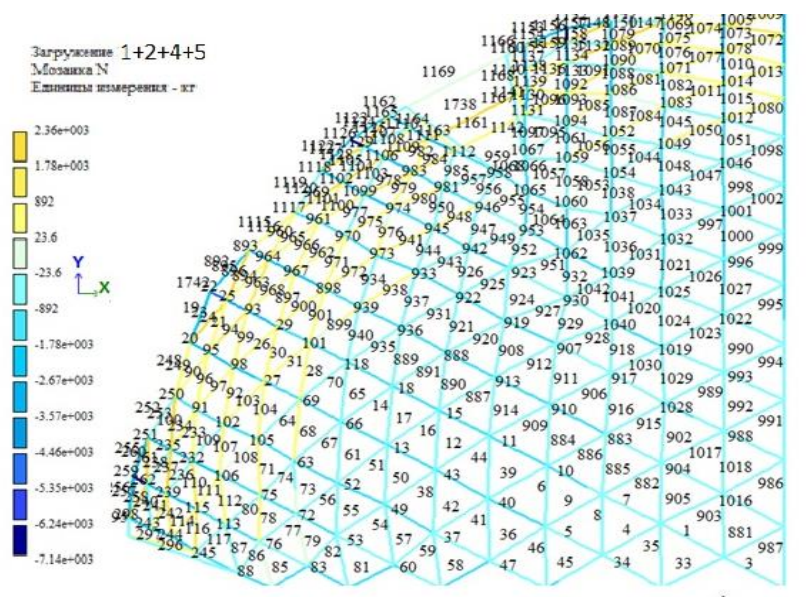


Рис. 3.34. Мозаика продольных усилий для расчетного сочетания 1+2+4+5 для однопоясного купола с заданной жесткостью элементов.

Для рассмотренных куполов-оболочек при использовании для опирания всех возможных узлов продольные усилия, моменты и поперечные силы в стержнях распределены неравномерно с увеличением к вершине.

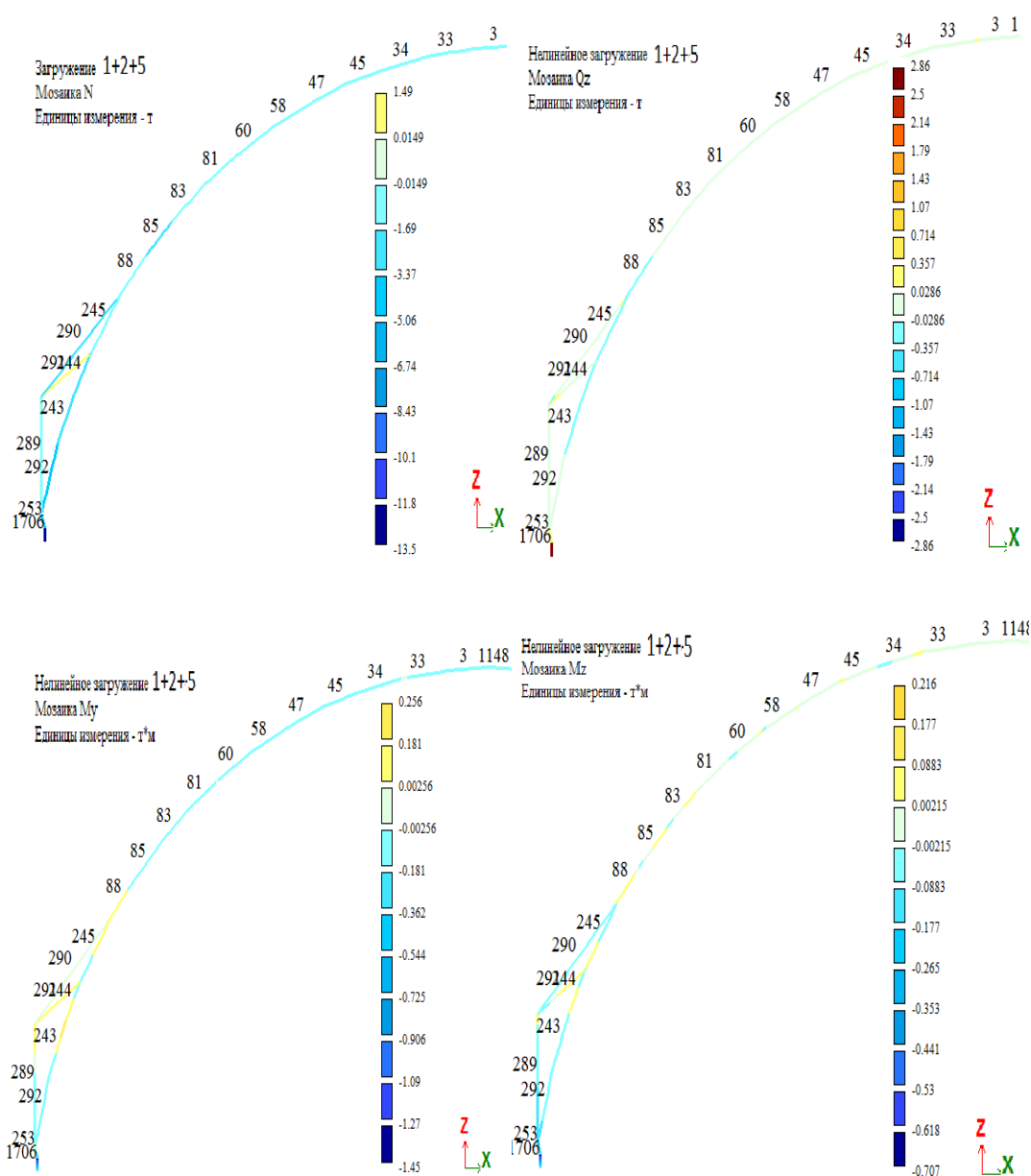


Рис. 3.35. Мозаика продольных, поперечных усилий и моментов для расчетного сочетания 1+2+5 для элементов у продольного разреза одноярусного купола.

При разрезении опор через одну происходит выравнивание усилий и моментов, что снижает число типоразмеров по сечениям элементов. Также из анализа закреплений видно, что уменьшение числа опор по сравнению с максимально возможными в два-три раза, только выравнивает распределение усилий в стержнях, далее при дальнейшем уменьшении наблюдается их концентрация.

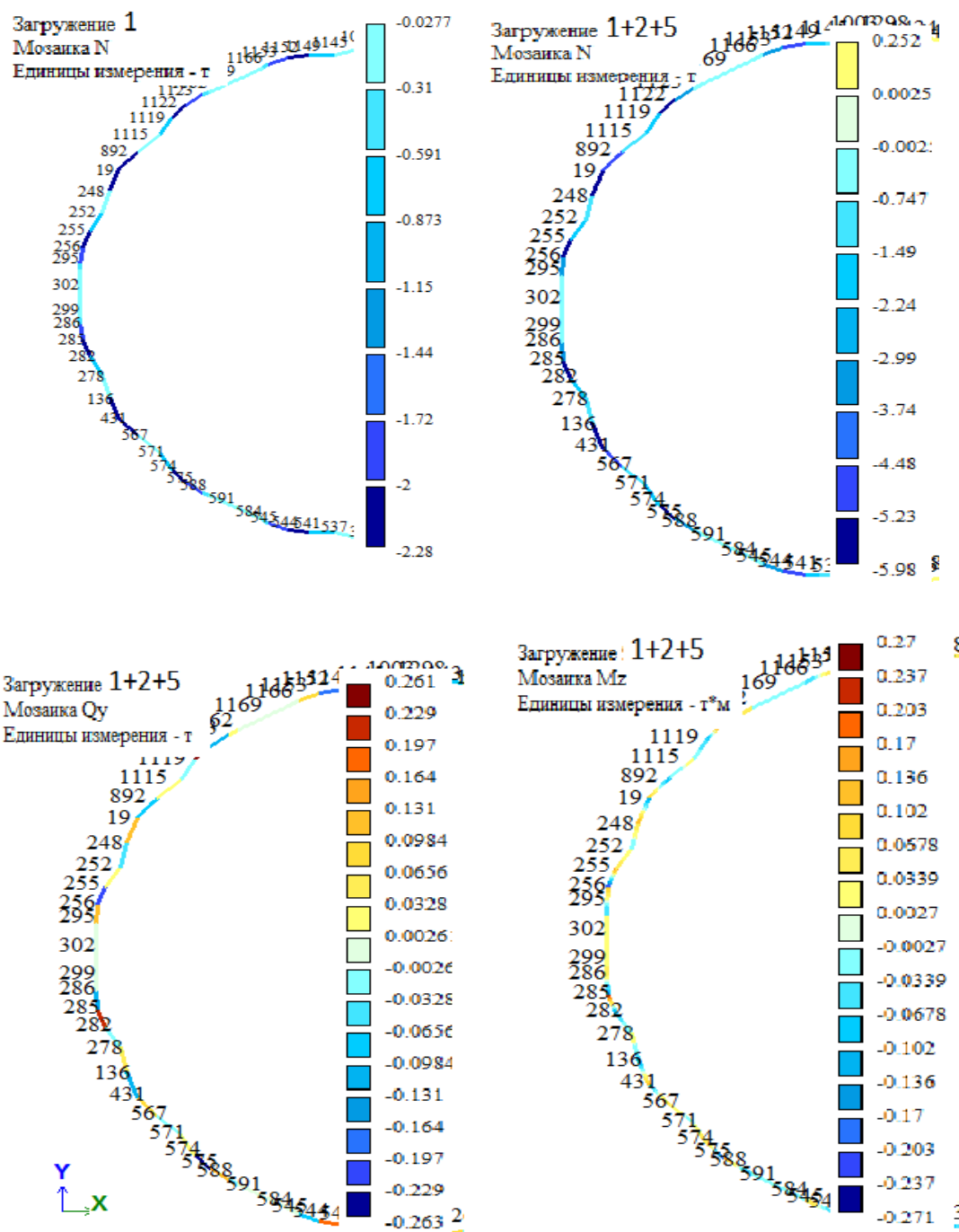


Рис. 3.36. Мозаики продольных, поперечных усилий и моментов для расчетного сочетания 1+2+5 для элементов нижнего контура однополюсного купола с заданной жесткостью.

Однако здесь нельзя плавно увеличивать разрежение опор из-за применения панельной сборки купола, поэтому оптимальным будет разрежение через 2-3 узла, так как далее увеличиваются приопорные усилия (рис.3.34, 3.36, 3.39).

Распределение усилий в основных опорных фермах панелей куполов-

оболочек, как уже было сказано, можно регулировать смещением опор внутрь или наружу от оси. Вариант смещения опор наружу и выравнивание усилий в опорной ферме показаны для двухпоясного купола на рисунке 3.38.

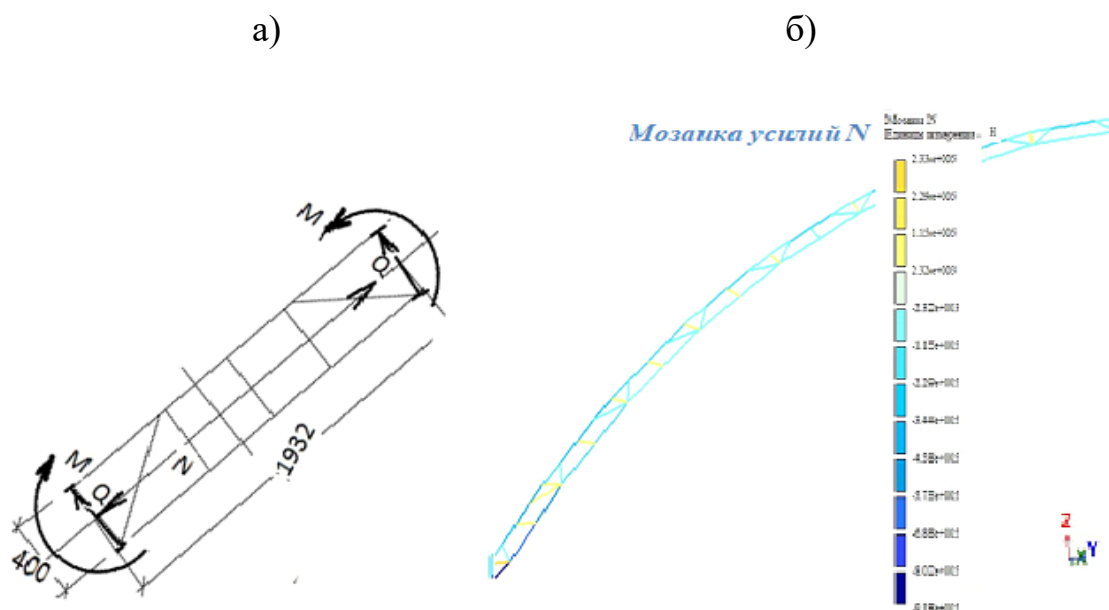


Рис. 3.37. Схема распределения усилий для приопорных ферм двухпоясных куполов: а – переход от усилий однопоясного купола к двухпоясному; б - мозаика продольных усилий при смещении опоры двухпоясного купола.

Для шарнирного опирания вспарушенного купола важным средством регулирования усилий остается применение оптимального эксцентриситета опирания. Его варьирование позволяет выравнивать усилия в поясах опорных фермах и снизить массу конструкции до 6-12%.

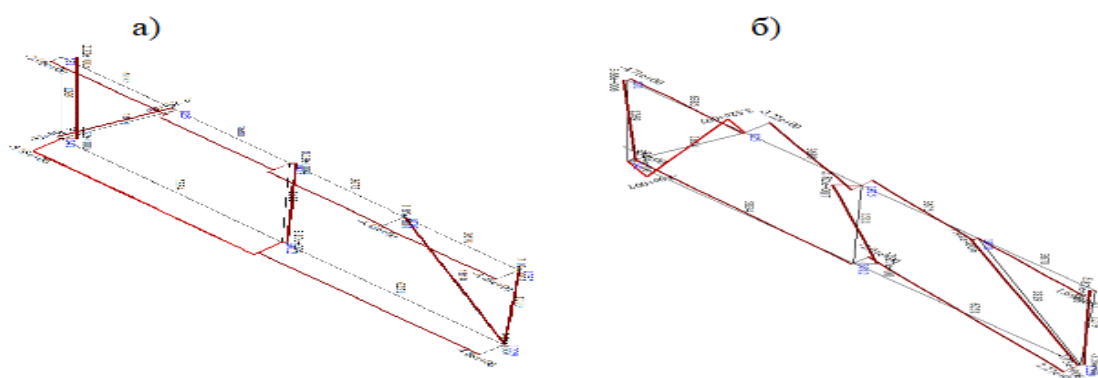


Рис. 3.38. Эпюры продольных усилий и моментов для опорной фермы купола спорткомплекса: а – эпюры продольных усилий; б – эпюры моментов.

Особенности оценки устойчивости отдельных элементов и общей устойчивости панельного двухпоясного купола-оболочки

При проектировании двухпоясных куполов-оболочек больших пролетов также обязательной является проверка местной и общей устойчивости конструкций. В таких куполах резко увеличивается статическая неопределимость расчетных схем и формы потери устойчивости усложняются. В двухпоясных куполах с секторами из сборных шестиугольных панелей следует учитывать влияние на общую устойчивость заданных самой разрезкой максимум шести и минимум трёх осей симметрии. Укрупнением в виде зеркально собранных в кондукторах панелей можно нивелировать асимметричные формы потери устойчивости и снизить вероятность общей потери устойчивости.

Для определения критической узловой нагрузки при потере местной устойчивости также предварительно вычисляется расчетное значение параметра начального отклонения по формуле (3.1):

$\zeta_0 = 0,65\delta/\beta^2$. где δ - допуск на изготовление отдельных стержней на болтах, принимается $\delta = 3$ мм.

Безразмерный параметр прогиба узла $\xi_0 = \alpha / \beta$ (здесь α - угол поворота стержня в радиальной плоскости в процессе деформирования). Расчетную длину l определяем, как среднее значение длин наиболее нагруженных ферм на стыке монтажных панелей. Далее также по формулам 3.2 и 3.3 определяем критические усилия в фермах и нагрузку на узел. Проверим условие по гибкости в плоскости фермы $\beta = 1/21 \geq 8,5/11,2$; из плоскости фермы $\beta = 1/21 \leq 8,5/93$.

Условие устойчивости для узловой нагрузки (предотвращение прощелкивания узла) можно определить по измененной формуле (3.3) с учетом двух поясов и раскосов, попадающих в сечение.

$$F_{cr} = 2E3A\beta^3 p.$$

Прощелкивание возможно при значительных деформациях из плоскости ферм, составляющих панели и при нагрузке на узел превышающей критическую. На рис. 3.39. показано влияние смещения низа опор для сферического купола при нормативных распределениях нагрузок на узлы купола при сравнении расчетных данных деформированной и недеформированной схем расчета.

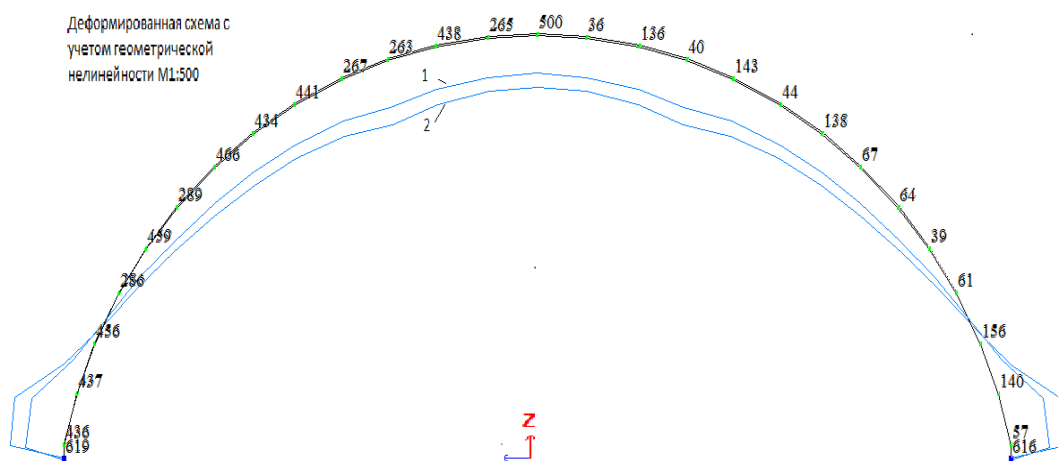


Рис. 3.39. Перемещения узлов и элементов модели с учетом геометрической нелинейности от действия суммарной симметричной нагрузки (данные расчета, 1 - $f \cdot \text{макс.} - 4,085$ мм, без смещения опор наружу на 100 мм) , 2 - $f \cdot \text{макс.} - 5,120$ мм).

Оптимизация купольной конструкции при варьируемых параметрах пролета, стрелы подъема высоты конструкции и жесткостей опорного кольца

Для заданных пролете и стреле подъема двухпоясной сборной оболочки использована оптимизация численными методами высоты купольной конструкции по критерию массы конструкции. Дальнейшие численные исследования приведем применительно к куполу пролетом 56.0м с высотой 600 мм, близкой к оптимальной. Результаты расчетов и оптимизации приведены на графиках рис. 3.40-46. При решении задачи численной оптимизации использованы автоматизированные средства в системах AutoCAD и LIRA-САПР 2013, с программными элементами (приложение 2, листинг 2.1).

Оптимизация проводилась для разной степени типизации панелей и ферм, составляющих панели.

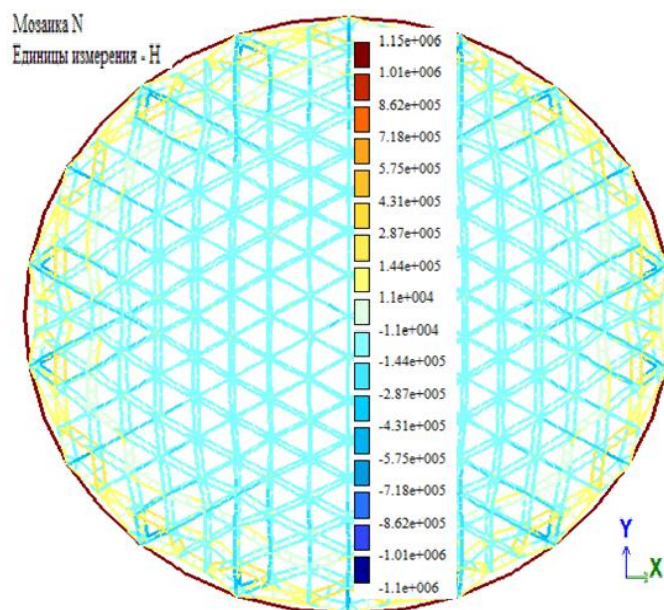


Рис. 3.40. Мозаика продольных усилий для расчетного сочетания для двухпоясного купола с заданной жесткостью стержней и опор.

С учетом ограничений, которые дают разрезы на основе секторов 60° , выбираем оптимальную по критерию минимума массы двухпоясную разрезку на сфере для заданных параметров купола из 3-х рядов повторяющихся окружностей (см. рис. 3.25, 3.40 - 3.46).

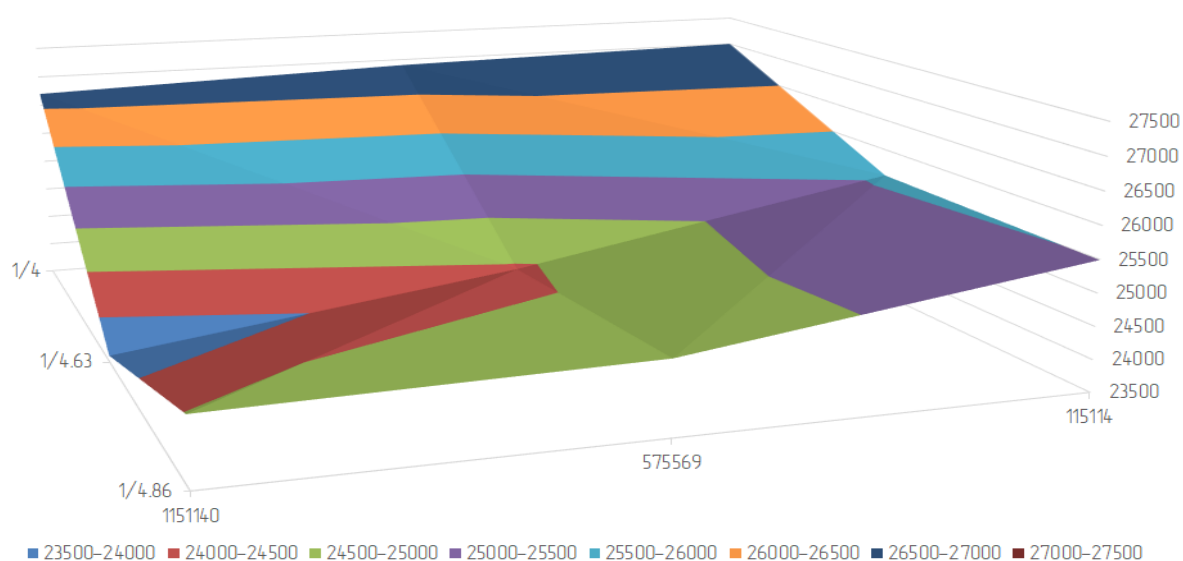


Рис. 3.41. Зависимость массы купола для разнотипных стержней от стрелы подъема к пролету и от жесткости опор.

Минимальной массой обладает несущая часть покрытия купола пролетом 56 м с отношением стрелы подъема к пролету $1/4,63$ с тремя опорами на сектор и жестким соединением с опорным кольцом максимально возможной жесткости с минимальной типизацией сечений.

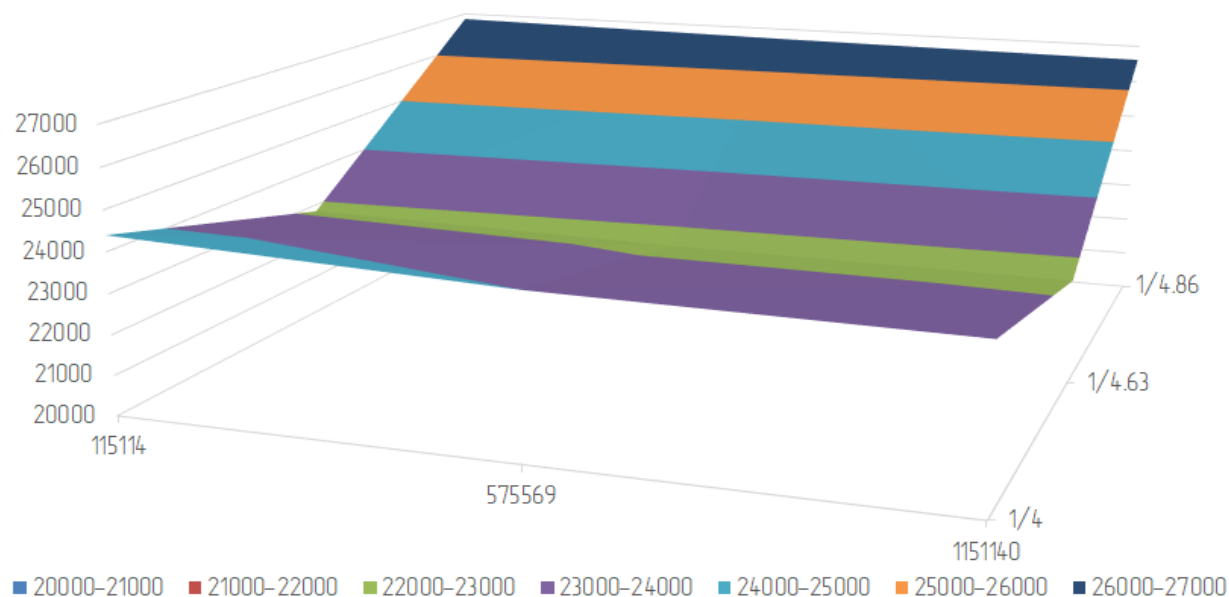


Рис. 3.42. Зависимость массы купола из двух типов стержней от стрелы подъема к пролету и от жесткости опор

В зависимости от степени типизации минимум резко выражен при отсутствии типизации сечений.

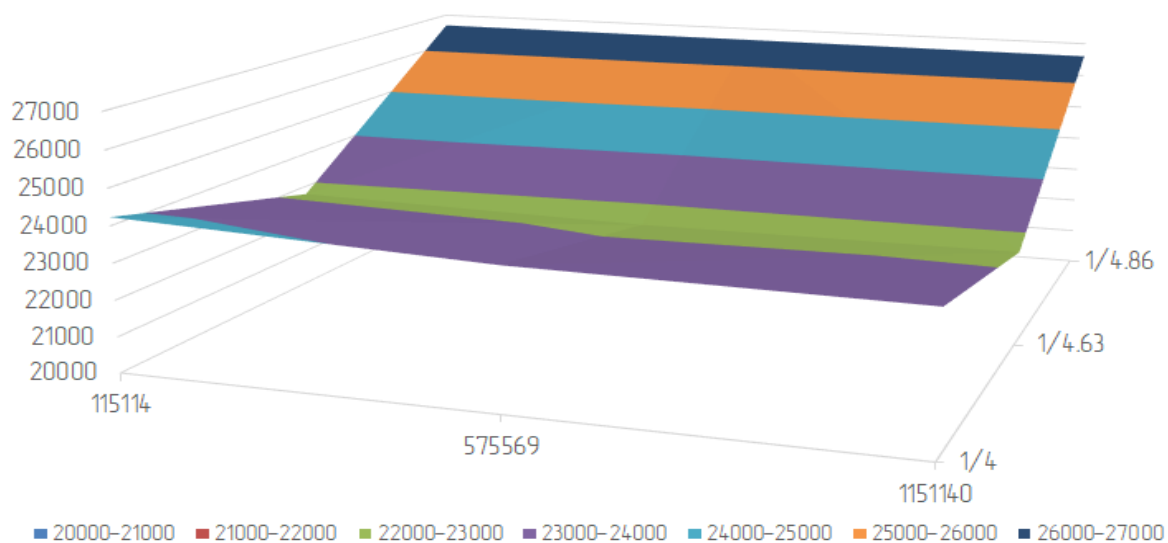


Рис. 3.43. Зависимость массы купола из одного типа стержней от стрелы подъема к пролету и от жесткости опор.

Для ограничения в виде двух типоразмеров сечений поясов и, соответственно, одного типоразмера сечения поясов, минимум массы всё менее зависит от отношения стрелы подъема к пролету и жесткости опорного кольца.

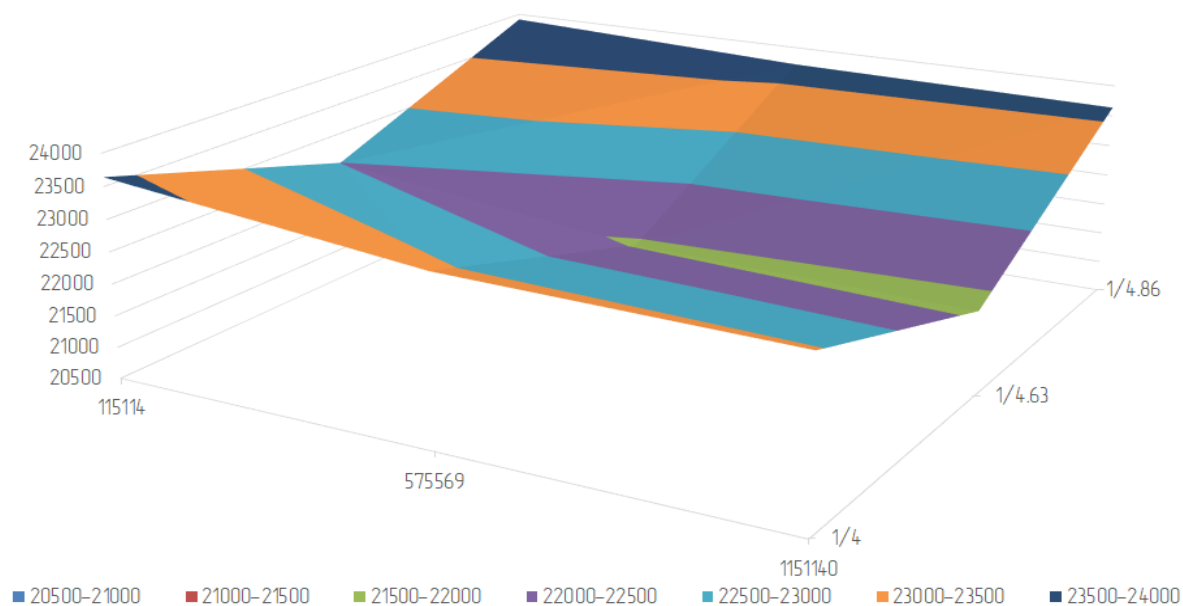


Рис. 3.44. Зависимость массы купола для разнотипных стержней от стрелы подъема к пролету и от жесткости опоры и с жестким опиранием на опорное кольцо.

Для жесткости опорного кольца влияние на массу выражено на графиках рис. 3.30 - 3.35 слабо, и с почти линейной зависимостью. Рассматривался также вариант влияния эксцентриситета или сдвижки опор внутри кольца.

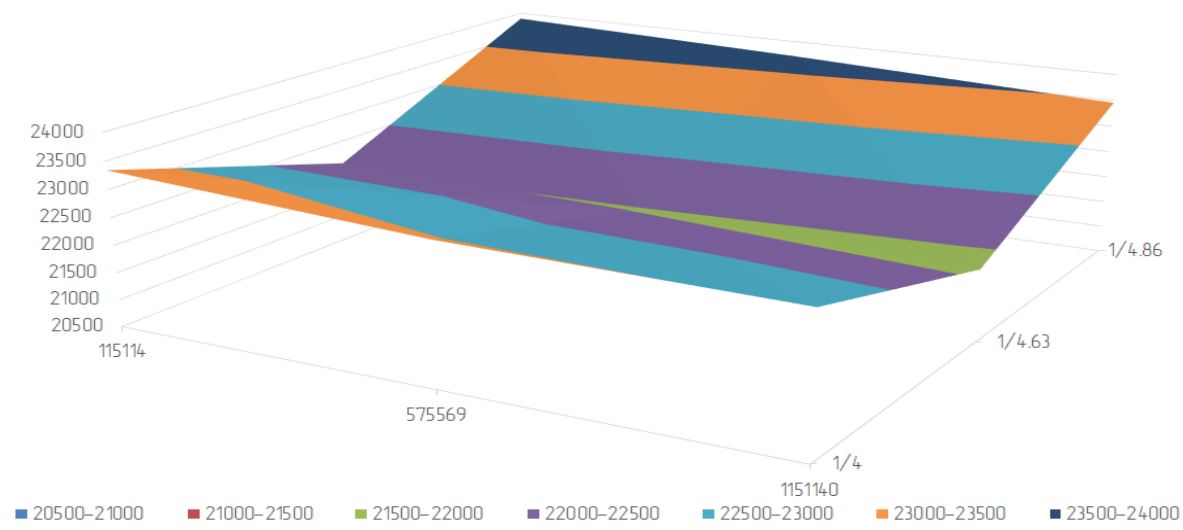


Рис.

3.45. Зависимость массы купола из двух типов стержней от стрелы подъема к пролету и от жесткости опор с жестким опиранием на опорное кольцо.

При этом происходит выравнивание опорных продольных усилий в фермах и это существенно снижает общую массу особенно типизированных конструкций. Полученные результаты позволили обоснованно предложить вариант конструктивно-технологического решения.

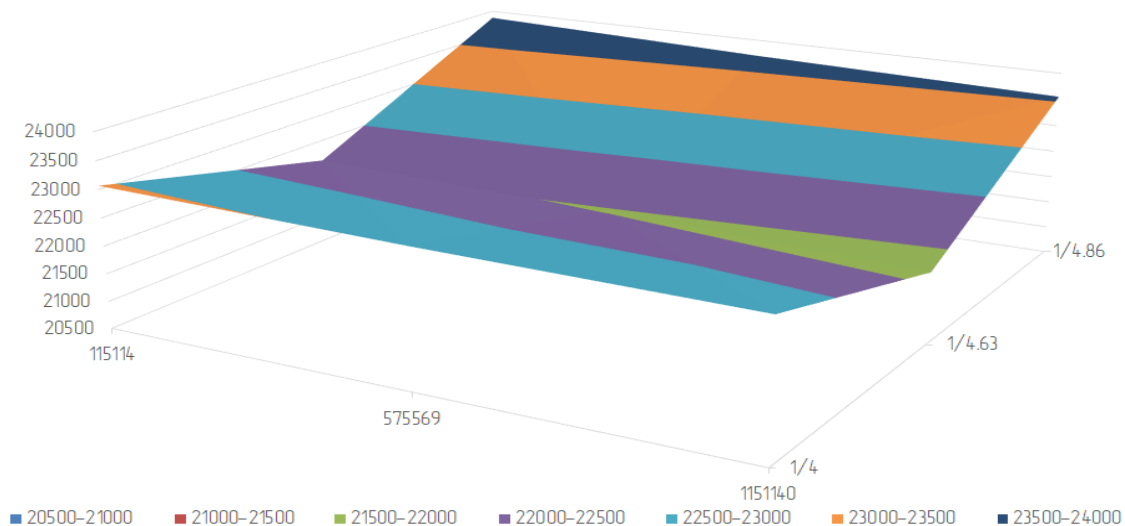


Рис. 3.46. Зависимость массы купола для одного типа стержней от стрелы подъема к пролету и от жесткости с жестким опиранием на опорное кольцо.

Учитывая проведенный анализ, купол-оболочка пролётом 56,0 м был принят двухпоясным в виде панелей из ферм из двух типов стальных профилей высотой 600 мм и стрелой подъёма 12,2 м, с жестким присоединением к опорному кольцу.

3.3.4. Оценка НДС варианта монтажного состояния.

Двухпоясные купола, как уже показано, эффективно собираются из укрупненных панелей (рис. 3.26), которые в свою очередь собираются из ферм (рис. 3.28-3.32). Наибольшие трудности вызваны необходимостью максимального снижения веса деталей, предназначенных для ручной сборки (рис. 3.47). Узловые соединения, предложенные для данной конструкции, позволяют несколько изменять длину стержней при изготовлении за счет подкладок к торцам ферм, что обеспечивает необходимый поворот при сборке и изготовлении монтажных панелей. Это очень важно, так как стержни куполов имеют различную пространственную ориентацию в каждом из узлов, что в

противном случае приводит к необходимости индивидуального изготовления большого количества типоразмеров узловых элементов.

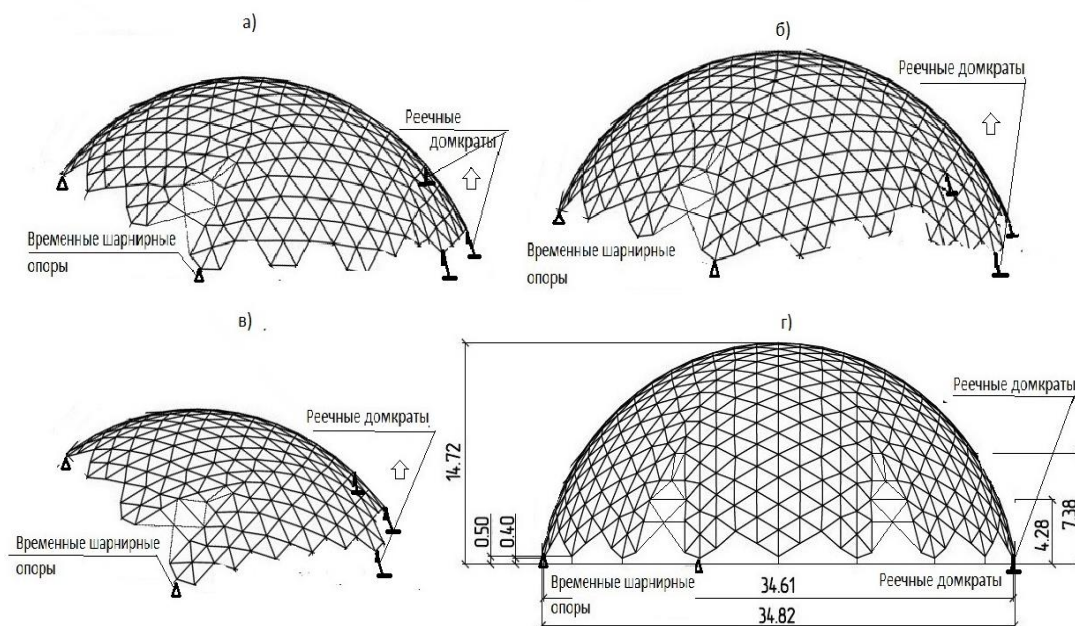


Рис. 3.47. Этапы монтажа купола способом «подъема с поворотом конструкции в целом».

Узлы обладают относительно низкой трудоемкостью изготовления (отклонения геометрических размеров элементов при изготовлении не должны превышать допуск 1,0-3,0 мм) и пониженной материалоемкостью при соблюдении условия равнопрочности сечений в соединительных узлах. Опорный контур этой сборной оболочки выполняется по аркам, выполненным по главным окружностям сферы, либо разомкнутым, в виде отдельных опор с двумя разными отметками и с использованием под входы участков разрезки из нестандартных панелей малого радиуса (рис. 3.24, 3.25), выполненных также по окружностям параллельным главным окружностям сферы, которые обозначены условно, как оси секторов. Таким образом, при монтаже купола собираются двадцать шесть типов отправочных марок, две из которых опорные стойки, две монтажные стойки, одна рядовая стойка и остальные марки в виде неполных шестиугольных панелей или доборных ферм проемов. При монтаже способом «подъема с поворотом конструкции в целом» [29] не используются подъемные средства для пролетов до 12 м (рис. 3.47).

При больших пролетах можно использовать речные домкраты, которые либо имеют эксцентриситет опирания, либо устанавливаются наклонно. При пролетах данного купола монтажные горизонтальные перемещения при прямых неподвижных и качающихся опорах могут превысить 20 мм (рис. 3.48). Поэтому предусматривается наклон опор до 15 градусов, с учетом сил трения. Монтаж начинается со сборки и установки опорных и монтажных стоек на секторе около $\frac{1}{4}$ части купола. После сборки двух рядов панелей и доборных элементов проемов часть в виде собранной арки поворачивается вокруг монтажных опор и устанавливается на речные домкраты и распорки (положение «в», рис. 3.47). Далее собираются следующие ряды панелей и собранная часть поднимается с поворотом вокруг монтажных опор в положение «а» и затем «б» рис. 3.47.

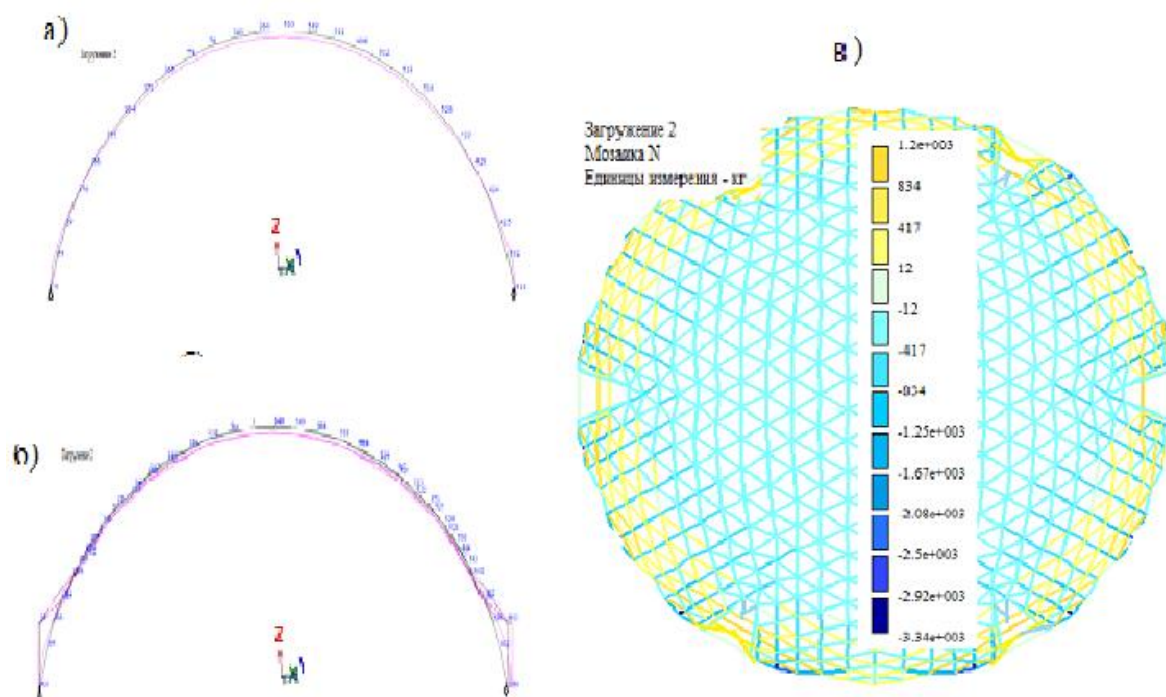


Рис. 3.48. Перемещения узлов и усилия в элементах купола при монтаже от действия суммарной нагрузки собственного веса и реакции наклонных монтажных опор (данные расчета, горизонтальные перемещения): а - $f_{\text{макс}}$ - 4,82 мм, без смещения опор наружу(наклона внутрь) до 15 градусов), б - $f_{\text{макс}}$ - 6,41 мм); в - мозаика продольных усилий.

После сборки двух рядов панелей и доборных элементов проемов часть в

виде собранной оболочки поворачивается вокруг монтажных опор и устанавливается на реечные домкраты и распорки (положение «в», рис. 3.47).

И на завершении, купол устанавливается в проектное положение на опорные элементы и монтажные опоры заменяются на рабочие опорные элементы в монтажном положении «г».

3.4. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СОСТАВНЫХ МОДУЛЕЙ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ

3.4.1. Особенности выбора расчетных моделей структурного покрытия

Возможности предлагаемых сборных сферических оболочек позволяют эффективно решать задачи проектирования структурных модульных покрытий зданий. Для оценки предложенных специфических конструктивно-технологических решений приведем примеры разработки составных модулей пролетом 18,0 м с соотношениями высоты к пролету более 0,1- 0,2. Сферические сборные модули запроектированы на основе двухсетчатой (двухуровневой) разрезки по приведенной классификации ТА60ППС [4]. Поскольку предложенная разрезка со своей опорной сетью не дает в проекции правильный шестиугольный контур, центральный участок сферы с вершиной секторов и опоры контурного шестиугольника устраиваем не по оси сектора с правильными шестиугольными панелями, а по его границам. Здесь имеются искаженные плоские шестиугольники уменьшенных радиусов, поэтому безболезненно можно провести смещение опорной сети до получения правильного контура с опорами на углах этого шестиугольника (рис.3.49, 2.19).

При проектировании сферического модуля из пирамидальных каркасных укрупненных элементов также должны быть решены специфические задачи определения значений геометрических отклонений и параметров геометрии конструкции при расчете по деформированной схеме, а также оценки величины критической узловой нагрузки. Также необходимо иметь в виду, что при

сборке модуля имеется возможность сортировки уже изготовленных деталей по размерам для укрупнительной сборки элементов конструкции и, затем сортировки самих укрупненных элементов для их размещения в системе покрытия. Это также уже естественным способом позволяет произвести рациональную раскладку элементов с учетом деформированных схем покрытий.

В модулях структурного покрытия предлагаемых разрезов имеется возможность такого размещения неправильных и правильных шестиугольников, когда обеспечивается уменьшение не только числа типоразмеров элементов, но и числа типоразмеров опорных узлов, за счет их устройства на одном уровне выше экватора (глава 2, рис. 2.19 а, 2.20), и как показано на рисунке 3.49. Разрезка такого сферического модуля имеет 5-12 типоразмера стержней, 3-6 типоразмеров монтажных элементов и один симметричный типоразмера опорного узла (см. рис. 3.50).

Для обеспечения надёжности структурного модульного покрытия ниже предложены как варианты жестких узловых соединений между панелями, так и варианты шарнирных соединений. Эти соединения должны обеспечить необходимую монтажную жесткость, как отдельных каркасных пирамид, так и монтажных частей купола (рис. 5.10) при сборке и установке его в проектное положение [16]. Для конструирования составного структурного покрытия из типовых модулей была вначале определена его оптимальная геометрия, далее оптимизированы отдельные его геометрические, технические и эксплуатационные параметры, затем проведены анализ и разработка специфических узловых соединений. При оценке предельных состояний предложенной конструкции определяющим является достижение предельных состояний не отдельных элементов, а конструкции в целом, причем при расчете по первому предельному состоянию - превращение системы в механизм, при расчете по второму предельному состоянию – достижение максимально допустимых прогибов, значения которых точно регламентируются.

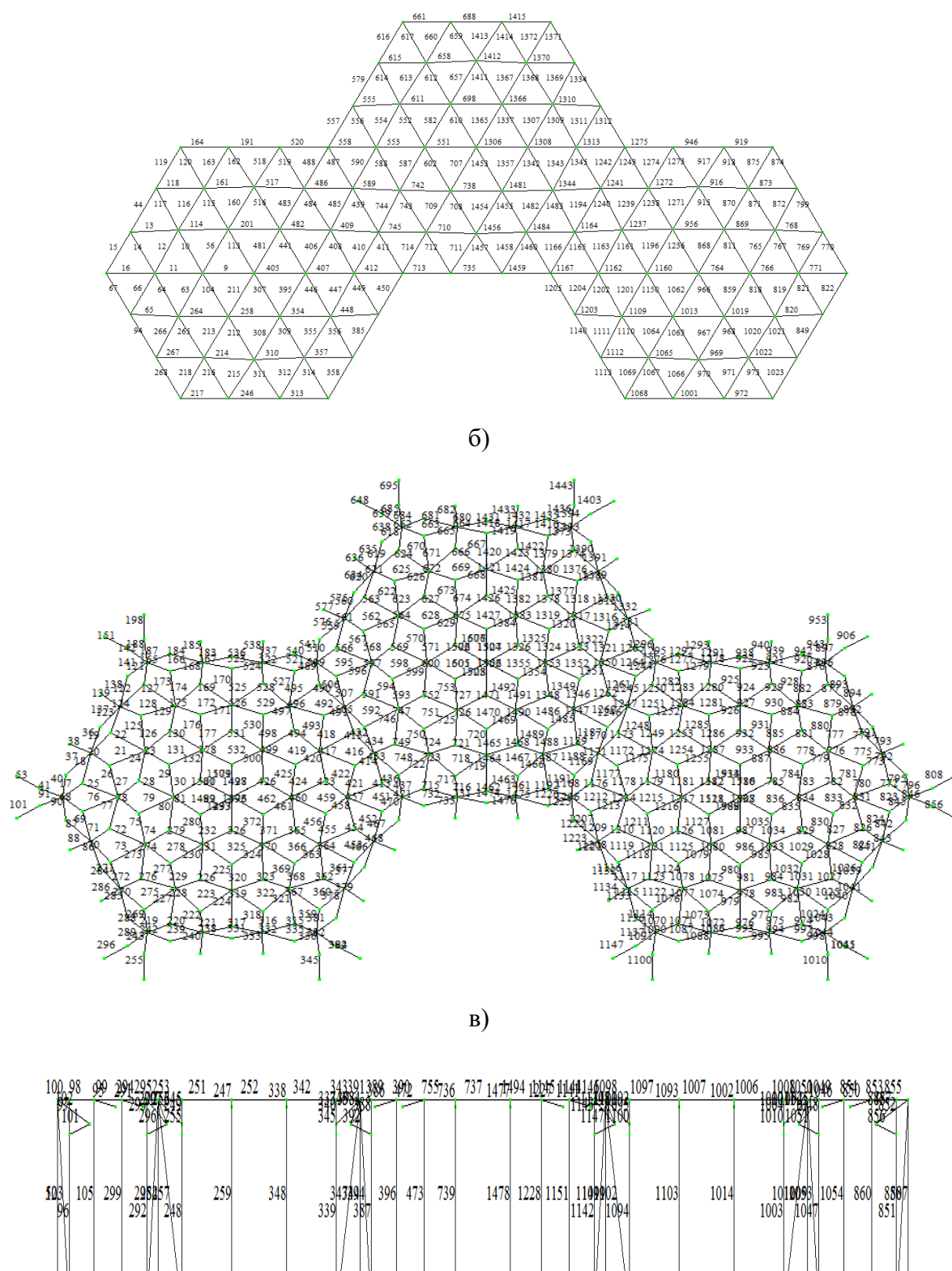


Рис. 3.49. Схемы структурных модулей: а - нумерация стержней нижнего пояса; б – нумерация стержней раскосов; в- нумерация узлов каркаса фасада.

Данный вариант конструкции представляет собой составное сборное структурное покрытие, установленное на опорах и выполненное в виде шестиугольной двухуровневой решетчатой оболочки (рис.2.20-2.22, 3.49, 5.11).

Структурный модуль покрытия, согласно работам [16,137], содержит основные трубчатые стержни с торцевыми элементами, образующие треугольные и шестиугольные ячейки, которые соединены узловыми основными элементами, для объединения модулей применяем стыковочные стержни и узловые элементы. Для завершения покрытия включаются контурные стержни и узловые элементы, для опирания элементов покрытия выполнены концевые стержни и узловые элементы, рядовые и опорные стойки, а также стойки и связи вертикального ограждения.

При этом контурные стержни и узловые элементы нижнего пояса в виде треугольной сетчатой оболочки существующих разрезов смещены так, что только проекции контурных стержней и узлов образуют правильный шестиугольник с опорами в углах, которые также смещены наружу для восприятия распора. Верхний пояс имеет стыковочные горизонтальные стержни, симметричные относительно проекций контурных стержней, стыковочные и контурные узлы поясов развернуты для их соединения с соседними блоками или концевыми стержнями модуля.

3.4.2. Исследование конструктивно-технологических решений сферических структурных модулей

Составные модули структурного покрытия первого варианта собираются из укрупненных элементов, которые в свою очередь собираются из стальных трубчатых стержней и узловых элементов. В процессе разработки модуля был детально разработан болтовой узел стержней структурного покрытия [57, 137], собираемого поэлементно или из монтажных неполных шестиугольников (вариант 1, рис. 3.50-3.59).

Для создания компактного узла, узловой элемент выполнен в виде

штампованного полого шара с резьбовыми отверстиями. Болтовое соединение выполняется по типу системы «Мархи» с муфтой и шплинтом. Для размещения в узле до 14 элементов, торцы труб сплющиваются для приваривания в торцах стального фланца минимально возможного диаметра. Сплюснутые части труб подрезаны во избежание острых углов и обварены по свободным торцевым резам.

Предложенные решения торцов трубчатых стержней позволяют присоединять их под углами 50-72 градуса, а также позволяют реализовать способ монтажа [137] из неполных каркасных шестиугольных панелей, что уменьшает вес монтажных панелей, в отличие, от существующих панелей структур. Узловые соединения, предложенные для данной конструкции позволяют также несколько изменять длину стержня при изготовлении за счет изменения размеров муфт, нивелируя неточности изготовления. Для стержней верхнего и нижнего поясов, а также раскосов возможна сортировка уже изготовленных элементов по длине и распределение их симметрично относительно центра каждого модуля и его шести осей, для обеспечения идеальной симметрии покрытия и преодоления влияния деформирования схем модулей под нагрузкой.

Усилия в стержнях и перемещения в узлах для основного варианта структуры показаны на рис. 3.57-3.58, 3.60. Наибольшие усилия характерны для контурных стержней каждого модуля и опор, также для узлов контуров модулей и ограждения отмечены наибольшие перемещения.

Соединения стержней структуры стального купола с торцевыми фланцами конструируем с учетом их расположения в узлах под разными углами. Стержневые элементы структуры отправочных марок привариваются к фланцам только после соответствующей их подготовки. Круглая заготовка для фланцев должна иметь т-образный профиль с толщиной пояска, близкой к толщине трубы стержня (рис. 3.51-3.56).

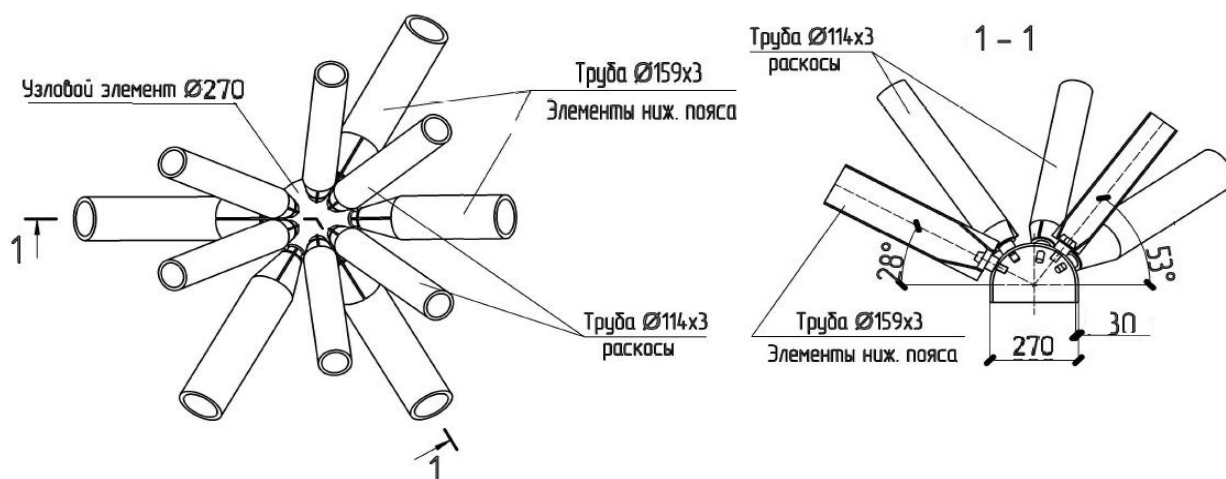


Рис. 3.50. Схемы опорного узлового элемента: а - вид на узел сверху; б - вид с местным разрезом.

Стыки стержней структуры воспринимают продольное усилие сжатия, для некоторых центральное растяжение. Такая нагрузка во фланцевых соединениях без предварительного напряжения болтов (тип Б) вызывает в последних одновременное действие среза и растяжения, сжатия и среза, вынуждая их работать в условиях сложного напряженно-деформированного состояния.

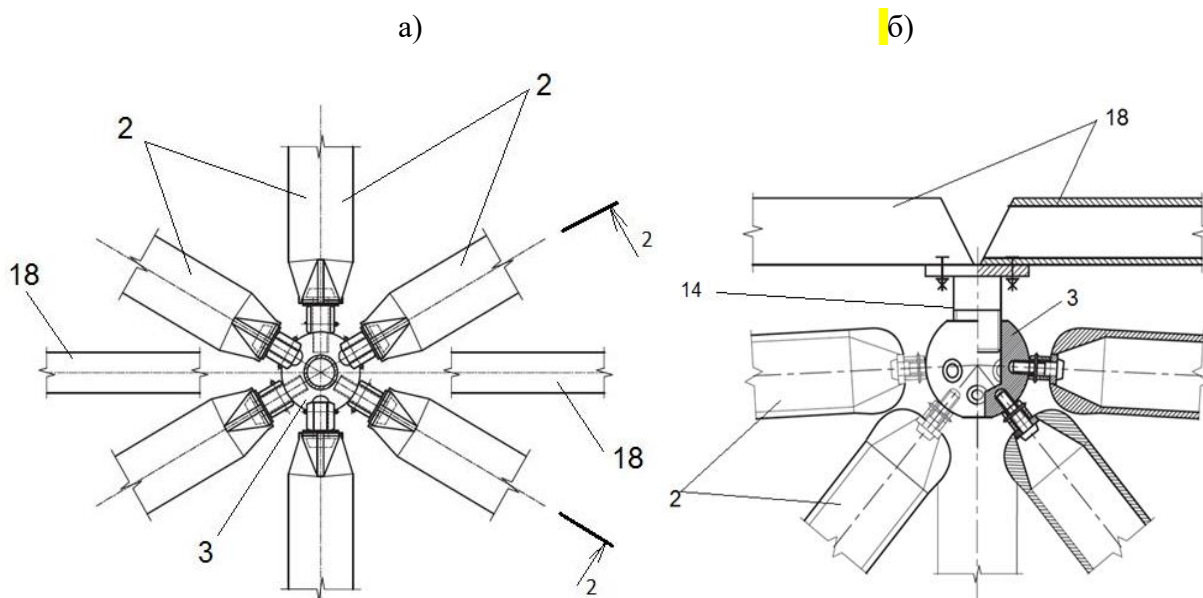


Рис. 3.51. Схема верхних узловых элементов структуры: а, б) 2 - трубчатые стержней верхнего и решетки; 3 - узловой элемент; 14 - рядовые стойки; 18 – прогоны покрытия.

Для повышения степени унификации болтовые соединения, рассчитанные в растянутых стыках нижнего или верхнего поясов, целесообразно принять и в сжатых стыках верхнего пояса, где болты можно затягивать без их предварительного напряжения. Сжатые фланцы и шайбы могут быть в 1,5...2 раза тоньше растянутых (рис. 3.50-52).

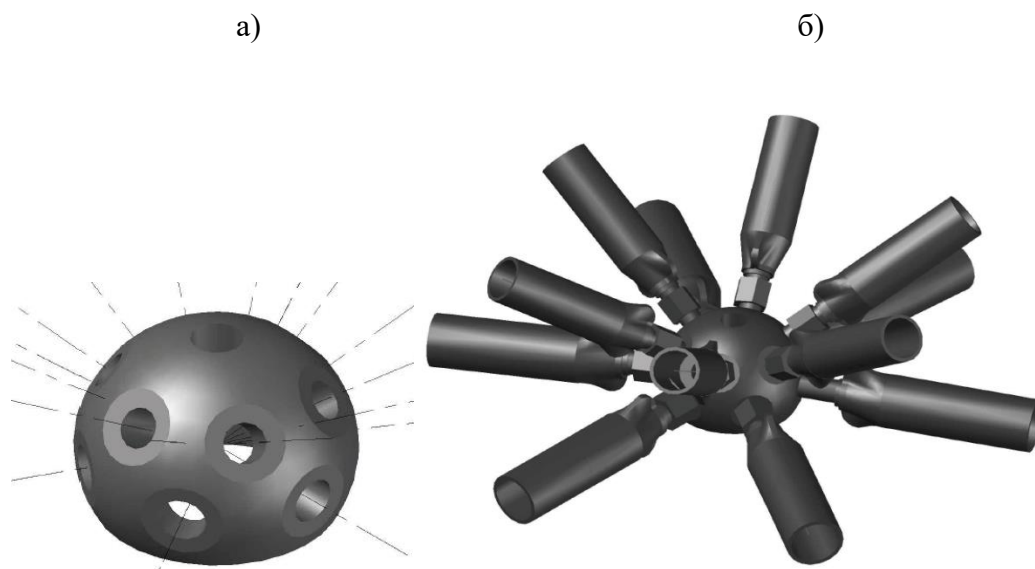


Рис.3.53. Компоновка варианта I узлового элемента структуры.

Высота фланца опорного узла подбирается таким образом, чтобы он для четкости опирания выступал минимум на 5 мм ниже сварного шва, соединяющего его с профилем пояса. Для лучшей пригонки опорные торцы фланцев необходимо фрезеровать.

В монтажных стыках верхнего и нижнего пояса (рис. 3.51-3.53) узловые элементы имеют меньшие размеры, чем в опорных узлах купола (рис. 3.50). Так как высоты сечения стойки опор $h = 325-400$ мм, а диаметры опорного шара 270-300 мм, то нагрузку на стойку модуля предаем без ребер жесткости через опорную плиту оголовка, далее на стенку стойки (рис. 3.50).

Толщину опорной плиты оголовка и ее размеры в плане назначаем конструктивно, с учетом свесов (15...20 мм) плиты по контуру колонны для размещения сварных швов.

Опорные узлы воспринимают значительные усилия как растяжения и сжатия, так и моменты с поперечными усилиями, поэтому нет надобности в избыточном развитии сечений, как в рядовых соединениях, так и в монтажных.

Эффективные варианты узловых соединений составных структурных покрытий

В процессе проектирования структуры помимо варианта I [16, 137, 138] с болтовыми узлами для соединения стальных трубчатых стержней двухпоясного сферического покрытия (рис. 3.50, 3.53) разработан эффективный вариант II с применением стержней из клеёной и цельной древесины.

Поисковые натурные исследования предложенных решений с деревянными элементами с вклеенными стальными трубами, выполненными с концевыми деталями по типу узлов «Мархи», позволили назначить параметры клеевого соединения на эпоксидном компаунде [16, 28]. Размеры вклеенных узловых элементов приведены на рис. 3.54.

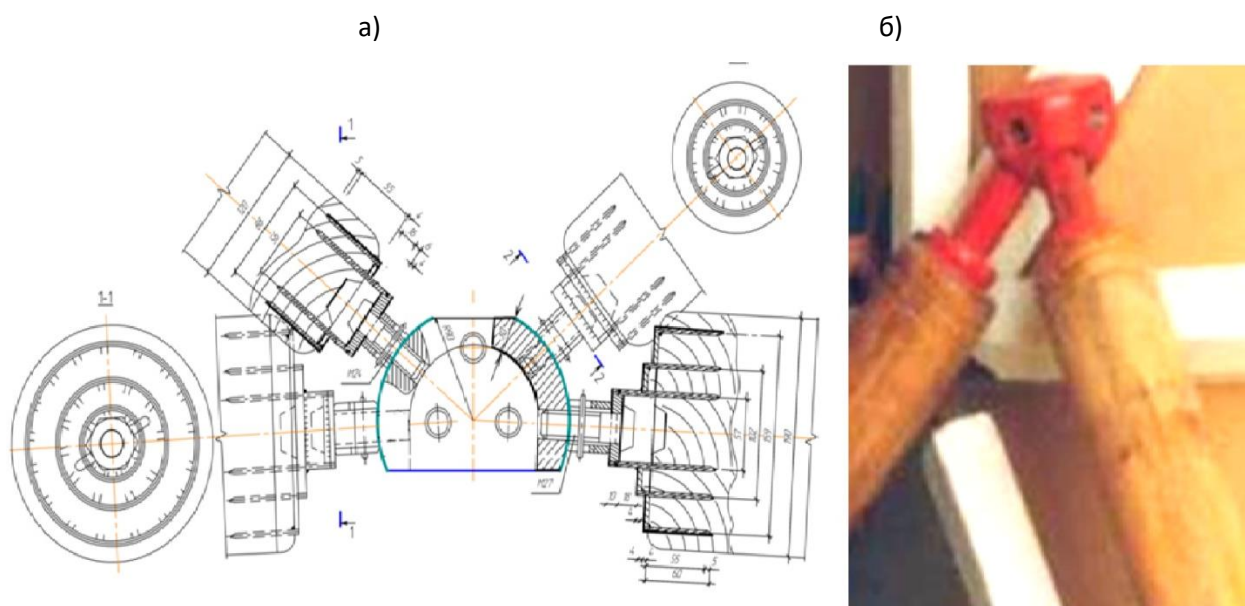


Рис. 3.54. Вариант II узлового соединения из цельно-деревянных элементов: а – со вклеенными узловыми элементами из стальных труб трех диаметров в торцах деревянных стержней нижнего пояса структуры; б) – со вклеенными узловыми элементами из стальных труб двух диаметров в структуре плиты и куполе «Искусственный небосвод» из цельно-деревянных стержней.

Учитывая, что максимальная несущая способность соединения со вклеенными трубами достигается при соотношении глубины вклеивания к толщине труб $1/18-1/21$ и при соотношении условного шага диаметров труб к глубине вклеивания $1/5-1/7$, принимаем глубину вклеивания 60 мм.

На рис. 3.55 и 3.56 показан третий вариант решения узла структуры на сварке и со сплюснутыми торцами прямоугольных и квадратных труб [16, 138]. Трубчатые стержни структурного покрытия здесь соединены между собой непосредственно, либо через узловые элементы на сварке.

Торцы трубчатых стержней для соединения на ванной сварки в узле могут быть сплюснуты с двойным перегибом стенок труб для усиления узла. Во избежание острых углов, стержни нижнего пояса уложены в прорези узлового основного элемента в виде штампованной нижней полусферы, также основные трубчатые стержни решетки установлены на нижнюю полусферу и все стержни узла соединены ванной сваркой. Затем верхние полусферы установлены на узлы нижнего пояса и проварены по прорезям и по стыку с нижними полусферами.

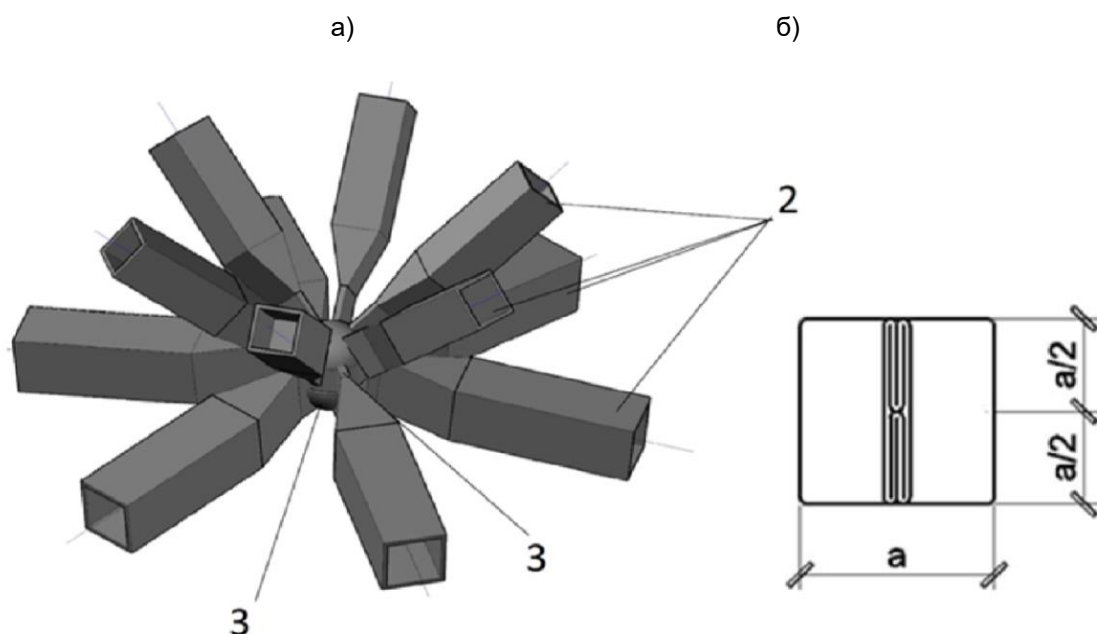


Рис.3.55. Вариант III компоновки узлового соединения элементов структуры: а) узел нижнего пояса; б – двойные перегибы в сплюснутых торцах труб.

После этого в нижние полусферы верхнего пояса установлены стержни решетки и соединены дуговой электросваркой по соответствующим прорезам, далее на нижние полусферы верхнего пояса установлены стержни верхнего пояса и все стержни узла соединены ванной сваркой, затем устанавливаются на эти узлы верхние полусферы и привариваются к стержням и к нижним полусферам. Узловые соединения этого варианта конструкции позволяют несколько корректировать длину стержня при ванной сварке.

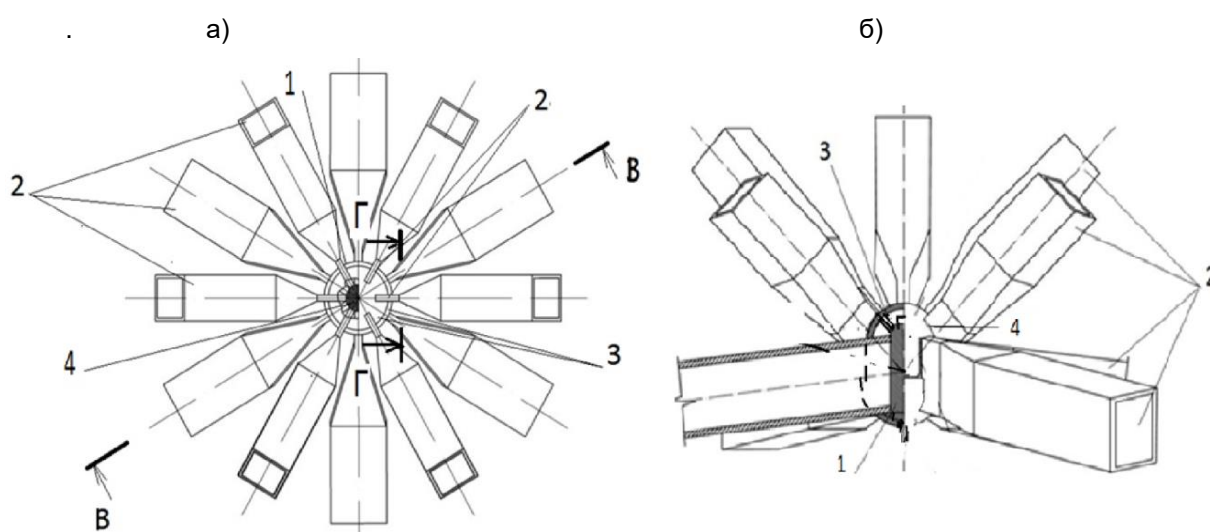


Рис.3.56. Вариант III узлового соединения (а, б) элементов структуры: 1- ванная сварка; 2- элементы пояса и решетки, 3- узловой элемент; 4 – сварка на узловом элементе.

3.4.3. Выявление резервов несущей способности структур и оптимизация высоты структурной конструкции при заданных пролете и стреле подъема

Анализируя НДС покрытия, опорных стоек и стоек каркаса, проведем численную оптимизацию различных геометрических и физических параметров стержневой структурной конструкции. Выбор рационального распределения жесткостей и оптимального количества типоразмеров для выявления резервов при работе конструкции в упругопластической области выполним на примере основного варианта структурного покрытия (см. рис. 2.49). Варьирование жесткостей верхнего и нижнего поясов показывает, что увеличение жесткости нижнего пояса в 2 раза, приводит к уменьшению вертикальных и

горизонтальных перемещений на 60-80 процентов. Изменение жесткости верхнего пояса в 2 раза практически не меняет деформационных свойств конструкции (всего на 15-25%).

Рассмотрим поведение конструкции при изменении жесткости опорных стоек. При анализе трех вариантов жесткостей (рис. 2.22) видно, что изменение жесткостей стоек не оказывает существенного влияния на распределение усилий и моментов в конструкции, зато сказывается на вертикальных и, особенно, горизонтальных перемещениях системы.

Для конструкций структуры характерны максимальные унификации элементов, и количество типоразмеров в них подбирается в зависимости от значений максимальных растягивающих или сжимающих усилий в как можно больших группах стержней. В связи с этим обычно в конструкции не во всех стержнях возникают предельно допустимые усилия и ряд стержней является недогруженными. За счет этого образуется резерв несущей способности, который определяется индивидуально для каждой конкретной конструкции.

При работе конструкции в упруго-пластической стадии появляется возможность использования резерва несущей способности при некотором увеличении деформативности покрытия. При превышении допускаемых прогибов требуемая деформативность может быть обеспечена специальными мерами, например, путем задания строительного подъема конструкции.

В конструкции имеются основные стержни, прочность и жесткость которых существенно влияет на несущую способность покрытия. При опирании сферических модулей по углам такими стержнями являются контурные пояса и опорные раскосы. Изменение жесткости в остальных стержнях не столь существенно влияет на деформативность покрытия. Поэтому упругопластическую и закритическую стадию работы нужно учитывать лишь в этих стержнях при условии, что выход их из работы не превращает систему в механизм. В основных сжатых и растянутых стержнях упругопластическая

стадия работы не допускается и подбор их сечений осуществляется в соответствии с рекомендациями существующих норм [158].

При исследовании поведения конструкции с частью сжатых стержней, находящихся в закритической области работы, допускаемая гибкость для сжатых стержней может быть увеличена, так как исследования, приведенные в главе 2, подтвердили возможность эксплуатации стержней большой гибкости в закритической области.

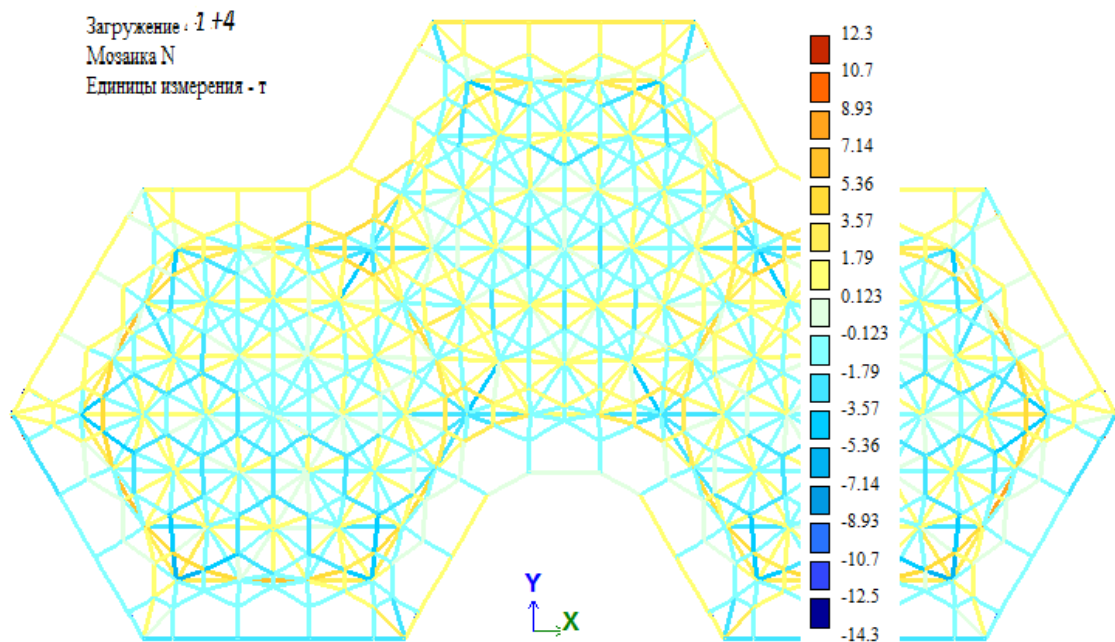
Расчетные схемы для численных исследований предоставлены на рис. 3.57-3.59, данные из спецификации стали основного варианта приведены в работе [16]. Все нагрузки, в том числе от покрытия и от массы элементов несущей конструкции купола, прикладываем ко всем вначале жестким, затем шарнирным узлам структурных модулей. Для структурного покрытия проанализировано несколько вариантов внешнего закрепления элементов двухпоясного купола. Стержневая система покрытия имеет лишнее количество элементов и внутреннюю статическую неопределимость.

Однако внешних связей для контура оказалось недостаточно и внешние узлы каждого модуля были дополнительно раскреплены в вертикальной и горизонтальной плоскостях системой связей (например, стержни 22 и 101 к вертикальным стойкам 103 и подкосам 96 – рис. 3.49). Расчет составных элементов из труб выполняем как сплошно-стенчатых при условии, что наибольшие расстояния на участках между приваренными фланцами (в свету) или между центрами крайних болтов не превышают ограничений [158]. Принятые для основного варианта сечения в верхнем поясе и раскосах - труба $\varnothing 114 \times 5$ мм, сечения в нижнем поясе и ограждении - труба $\varnothing 159 \times 4,5$ мм, сечения в опорах купола - труба $\varnothing 325 \times 5$ мм, обеспечивают оптимальное распределение жесткостей для упругой стадии работы и минимальные перемещения системы.

В работе приведены результаты оптимизации конструктивного решения модульной системы путем увеличения жесткости опор, сдвижки опор наружу и

т.д. (см. раздел 2.5). Полученные результаты позволили обоснованно предложить данный вариант конструктивно-технологического решения [16].

а)



б)

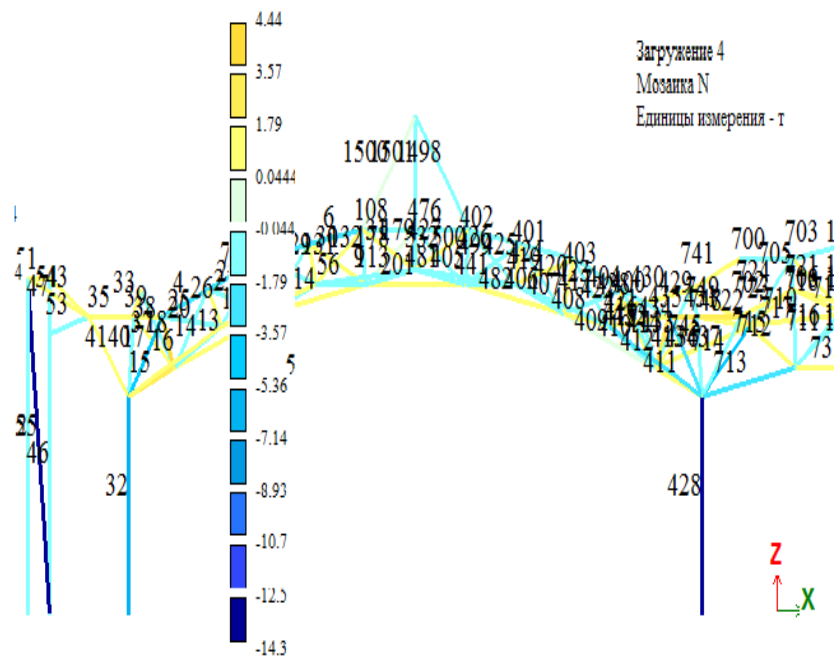


Рис. 3.57. Мозаика продольных усилий для структурных модулей с заданной жесткостью элементов купола.

При заданных пролете и стреле подъема проведена оптимизация численными методами высоты двухпоясной структурной конструкции по критерию минимума массы конструкции [16]. Данные приведены на графиках рис. 3.59. Выбираем для покрытия структуры высоту близкую к оптимальной - 1003 мм.

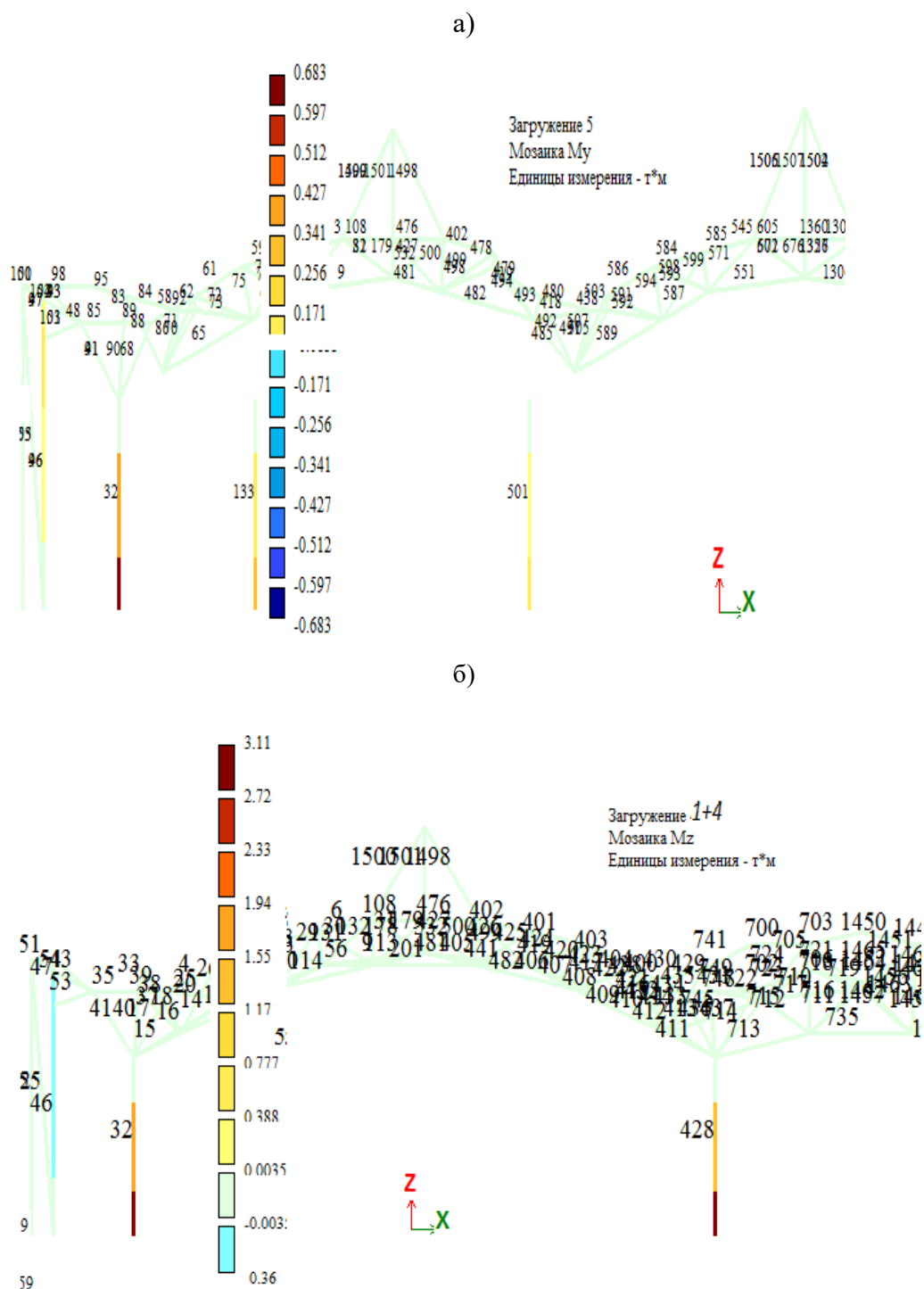


Рис. 3.58. Мозаика моментов для расчетного сочетания на разрезе структуры из трех модулей.

Предлагаемый модуль имеет лишнее число стержней, но требует дополнительного внешнего раскрепления. Так для преодоления изменяемости угловых и контурных элементов установлены связи в виде раскрепления сквозной системы по внешним углам покрытия. Кроме этого, составные модули имеют повышенную деформативность контура конструкций в горизонтальном направлении по сравнению с обычными структурами и куполами (рис. 3.49.).

Опорный контур этой сборной оболочки для расчетной модели выполняется разомкнутым, в виде отдельных опор по стойкам, расположенным на пересечениях вертикальных окружностей. По принятому варианту опоры структурных покрытий могут свободно перемещаться на отдельных оголовках стоек. По типу систем «Кисловодск» внешние опорные шары структур могут сдвигаться на оголовках до ± 20 мм. На стыках структур имеются стержни, ориентированные вертикально относительно этих стыков, чтобы обеспечить необходимые для компоновки типовых секций углы сопряжений (рис. 2.22, 3.49).

Выбор рационального распределения жесткостей и оптимального количества типоразмеров для выявления резервов при работе конструкции в упруго-пластической области проведен на примере структурного покрытия при основном варианте распределения жесткостей (см. рис. 3.49).

В структуре с регулярной сеткой раскосы занимают значительную часть в общем количестве стержней. Например, в рассматриваемой конструкции раскосы составляют 50 % общего количества. Очевидно, что для рационального варианта распределения жесткостей наряду с изменением жесткости поясных стержней необходимо предусмотреть изменение жесткости раскосов. При этом использовались особенности перераспределения усилий, полученные выше. В предлагаемых вариантах почти все элементы, находящиеся вне контурной линии, принимались меньшего сечения, а нижний пояс большего сечения по сравнению с основным вариантом. При этом общая масса металла была понижена и количество типоразмеров уменьшено с пяти до четырех и трех.

Зависимость массы от расстояния между поясами структуры

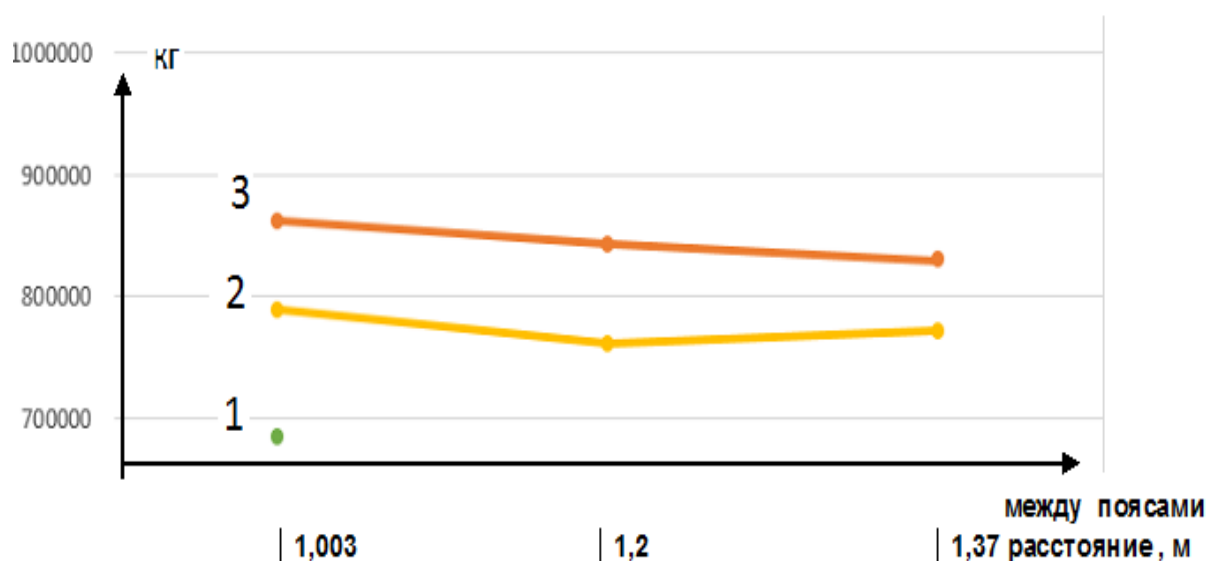
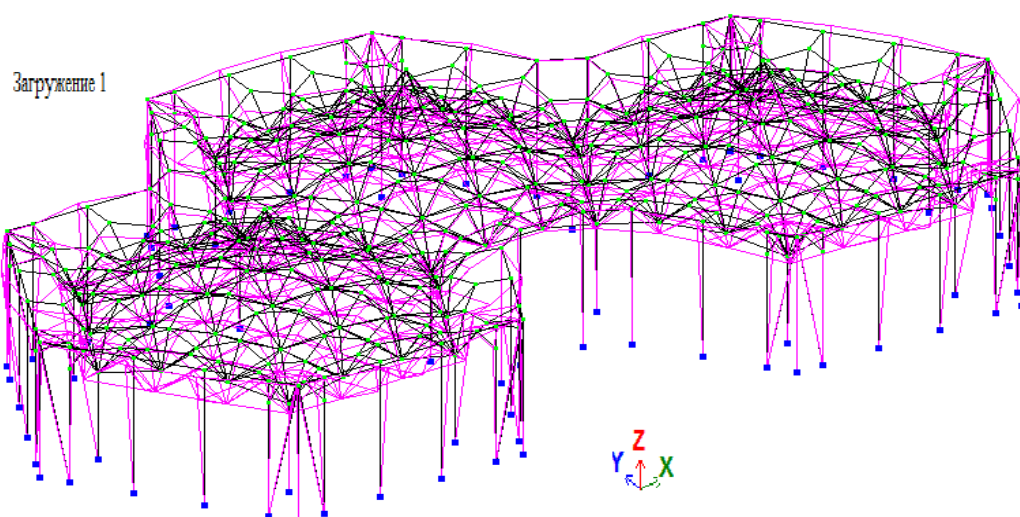


Рис. 3.59. Графики оптимизации расстояния между поясами двухпоясной купольной конструкции по критерию массы конструкции: 1- кривизна поверхности (шаг опорной сети) 15° , 2 - кривизна 12° , и 3 – кривизна 10° .

Результаты проведенных расчетов (рис. 3.57-3.58, 3.60) показывают, что при опирании структур по углам целесообразно допускать развитие пластических деформаций только в средней части конструкции, обеспечивая необходимую прочность основных контурных (нижних) поясов и раскосов в упругой области работы материала. При опирании конструкции по контуру имеются ограничения на развитие пластических деформаций в опорных стержнях. При расчете конструкций с учетом пластических деформаций рекомендуется назначать начальные несовершенства в стержнях в виде эксцентриситетов приложения внешних сил в пределах 5-10%. В структурных покрытиях стержни каркаса значительно отличаются по длине, имеют некоторый разброс расчетных усилий и поэтому элементы верхнего пояса должны быть запроектированы одного сечения, а элементы нижнего другого, раскосы - третьего. Опорный контур модулей этой сборной оболочки выполняется в виде отдельных опор с одной отметкой (рис. 3.49 и 3.60), составляет в плане правильный шестиугольник.

а)



б)

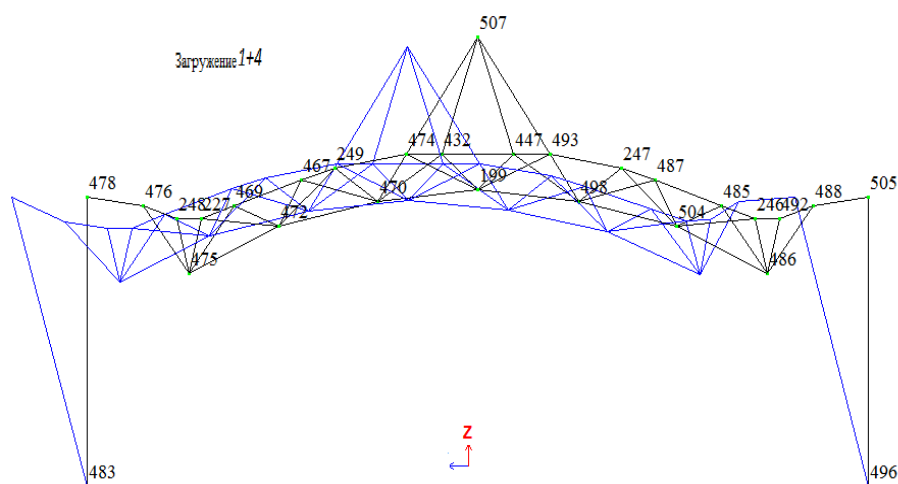


Рис.3.60. Перемещения узлов и элементов структурных модулей от действия суммарной симметричной нагрузки ($f_{\text{макс.}} = -7.26 \text{ мм}$; горизонтальные перемещения $-f_{\text{макс.}} = -4,87 \text{ мм}$).

Наибольшее внимание при оценке расчетных моделей структур уделялось горизонтальным перемещениям контурных и опорных узлов. Перемещения в плане опорных узлов структурных модулей для деформированных схем без учета влияния жесткости внешних стоек ограждения превышают перемещения контурных узлов на 40-60%. При учете влияния стоек ограждения, особенно угловых, перемещения контурных узлов становятся больше на 30-40% опорных.

Главное то, что применяя эксцентриситеты и оптимальные жесткости

внешних стоек ограждения, достигаем такого результата. что горизонтальные перемещения не превышают у каркаса структуры 8-10 мм.

Выводы по главе 3

1. Разработаны конструкции с эффективными технологиями изготовления и возведения на основе перспективных разрезов сборных сферических оболочек, сетчатых или образуемых из пирамидальных или преднапряженных каркасных панелей. Разработаны конструктивно-технологические решения составных модулей структурного покрытия.

2. Проведены исследования расчетных[моделей однополосных и двухполосных сборных куполов-оболочек. Выявлены такие качества рассматриваемых конструкции, как простота и четкость статической схемы, технологичность изготовления и монтажа. Исследованы этапы напряженно-деформированного состояния монтажных положений конструкций.

3. Результаты комплексных теоретических исследований конструкций составных одно - и двухуровневых (двухсетчатых) сферических оболочек покрытий из стали и древесины позволяют выявить 'закономерности напряженно-деформированных состояний оболочек из конструктивно-анизотропных материалов в зависимости от вида и схем распределения внешних воздействий, кривизны пролетных конструкций, а также жесткости и эксцентриситета опор.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ КАРКАСНЫХ ПАНЕЛЕЙ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ И МОДЕЛИ СТАЛЬНОГО КУПОЛА

4.1.МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

Для изучения напряженно- деформированного состояния деревянных панелей куполов с предварительным напряжением проводились их испытания под навесом в естественных условиях климата Средней полосы России и климата Черноморского побережья.

В процессе подготовки и проведения лабораторных и натурных экспериментальных исследований решались следующие основные задачи:

- планирование эксперимента;
- выбор древесины и металла для изготовления испытываемой модели и стандартных образцов для проведения механических испытаний с целью определения механических характеристик и реальной диаграммы деформирования используемой древесины и стали круглого профиля;
- проектирование и изготовление моделей и сборочного стенда;
- выбор измерительных приборов для контроля параметров НДС в процессе испытаний;
- сборка испытываемой модели на стенде, проверка работы приборов и реализация способов предварительного напряжения;
- исследования образцов материалов и испытание моделей;
- геометрические и физические измерения и анализ НДС системы.

Методика и планирование испытания моделей и образцов материалов исследуемых конструкций разрабатывалась в соответствии с нормативными документами по испытанию строительных конструкций [47, 48, 51, 52, 56, 57, 59, 60-63]. Проверка качества материалов, изготовления и соответствия конструкций проектным решениям, требования к испытательной установке, способы и порядок загрузки, измерение деформаций и перемещений, техника безопасности, обработка результатов испытаний и анализ работы

конструкции выполнялись с учетом общей методики испытаний конструкций и с учетом особенностей предварительно-напряженных систем из древесины и металла [15,29-31,39, 60-63, 76-78, 86].

Расчет преднапряженных статически неопределимых систем с учетом ползучести проводился в соответствии с результатами экспериментально-теоретических исследований влияния свойств материалов, климатических условий и особенностей влияния преднапряжения на напряжённо-деформированное состояние металло-деревянных решетчатых конструкций. Для описания работы элементов подобных комбинированных систем применялись сложные реологические модели [15, 98-103,105, 111, 113-116, 124-126, 148-151, 157-165]. Предварительное напряжение конструкций в сочетании с материалами – древесиной и металлом, имеющих различные физические и механические характеристики, приводит к возникновению нелинейных деформаций в системе.

Масштаб моделей воспроизводил основные размеры реальных конструкций, однако, геометрические схемы, размеры сечений и узловых деталей определялись, в основном, возможностями испытательного оборудования и задачами экспериментов.

Конструктивные возможности моделей использовались для решения следующих вопросов:

- оценка технологических возможностей при изготовлении данной конструкции;

- определение предельных состояний металло-деревянных конструкций с односторонними связями;

- выявление факторов, определяющих потери предварительного напряжения;

- оптимизация величины, схем и способов создания предварительного напряжения.

Методика испытаний моделей металлодеревянных каркасных панелей (рис.4.6) предусматривала следующее:

- измерения геометрии изготовленных моделей;
- исследование прочностных характеристик материалов модели;
- проведение предварительного натяжения моделей;
- периодические замеры величины натяжения арматуры с помощью прибора ПРД-6;
- геометрические и физические измерения и анализ деформированного состояния системы.

Методика испытания стальной модели купола (СМК) (рис.4.1) предусматривала следующее:

- апробирование метода сборки и монтажа купола из пирамидальных каркасных панелей;
- измерения геометрии изготовленного купола и оценка геометрических несовершенств;
- определение величины критической узловой нагрузки и НДС стержней и опор;
- определение влияния на НДС стержней жесткости и эксцентриситета опор.

4.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННОЙ КАРКАСНОЙ МЕТАЛЛО-ДЕРЕВЯННОЙ ПАНЕЛИ.

Для проверки влияния климатических условий на напряженное состояние несущих элементов куполов из древесины были проведены эксперименты по определению влияния влажности на прочность древесины в условиях повышенной влажности (Черноморское побережье) и для сравнения в условиях средней полосы (г.Саранск).

4.2.1. Исследование прочности древесины различных пород в условиях повышенной влажности.

В ходе работы была исследована прочность при сжатии вдоль и поперек волокон и при изгибе образцов девяти пород древесины (береза, сосна, ель, ясень, дуб). На каждый этап испытаний было изготовлено по 5 образцов размерами 10×10×30-160 см. Изготовленные образцы для испытаний соответствовали основным общим требованиям ГОСТ 16483.09 [60 - 63].

Исследования проводились на базе лаборатории строительных материалов и изделий ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева» и лаборатории микробиологического анализа отдела химико-биологических исследований НИИ химии ФГАОУ ВО «ННГУ им. Н.И. Лобачевского». Испытания на прочность проводились на прессе ПСУ-10 (10 т).

На первоначальном этапе исследования было установлено, что средние значения прочности древесины при сжатии вдоль волокон варьируются в пределах от 63,8 МПа (сосна) до 98 МПа (ясень).

Результаты исследования образцов древесины, выдерживаемых в условиях повышенной влажности на прочность при сжатии вдоль волокон, представлены на рисунке 4.1.

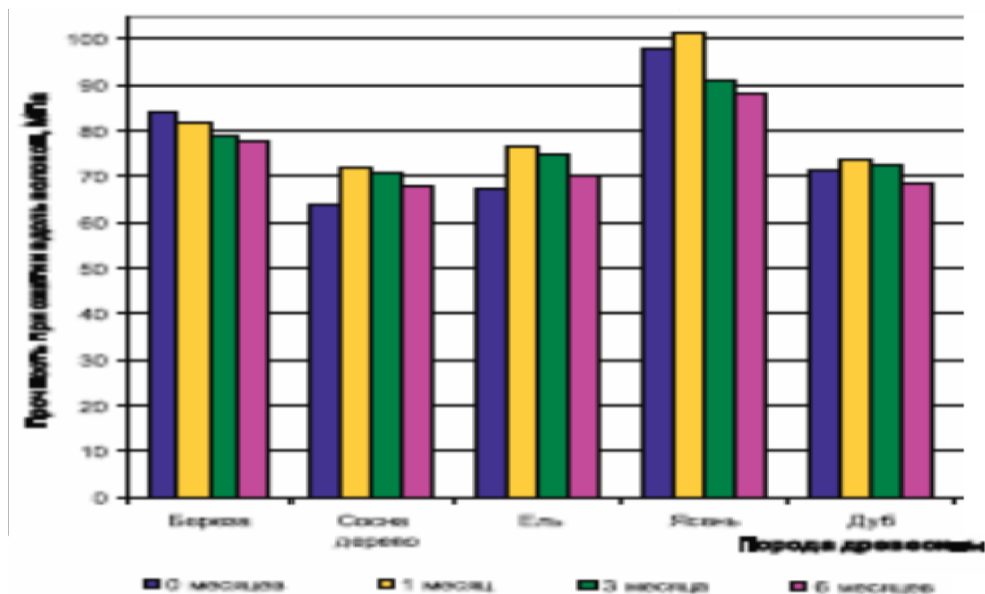


Рис. 4.1. Изменение прочности при сжатии вдоль волокон образцов древесины различных пород при выдерживании в условиях повышенной влажности.

В целом за весь период исследования наибольшее изменение прочности при сжатии вдоль волокон по сравнению с первоначальными данными произошло у образцов из ясеня (около 10 %), а наименьшее – у образцов из ели и дуба (около 4 %). Зависимость изменения прочности древесины при сжатии вдоль волокон от длительности выдерживания в условиях повышенной влажности можно выразить в виде уравнений регрессии. На основании проведенных экспериментов составлено 5 уравнений регрессии, которые представлены в табл. 3.1 приложения 3.

Из указанной табл. видно, что, согласно полученным коэффициентам детерминации зависимость прочности при сжатии вдоль волокон от длительности нахождения в условиях повышенной влажности для всех пород древесины наилучшим образом описывает параболическая (полиномиальная) функция.

Полученные уравнения регрессии описывают вариацию значений прочности при сжатии вдоль волокон в условиях повышенной влажности для образцов из березы, практически на 100 %, сосны – 91,2 %, ели – 93,7 %, ясеня – 78,8 %, дуба – 98,8 %. В местах врубок или соединений деревянных деталей с металлическими (под башмаками, болтами и др.) существенное практическое значение имеет прочность древесины при сжатии поперек волокон. За условный предел прочности при сжатии поперек волокон принимают напряжение, соответствующее пределу пропорциональности, т.е. максимальное значение напряжения на прямолинейном участке диаграммы. Условный предел прочности при сжатии поперек волокон в 6–10 раз меньше чем при сжатии вдоль волокон [76, 77].

До помещения образцов в условия повышенной влажности было установлено, что средние значения прочности при сжатии поперек волокон варьируются в пределах от 10,75 МПа (сосна) до 24,5 МПа (ясень).

Результаты исследования прочности образцов древесины, выдерживаемых в условиях повышенной влажности при сжатии поперек

волокон, представлены на рисунке 4.2. Как видно из этого рисунка, у трех из девяти исследуемых образцов наблюдается снижение прочности при сжатии поперек волокон в течение всего периода исследования.

У образцов из березы исследуемый показатель снизился на 12,5% по сравнению с первоначальными данными.

Через 6 месяцев прочность при сжатии поперек волокон у исследуемых образцов снизилась на 1 % соответственно по сравнению с первоначальными значениями.

В целом за весь период исследования наибольшее изменение прочности при сжатии поперек волокон по сравнению с первоначальными данными произошло у образцов из березы (около 12 %), а наименьшее – у образцов из сосны, ели и дуба (от 0 до 3 %). Для описания зависимости прочности древесины при сжатии поперек волокон от длительности нахождения в условиях повышенной влажности также были получены уравнения регрессии.

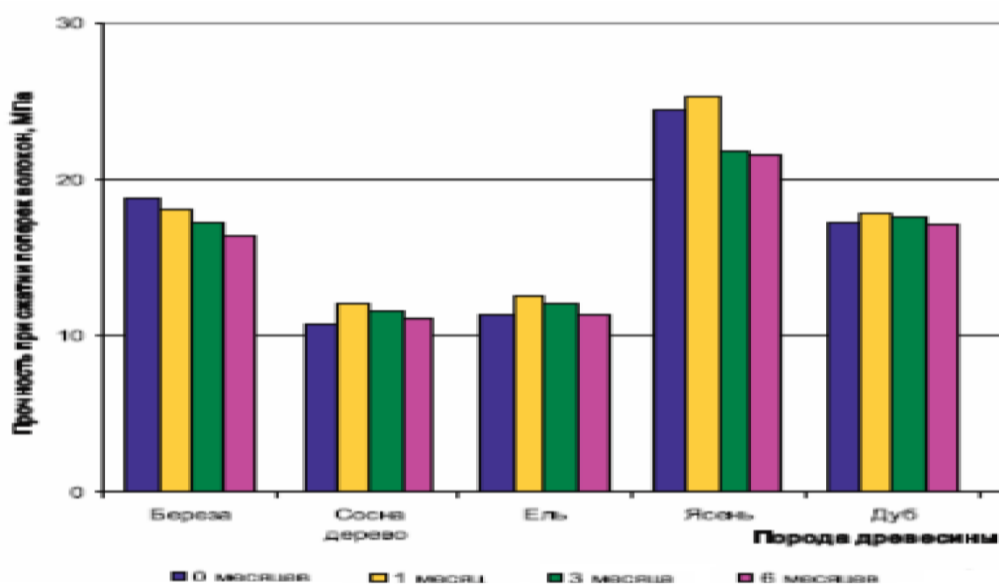


Рис. 4.2. Изменение прочности при сжатии поперек волокон образцов древесины различных пород при выдерживании в условиях повышенной влажности.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что зависимость прочности образцов при сжатии поперек волокон от длительности нахождения в условиях повышенной влажности для образцов из березы можно описать с помощью двух функций – линейной и параболической

(полиномиальной), а для всех остальных пород древесины наилучшей будет также параболическая (полиномиальная) функция.

Предел прочности древесины при статическом изгибе в зависимости от породы колеблется в пределах 70–150 МПа (при влажности 12 %).

Увеличение влажности приводит к снижению предела прочности при изгибе до 40–90 МПа (при влажности 30 % и выше) [76, 77]. На первоначальном этапе средние значения прочности при изгибе варьировались в пределах от 351 МПа (ель) до 801 МПа (ясень).

Результаты исследований прочности при изгибе образцов древесины, выдерживаемых в условиях повышенной влажности, представлены на рисунке 4.3. Из рисунка видно, что у шести из девяти образцов древесины наблюдается снижение прочности при изгибе по сравнению с первоначальными значениями. За 6 месяцев у образцов из березы снижение произошло на 15%, при выдерживании в условиях повышенной влажности 8 %, сосны – 14,9 %.

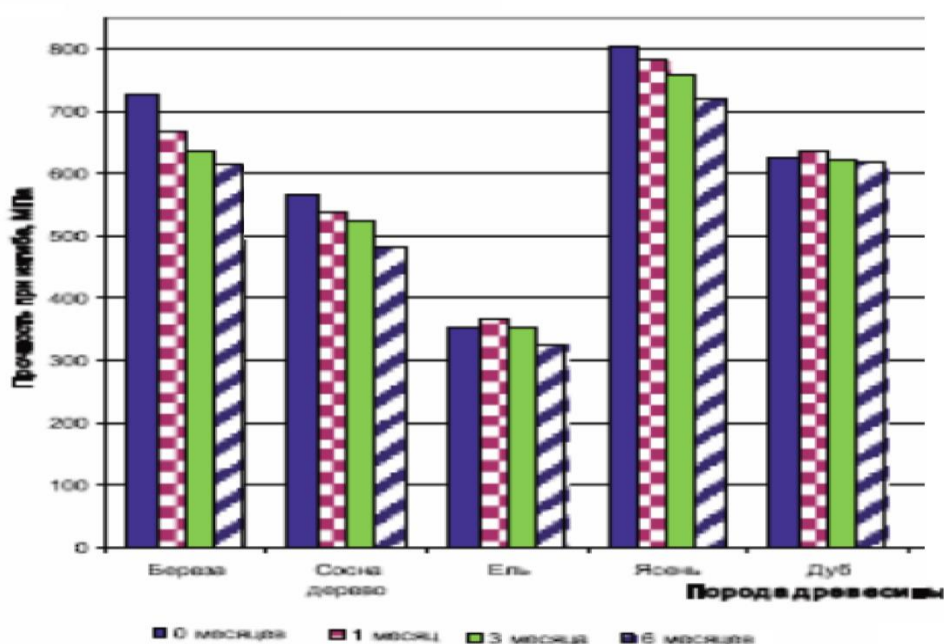


Рис. 4.3. Изменение прочности при изгибе образцов древесины различных пород.

У образцов из ели и дуба через 1 месяц после выдерживания в заданных условиях влажности наблюдается небольшой рост прочности при изгибе на 4,7 и 1,6%, соответственно. Дальнейшее нахождение образцов в условиях

повышенной влажности приводит к снижению исследуемого показателя. Через 6 месяцев данный показатель по сравнению с первоначальными данными снизился на 7,2 % у образцов из ели. Образцы из дуба показали незначительное снижение прочности при изгибе (1,2 %). В целом за весь период исследования наибольшее изменение прочности при изгибе по сравнению с первоначальными данными произошло у образцов из ели (около 21 %), а наименьшее – у образцов из дуба (1,2 %). Для определения степени зависимости прочности древесины при изгибе от длительности нахождения в условиях повышенной влажности так же, как и в предыдущих исследованиях, были получены уравнения регрессии.

Из результатов исследования (рис. 4.3) следует, что для образцов из березы наилучшей моделью для описания зависимости от повышенной влажности является степенная функция. Следовательно, с увеличением времени выдерживания образцов из березы в условиях повышенной влажности на 1 % прочность при изгибе снизится на 0,124 %.

Из всех полученных зависимостей следует, что длительность нахождения в условиях повышенной влажности влияет наименьшим образом на изменение прочности при сжатии вдоль и поперек волокон образцов из ясеня и берёзы, а прочности при изгибе – образцов из дуба. Долговечную работу древесины в условиях повышенной влажности можно обеспечить за счет пропитки ее пористой структуры полимерными материалами [78].

В дальнейшем для изготовления моделей панелей купола для испытаний преднапряжением была выбрана порода древесины в виде березы, которая имеет повышенную прочность на смятие под углом к волокнам, что позволяет выполнять простые соединения элементов упором при биссектрисной подрезке.

Для эксперимента с моделями преднапряженной металлодеревянной панели получены данные по модулю упругости древесины березы при изгибе вдоль волокон в условиях повышенной влажности, который в среднем составил для материала первой модели 194,1 ГПа., для материала второй и третьей модели составил 212,4 ГПа.

4.2.2. Исследование НДС преднапряженных металлодеревянных моделей в условиях навесов г. Геленджик и г. Саранск.

Всего было изготовлено три модели панели купола в виде правильного шестиугольника. Каждая испытываемая модель панели купола (см. рис. 4.4 4.5.) представляет собой пространственную предварительно напряженную стержневую симметричную конструкцию, элементы которой сопряжены под углами 9-25 градусов к горизонтали.

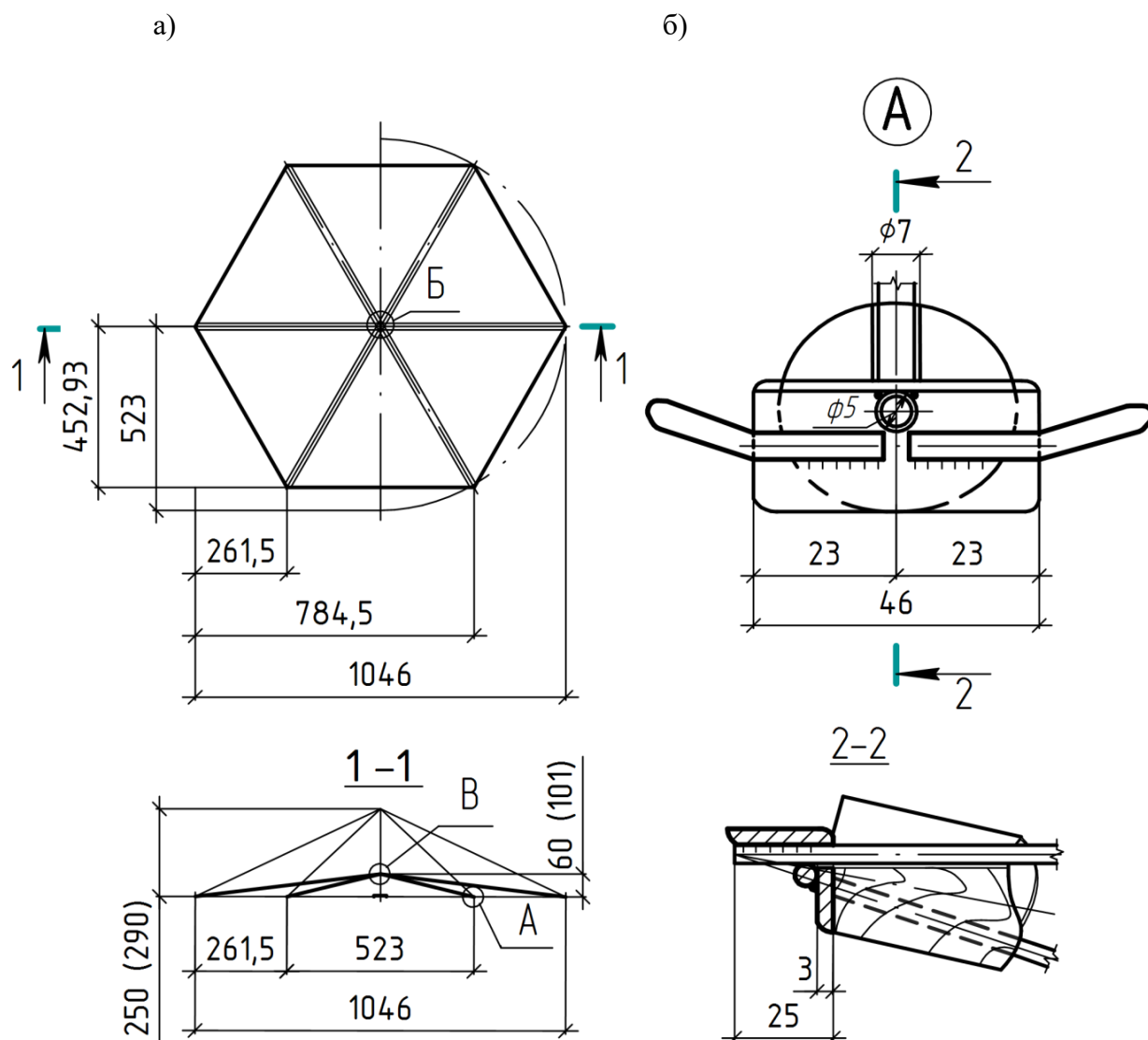


Рис. 4.4. Преднапряженная модель металлодеревянной каркасной панели: а – вид сверху и разрез 1; б - узел А модели.

Пролет конструкции в осях составляет 1026 ± 1 мм (рис. 4.5). Сжатые стержни выполнены из древесины березы круглого сечения диаметром 40 мм, с площадью сечения $A=1257 \text{ мм}^2$. Растянутые стержни выполнены из проволоки Вр-1 $\varnothing 5$ мм, с площадью сечения $A=19 \text{ мм}^2$.

Высота (стрела подъема) моделей после сборки и предварительного напряжения составила в осях: модель 1- 252 мм; 2-288 мм; 3-251 мм (высота до центрального нижнего узла 1-61, 2-101, 3-60 мм). На размеры в плане моделей преднапряжение существенного влияния не оказало.

Размещение приборов на моделях показано на рисунке 4.6.

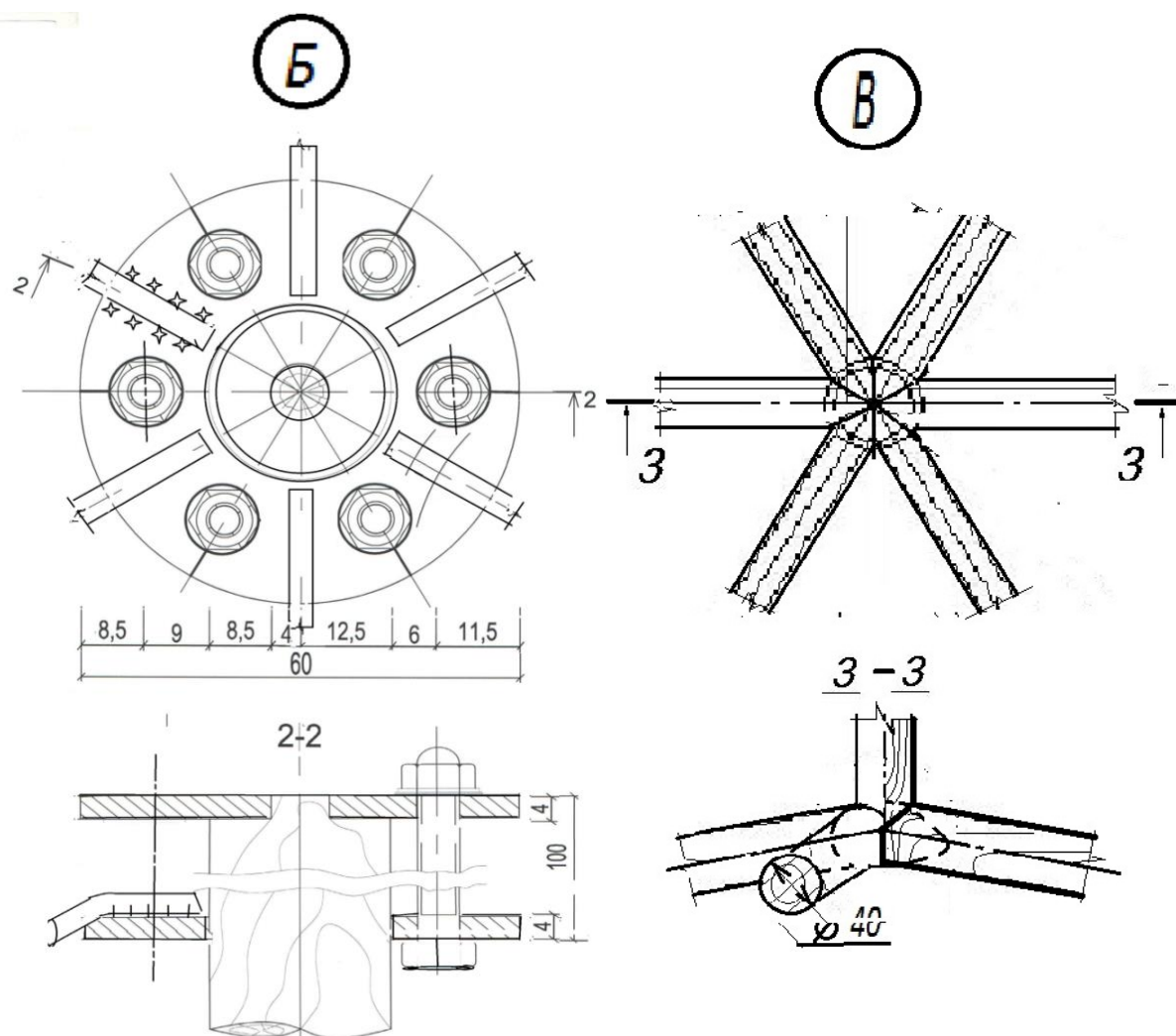


Рис. 4.5. Преднапряженная модель металлодеревянной каркасной панели: показаны узел Б модели и узел В с рис. 4.4.

При выборе модели, руководствовались следующими соображениями:

- истощение несущей способности стержневой конструкции должно происходить по второй группе предельных состояний при выключении из работы одного или сразу трех наименее напряженных элементов;

- узловые соединения стержневых элементов между собой выполнены без креплений упором (узлы А, Б, В на рис 4.5), они должны быть неразрывными и обеспечивать неизменность расчетной схемы в процессе уменьшающегося квазистатического нагружения;

- преднапряжение стержней должно выполняться одновременно, для чего выполняется их выравнивание;

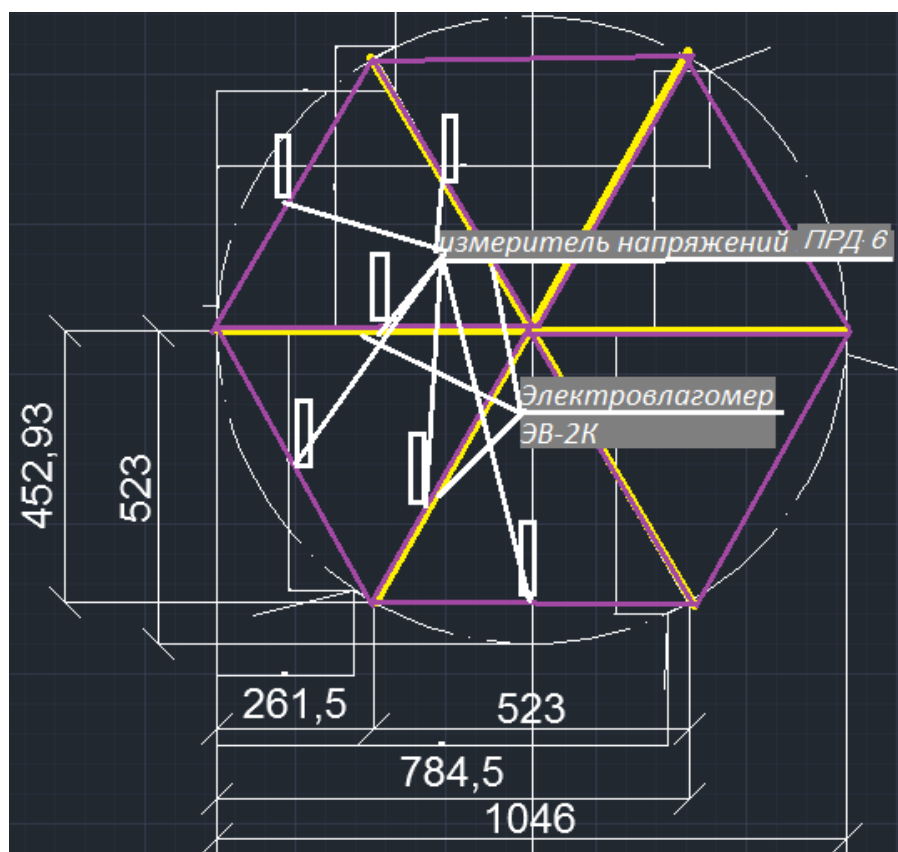


Рис. 4.6. Схема размещения приборов на моделях

- на поддержание фиксированной величины возникающих в стержнях продольных усилий на каждом шаге преднапряжения и на каждом этапе измерений падения напряжений не должны влиять закрепления опор модели или перемещения узлов в процессе эксперимента.

При действии вертикальной узловой нагрузки, которая возникает в результате затягивания болтов на фланцах центрального стержня во всех

стержнях модели возникают продольные осевые усилия (без значительных изгибающих моментов в центральном узле, за счет обмятия древесины) (см. рис. 4.6, 4.8-4.10).

Для оценки напряжений в затяжках преднапряженной модели из проволоки Вр-1 (класса В500) при использовании прибора ПРД-6 с уменьшенной базой, была получена тарифовочная таблица 3.2 приложения 3. Для оценки предварительного напряжения в эксперименте были использованы средние значения отсчетов по прибору ПРД-6 (рис. 4.17, 4.18).

При оценке преднапряжения конструкций, применяемых в реальном строительстве необходимо применять значения отсчетов, полученных с обеспеченностью не менее 95% (рис. 4.7) по данным тарифовочной таблицы 3.2 приложения 3.

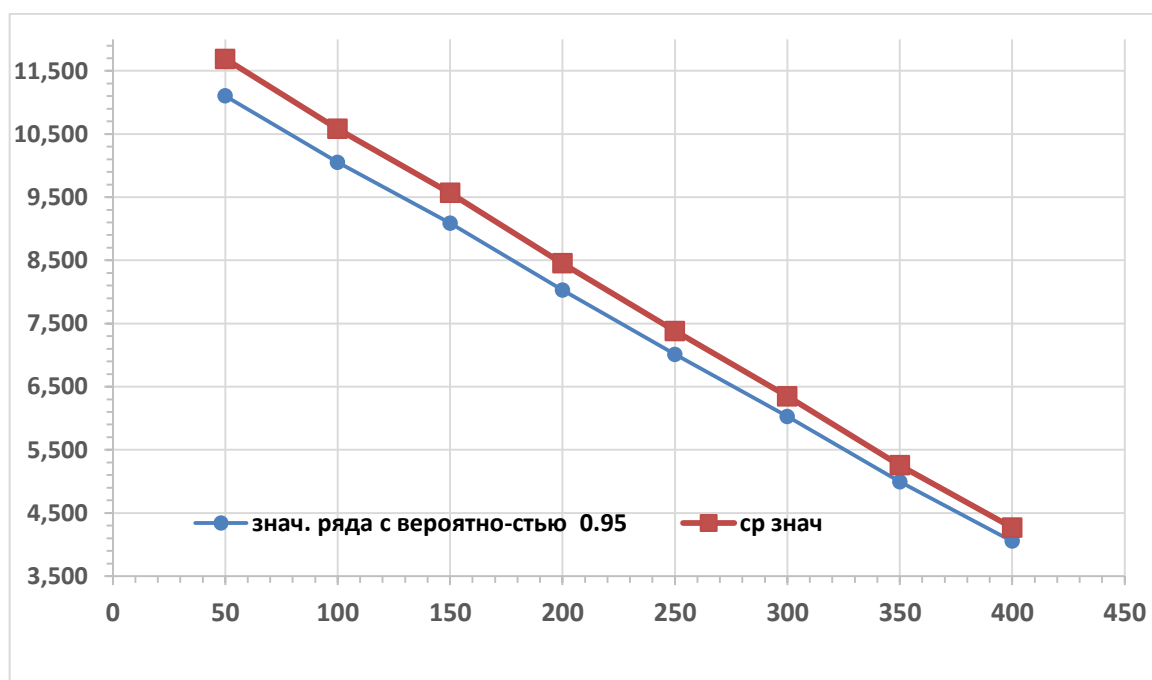


Рис.4.7. Тарировочные зависимости преднапряжения и отсчетов.

Предварительное натяжение моделей производили, учитывая изменение геометрических схем из-за значительного обмятия древесины и малых углов приложения усилий в узлах нижнего пояса и раскосах (рис. 4.8-4.10).

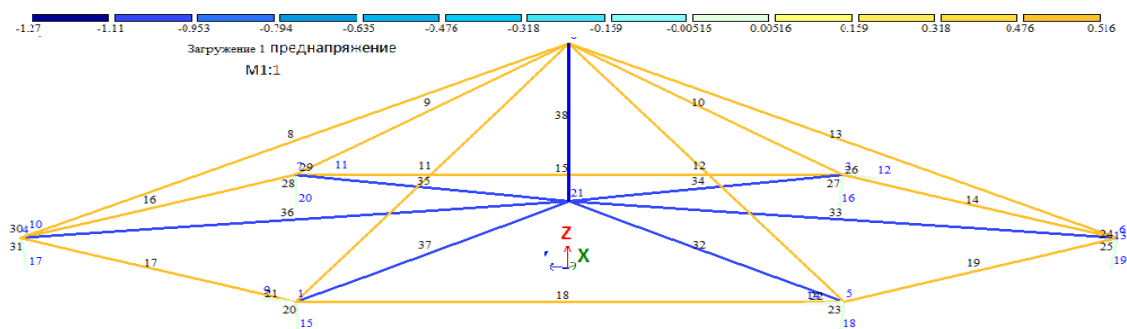
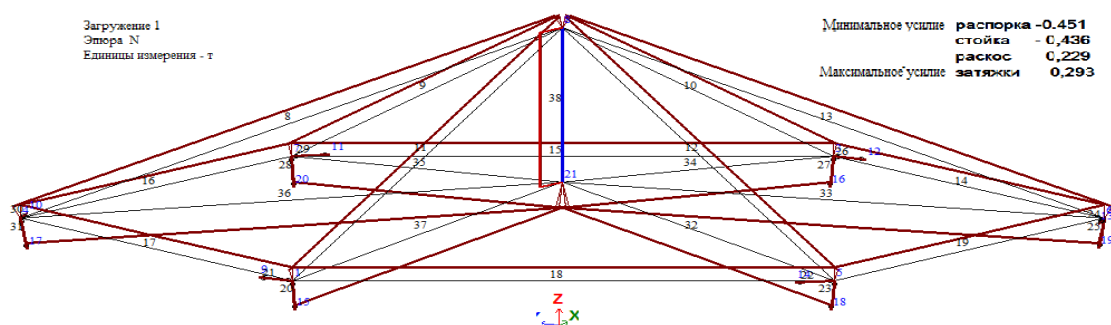


Рис. 4.8. Мозаика усилия в стержнях модели 2 при предварительном напряжении.
(вертикальные перемещения центрального узла - f - 2макс. - 18,4 мм).

Максимальные теоретические перемещения при преднапряжении были определены для модели 2 (18,4 мм). Максимальные натурные перемещения при преднапряжении были также зафиксированы замерах у модели 2 (затяжка болтов после выбора свободных перемещений - 29,8 мм).

а)



б)

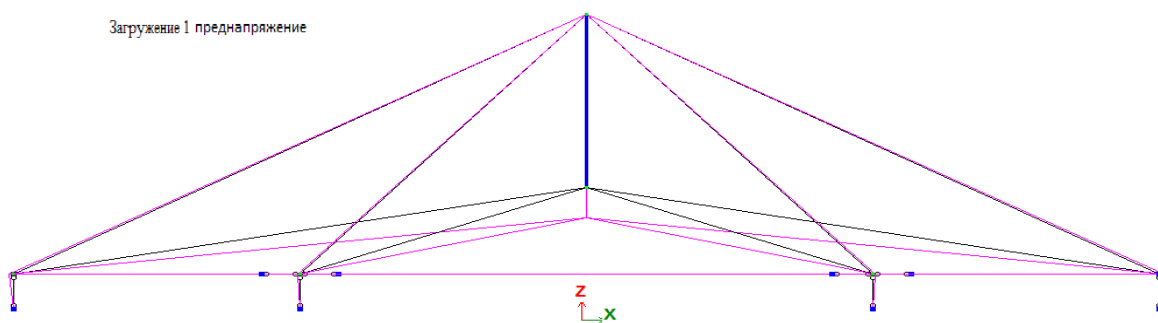


Рис. 4.9. Эпюры напряжений и перемещения центрального узла и элементов моделей 1 (а, б) и 3 (а, б) при предварительном напряжении (данные расчета, вертикальные перемещения - f - 1 макс. - 14,8 мм. Высота модели в осях 1- 252 мм; 3-251мм (высота до центрального нижнего узла 1-61 мм, 3-60 мм).

Распределение усилий от максимального предварительного напряжения расчетной модели 2 показано на рисунке 4.8. Эпюры преднапряжения и деформированные схемы расчетных моделей 1 и 3 приведены на рисунке 4.9. Эпюры преднапряжений и перемещения узлов и элементов модели 2 показаны на рисунке 4.10.

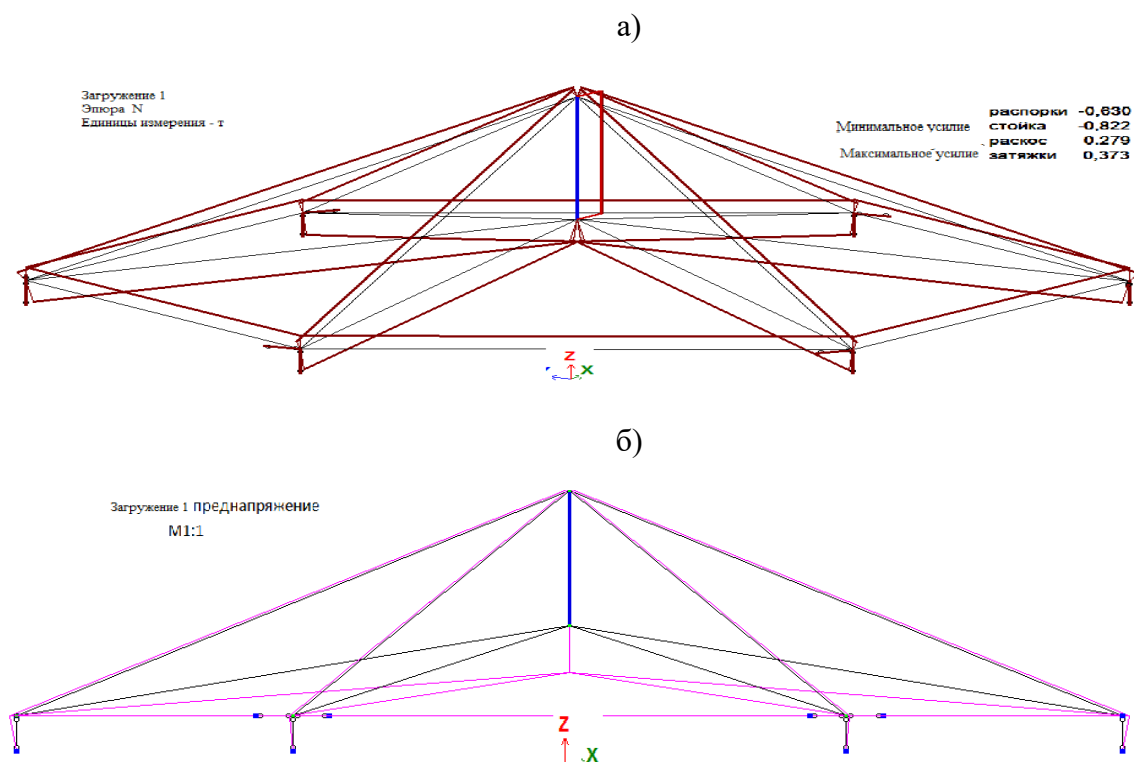


Рис. 4.10. Эпюры напряжений и перемещения центрального узла и элементов модели 2 (а,б) при предварительном напряжении (данные расчета, вертикальные перемещения - f -1 макс. – 18,4 мм). Высота модели в осях 1- 252 мм; 2-288 мм. Высота до центрального нижнего узла: 2 – 101 мм..

Данные замеров геометрии деформированных схем при преднапряжении конструкций (рис. 4.9, 4.10) были использованы в проведенных расчетах моделей. Максимальные предварительные напряжения были заданы в модели 2, которая и стала расчетной при проверке сечений.

4.2.3. Исследование потерь преднапряжения металлодеревянных моделей в навесах в г. Геленджике и в г. Саранске.

Оценку потерь преднапряжения и оценку длительной работы на моделях холодных навесов в г. Саранске (модель 1) и в центре климатических

испытаний (ФГУП "ВИАМ", г. Геленджик, Краснодарский край) (модели 2 и 3) проводили с 10 июля 2014 года по 10 октября 2016 года, а затем использовали для оценки этих параметров для металлодеревянных панелей натуральных куполов в подобных районах.

Установление величины преднапряжения по результатам длительных испытаний предварительно-напряженных металлодеревянных панелей осложняется тем, что система на всей стадии испытания ведет себя как статически неопределимая и на распределение усилий оказывают влияние упруго-вязко-пластические свойства двух материалов - древесины и материала затяжек.

Для описания зависимости потерь преднапряжения для модели 1 от времени и климатических условий эксплуатации были получены уравнения регрессии. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что в горизонтальных затяжках потери преднапряжения хорошо описываются степенной зависимостью (рис. 4.11). В раскосах в модели зависимость потерь преднапряжения для условий Саранска можно описать также с помощью степенной функции (рис. 4.12). Коэффициенты детерминации показывают, что полученные уравнения регрессии описывают вариацию значений потерь преднапряжения с детерминацией для затяжек модели до 99%; для раскосов - до 98%.

Модель 2 при сборке, благодаря удачной геометрии и точной подгонке деревянных деталей, позволила задать наибольшее предварительное напряжение и была отобрана для условий Геленджика вместе с третьей моделью. Однако центральный узел имел небольшое скручивание при сборке в пределах точности изготовления деревянных изделий ± 1 мм. Скручивание не росло и не проявлялось в течение почти полутора лет испытаний.

Однако на завершающей стадии, возможно в результате механического воздействия при перемещении модели 2 на стенде, скручивание стало резко нарастать и это отразилось на результатах испытаний. Т.е. можно сказать, что

модель вязко разрушалась последний год и скручивание достигло значений $\pm 3\text{мм}$. Это отразилось на потерях преднапряжения.

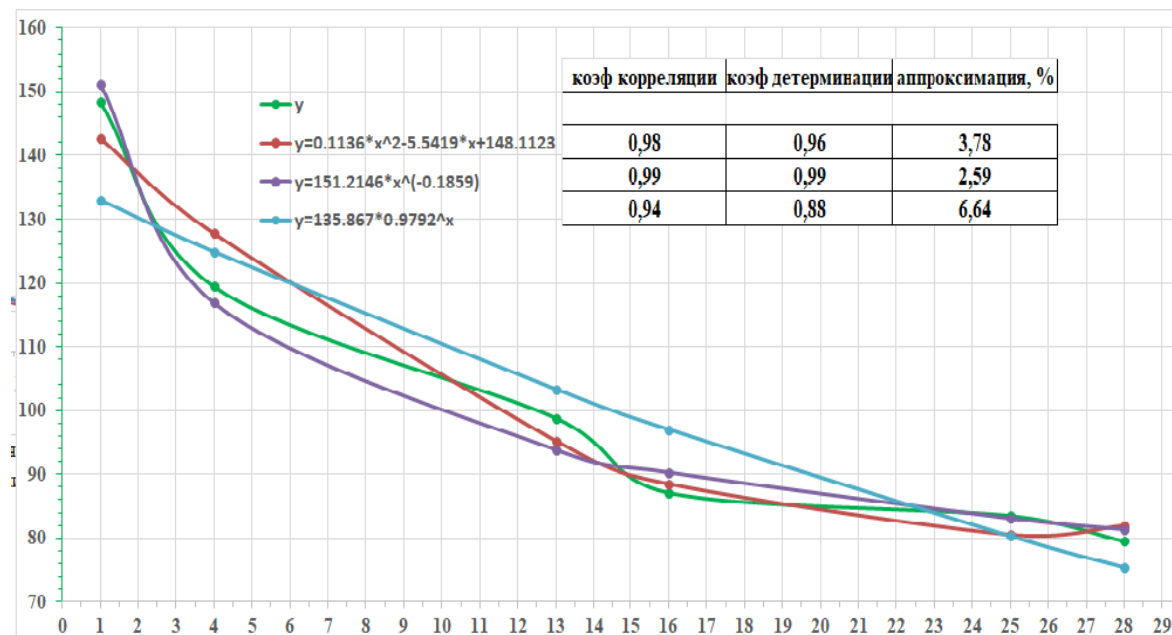


Рис. 4.11. Уравнения регрессии потерь предварительного напряжения в стальных затяжках модели 1 в условиях неотапливаемого помещения г Саранска.

Для описания зависимости потерь преднапряжения модели 2 от времени и климатических условий эксплуатации Геленджика были получены также уравнения регрессии.

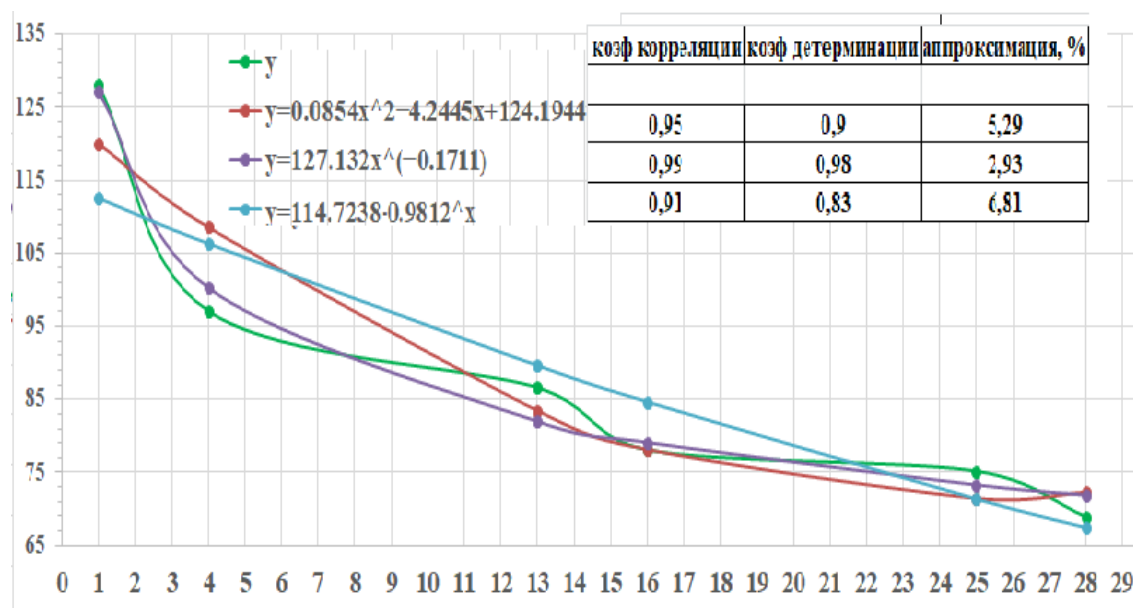


Рис. 4.12. Уравнения регрессии потерь предварительного напряжения в стальных раскосах модели 1 в условиях неотапливаемого помещения г Саранска.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что в горизонтальных затяжках интенсивные потери преднапряжения описываются наилучшим образом квадратической зависимостью (рис. 4.13).

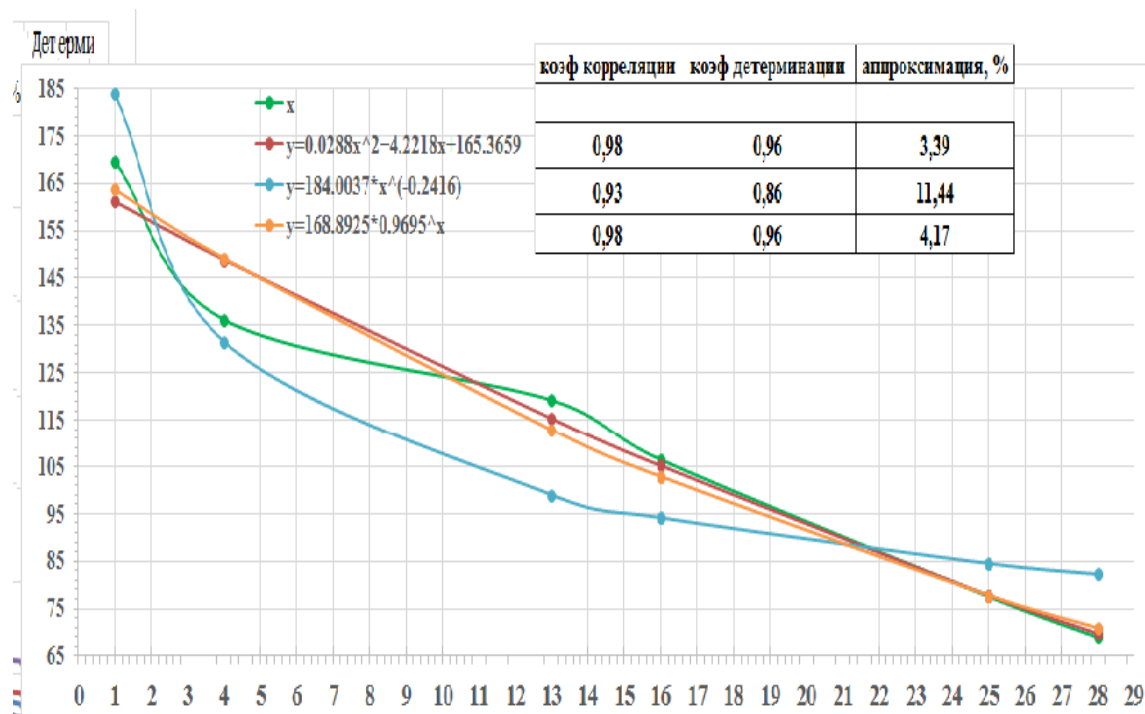


Рис. 4.13. Уравнения регрессии потерь предварительного напряжения в стальных затяжках модели 2 в условиях открытого навеса г. Геленджика.

Зависимость нарастающих потерь преднапряжения в раскосах в модели 2 можно описать с корреляцией до 0,99 с помощью одной из функций, квадратической или кубической (рис. 4.14). Коэффициенты детерминации показывают, что полученные уравнения регрессии описывают зависимость значений потерь преднапряжения с вероятностью для раскосов модели 2 - 97% и 98%; для затяжек 96%.

Для описания зависимости потерь преднапряжения модели 3 от времени и климатических условий эксплуатации Геленджика были получены также уравнения регрессии. На основе полученных данных можно сделать вывод, что в горизонтальных затяжках потери преднапряжения описываются квадратической зависимостью (рис. 4.15).

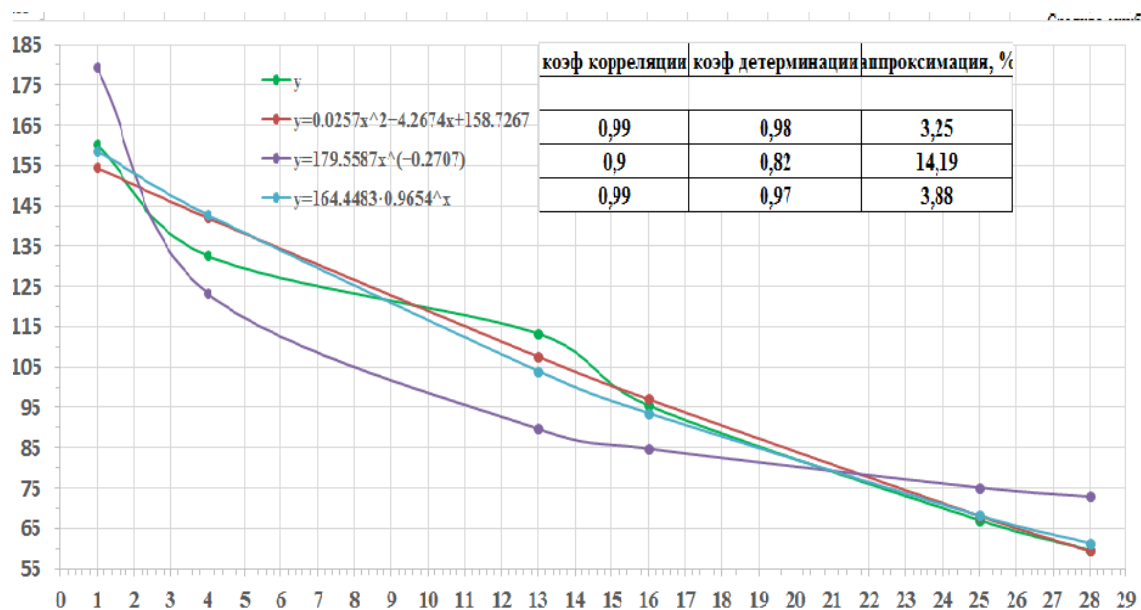


Рис. 4.14. Уравнения регрессии потерь предварительного напряжения в стальных раскосах модели 2 в условиях открытого навеса г. Геленджика.

Зависимость потерь преднапряжения в раскосах модели 3 для условий Геленджика отражается также хорошо с помощью квадратической функции (рис. 4.16). Коэффициенты детерминации показывают, что полученные уравнения регрессии описывают вариацию значений потерь преднапряжения с вероятностью для раскосов модели 3 - 96%; для затяжек - 99%.

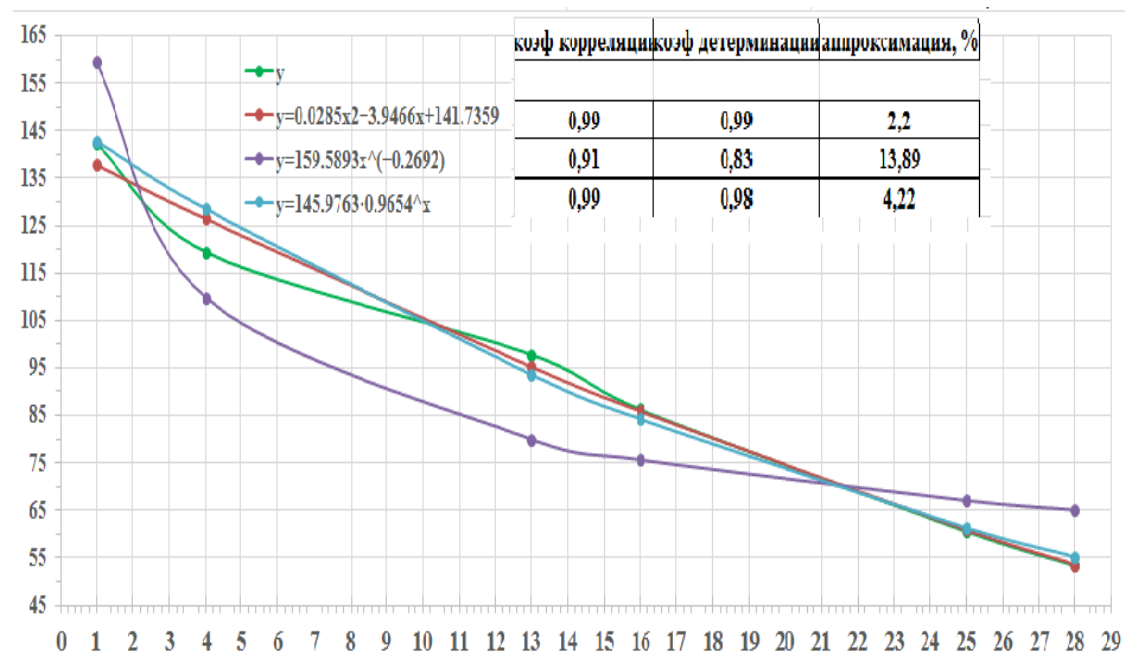


Рис. 4.15. Уравнения регрессии потерь предварительного напряжения в стальных затяжках модели 3 в условиях открытого навеса г. Геленджика.

За период испытаний 27 месяцев потери преднапряжения модели 1 в г. Саранске, значительные на первой стадии, затем медленно стабилизируются (графики рис. 4.11, 4.12); на моделях 2 и 3 в г. Геленджике потери преднапряжения продолжали интенсивно нарастать (графики рис. 4.13 и 4.14, 4.15 и 4.16). Увеличенное нарастание потерь преднапряжения моделей в процессе климатических испытаний в г. Геленджике вероятно вызвано изменчивыми условиями проведения эксперимента (многократными перемещениями моделей с пола на настил и обратно), проявившимися особенно при малом периоде испытаний.

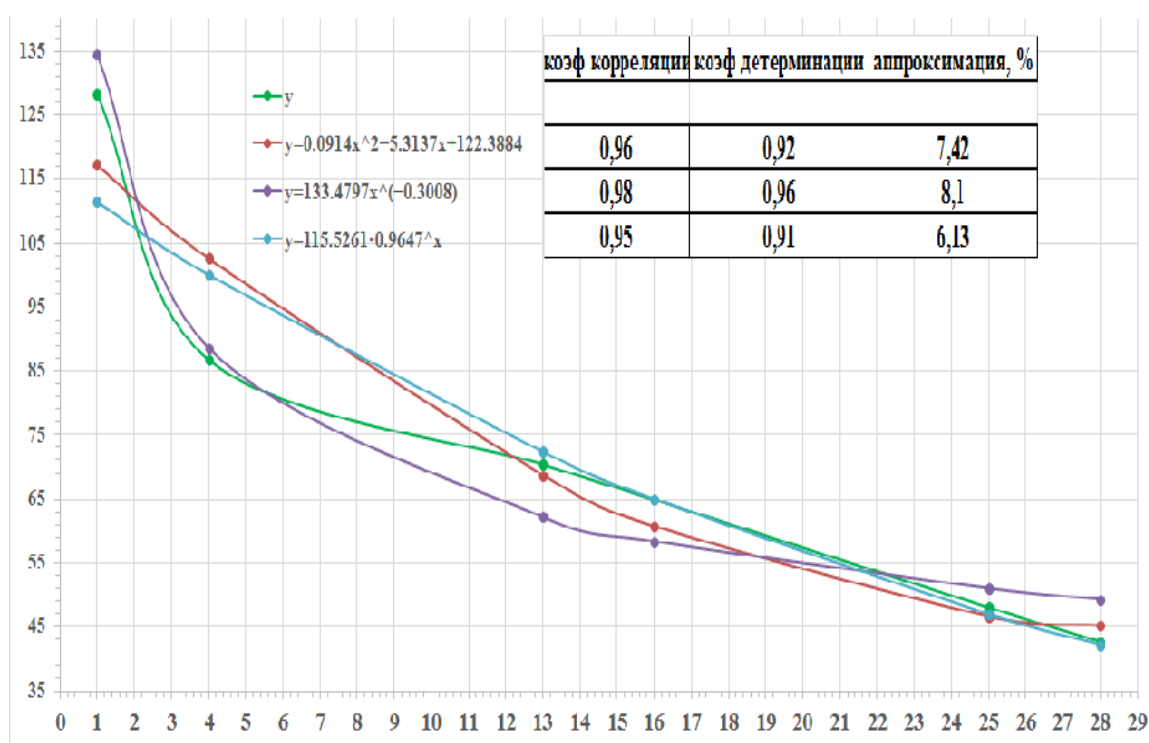


Рис. 4.16. Уравнения регрессии потерь предварительного напряжения в стальных раскосах модели 3 в условиях открытого навеса г. Геленджика.

Потери предварительного напряжения при уровне расчетных напряжений 0,6 R_{макс} в стержнях затяжек модели 1 составляет за 24 месяца до 49% от максимальных. Потери предварительного напряжения при уровне 0,4 R от расчетных напряжений в стержнях раскосов достигают за 24 месяца до 48%.

Экспериментальные данные потерь преднапряжения моделей 1 в г. Саранске и моделей 2 и 3 в г. Геленджике с учетом тарировочной кривой рисунка 4.7 приведены в приложении 3, в таблице 3.3 и 3.4.

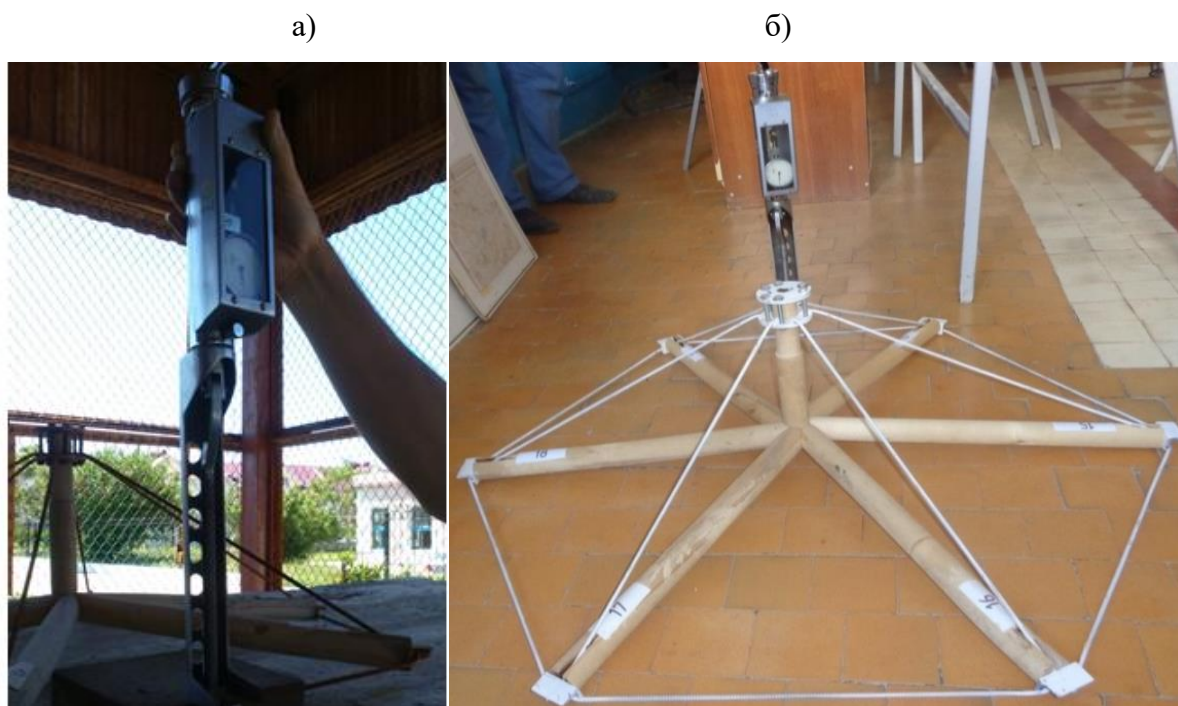


Рис. 4.17. Испытания моделей на площадках навесов: а - модели в г. Геленджике; б – модель в г. Саранске.

Подтверждаются выводы автора по оценке потерь преднапряжения в металлодеревянных конструкциях неотапливаемых зданий (закрытый навес), приведенные в работе [15]. Анализируя работу моделей в условиях агрессивного морского климата (открытый навес), следует отказаться от преднапряжения в незащищённых деревянных конструкциях в агрессивных средах и условиях повышенной влажности.

Численный эксперимент по исследованию преднапряжения геодезических стальных и деревянных куполов, проведенный с учетом нелинейных зависимостей потерь предварительного напряжения, позволил определить степень влияния различных факторов на величину потери преднапряжения.



Рис.4.18. Испытания моделей 2 и 3 на площадке навеса в г. Геленджике.

Наибольшее влияние оказывает жесткость сопряжения элементов и самих элементов купола и далее по степени влияния - начальные несовершенства для стальных и деревянных элементов, физическая нелинейность работы древесины, обмятие древесины в узлах, характер приложения нагрузки, влажность древесины, изменение температуры среды.

4.3 ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КУПОЛА

4.3.1. Выбор расчетной модели для численного исследования купола.

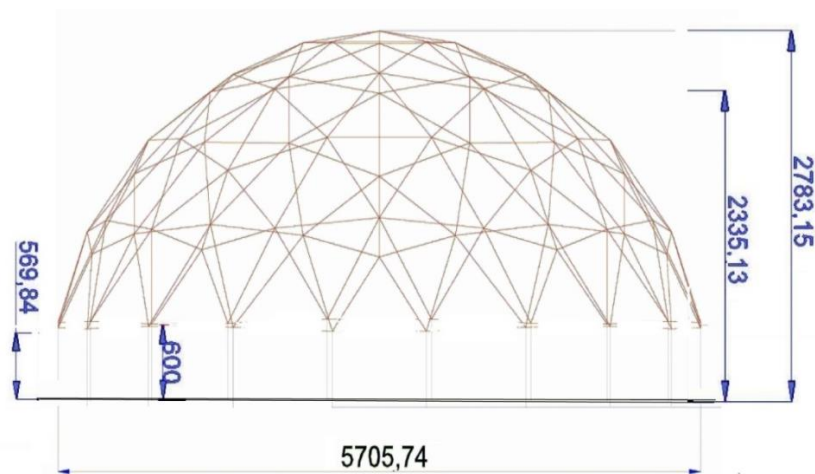
Для экспериментальной проверки принятых конструктивных решений была запроектирована стальная модель купола диаметром 5,94 м (рис. 4.19). Модель купола выполнена на основе геодезического 320-гранника по приведенной классификации 20ТАТ320 [12]. При проектировании модели купола из пирамидальных стальных каркасных панелей необходимо решить задачи определения значений геометрических отклонений (несовершенств) и параметров геометрии конструкции при расчете по деформированной схеме, а также задачи теоретических возможностей оценки величины критической узловой нагрузки и влияния различных значений эксцентриситета и жесткостей опор на НДС стержней и опор.

Модель купола собрана из двух типов пирамидальных монтажных панелей в виде правильных пятиугольника и шестиугольника, стороны и радиусы которых собираются из стальных прямоугольных труб 40x20x2 мм (рис. 4.22). Основное опирание купола выполнено на трубчатые стойки $\varnothing 60 \times 3$ мм с эксцентриситетом внутрь купола на 20 мм. При расчете рассмотрено два варианта опор: жесткозащемленные опоры под каждым узлом на заданном уровне купола и жесткозащемленные опоры с затяжками на уровне верха опор. Для стоек минимальной возможной жесткости принята высота 600 мм.

Нагрузка, имитирующая вес элементов купола прикладывается к стержням по всей поверхности модели купола, а вес от покрытия и снеговая нагрузка прикладывается к характерным узлам, которые являются центрами монтажных панелей (рис. 4.19). Такая нагрузка будет наиболее невыгодна как для устойчивости купола в целом, так и для его элементов и позволит оценить преимущества работы новой конструкции при работе на устойчивость как панельно-стержневой системы. Для оценки устойчивости стержневых куполов

принимается узловое соединение, позволяющее реализовать шарнирную передачу усилий в узлах. Это соединение на парных болтах показано на рисунке 4.22. Узлы должны обеспечить также необходимую монтажную жесткость, как отдельных каркасных панелей-пирамид, так и монтажных частей купола (рис. 3.6) при сборке и установке его в проектное положение [29]. Принимаем для жесткого опирания стоек сплошную железобетонную фундаментную плиту под куполом толщиной 400мм.

а)



б)

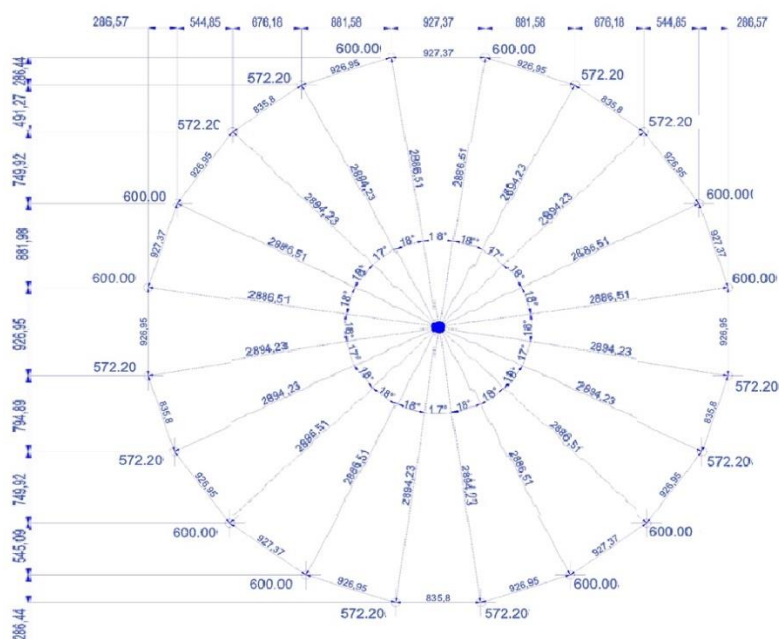


Рис. 4.19. Схема купола: а - вид; б - план опор.

Расчетные усилия в элементах купола находятся от всех возможных невыгодных сочетаний действия нагрузок. По найденным усилиям произведен расчет сечений стержней, элементов узлов и опорных стоек на прочность и устойчивость. Модель имитирует НДС натуральных куполов покрытия с соотношениями стрелы подъема к пролету 0,25 – 0,3 (пролеты 12-24 м).

Для определения коэффициентов подобия используем произведение подобия из [16].

$$\text{При } i = 1 \text{ будем иметь: } P_{1N}^1 E_{1N}^{-1} L_{1N}^{-2} = P_N^1 E_{2N}^{-1} L_{2N}^{-2}. \quad (4.1)$$

При принятых параметрах модели из (4.1), получим

$$P_r E_r L_r = 4 \times 1 \times 1 / 4 = 1 \times 1 \times 1 = 1.$$

Для нагрузки на узел коэффициент подобия равен 4.

С учетом коэффициента подобия на узел будем прикладывать нагрузку, имитирующую длительнодействующую нагрузку, исходя из реальных нагрузок на покрытие, не менее 400,0 Н. Нумерация узлов и стержней при расчете показана на рисунке 4.20.

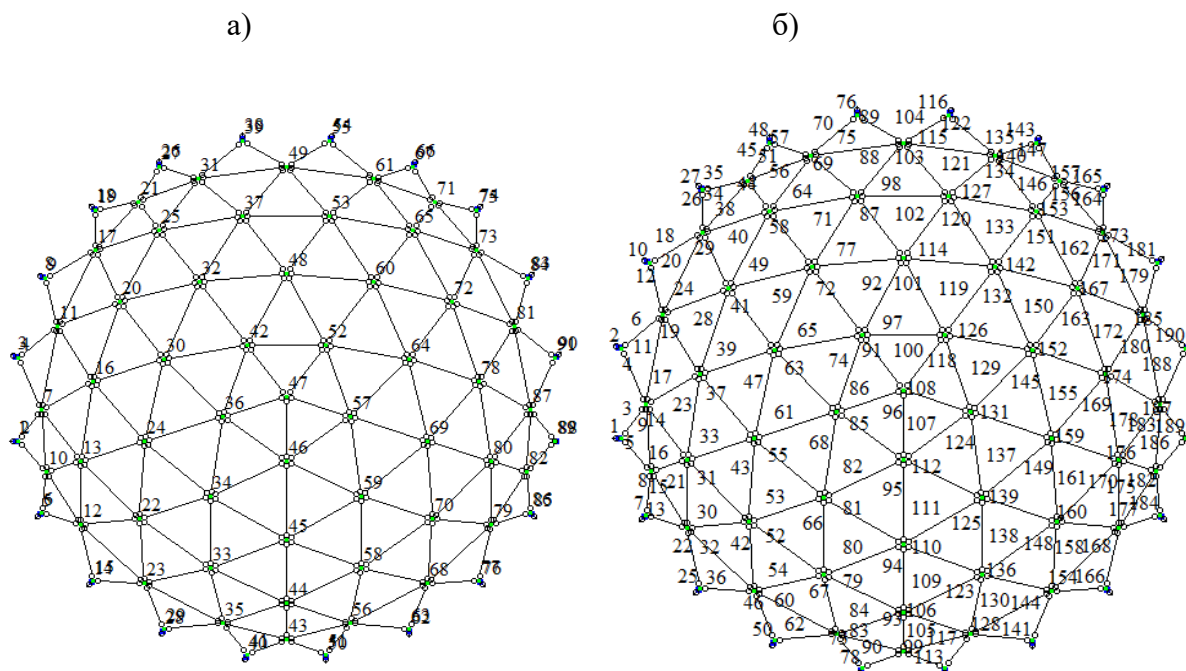


Рис. 4.20. Схемы купол: а - нумерация узлов; б – нумерация стержней.

Постоянные нагрузки (от массы купола, панелей покрытия и кровли на узел купола)табл. 4.1:

Таблица 4.1.

Масса покрытия (g_1):

Вид нагрузки	Нормативная нагрузка, Н/узел	Коэффициент надежности по нагрузке	Расчетная нагрузка, Н/узел
• Профнастил, $h=1$ мм, $S=0,57$ м ² , $\delta = 77$ кН/м ³	0,44	1,1	0,5
• Утеплитель, $h=150$ мм, $S=0,57$ м ² , $\delta = 4$ кН/м ³	344	1,3	447,2
• Элементы купола, [40x20x2 мм, $\delta = 1.194$ кг/м, $l=2,82$ м	337	1,1	370,7
• Элементы оборудования	180	1.1	185
Итого	681,4		1013,4

Расчетная снеговая нагрузка

Нормативное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия определяем по [159]

$$S_0 = 0,7 \times c_t \times c_e \times S_g = 0,7 \times 1,0 \times 0,85 \times 1,8 = 1,071 \text{ кН/м}^2, \quad (4.2)$$

где c_e - коэффициент, учитывающий снос снега с покрытий зданий под действием ветра, $c_e = 0,85$ при диаметре купола $d \leq 60$ м;

c_t - термический коэффициент, ($c_t=1$);

S_g - вес снегового покрова на 1 м² горизонтальной поверхности земли, для третьего снегового района равным 1,8 кН/м².

Расчетная снеговая нагрузка на покрытие:

$$S = S_0 \times \gamma_n \times \gamma_f = 1,5 \text{ кН/м}^2$$

γ_n - коэффициент надежности по назначению здания (1,0);

γ_f - коэффициент надежности по нагрузке (1,4);

Для куполов с отношением $f/d > 0,05$ следует учитывать варианты 1, 2 и 3 при уклонах $\alpha < 60^\circ$. Нагрузка для варианта 1 на узлы купола сведена в таблицу 4.2:

$$F_3 = S \times \mu \cdot A \cdot \gamma_n; \text{ где } A - \text{грузовая площадь};$$

μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие.

Таблица 4.2.

Снеговая нагрузка на узлы сектора

Номера узлов	$S, \text{кН/м}^2$	μ_1	$A, \text{м}^2$	γ_n	$F^*, \text{кН}$
47	1,5	0,99	0,5	1	0,74
36	1,5	0,89	0,57	1	0,76
30	1,5	0,71	0,57	1	0,61
24	1,5	0,71	0,57	1	0,61
16	1,5	0,45	0,57	1	0,39
22	1,5	0,45	0,57	1	0,39
11	1,5	0,16	0,57	1	0,14
13	1,5	0,16	0,57	1	0,14

Для варианта 2 нагрузки [159] принимаем при $\alpha = 45^\circ$; $\mu_2 = 1,5$. Снеговая нагрузка этого варианта на узлы купола сведена в таблицу 4.3. Схемы приложения этих нагрузок показаны на рисунке 4.21.

Таблица 4.3.

Снеговая нагрузка на узлы сектора

Номера узлов	$S_g, \text{кН/м}^2$	μ_2	$A, \text{м}^2$	γ_n	$F^*, \text{кН}$
47	1,5	0,1	0,5	1	0,08
36	1,5	0,2	0,57	1	0,17
30	1,5	0,5	0,57	1	0,43
24	1,5	0,5	0,57	1	0,43
16	1,5	1,5	0,57	1	1,28
22	1,5	1,5	0,57	1	1,28
11	1,5	0,29	0,57	1	0,25
13	1,5	0,29	0,57	1	0,25

*Средняя снеговая нагрузка на каждый из шести центральных узлов панелей 1, 00 кН; с учетом коэффициента подобия будет приложена по 4, 0 кН или 400кГ

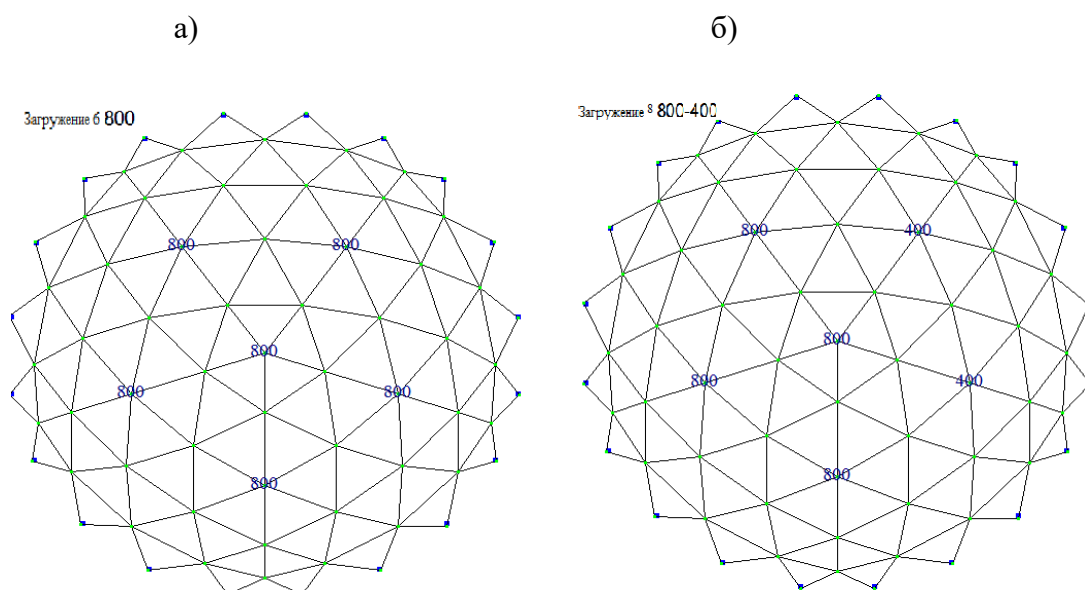


Рис. 4.21. Схема загрузений в двух вариантах модели купола на узлы центров пирамидальных панелей: а - симметричная; б – асимметричная.

Расчетная ветровая нагрузка

Нормативное значение ветровой нагрузки w определяем как сумму средней w_m и пульсационной w_p составляющих [159]

$$w = w_m + w_p. \quad (4.3)$$

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки w_m $w_m = w_0 \times k \times c = 0,30 \times 0,5 \times 1 = 0,15 \text{ кПа}$;

где w_0 - нормативное значение ветрового давления;

$k(z_g)$ - коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты 3 м, $k(z_g) = 0,5$; c - аэродинамический коэффициент.

Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки w_p для жестких сооружений [159], определяем по формуле

$$w_p = w_m \zeta(z_g) v, \quad (4.4)$$

$$w_p = w_0 \times C_3 \times v = 0,15 \times 1,22 \times 0,89 = 0,165 \text{ кПа};$$

где w_m - определяется в соответствии с [159]; коэффициент пульсации давления ветра - $\zeta(z_g) = 1,22$, $v = 0,89$ - коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра.

Тогда $w_{\text{л}} = w_{p+} w_m = 0,15+0,16=0,31 \text{ кПа}$.

Нагрузка на узлы купола показана в табл. 4.4 и 4.5

$W_{x,y,z} = w \times k \times c \times A \times \gamma_f \times \gamma_n$; где: $k_z = 0,5$; $A = 0.57 \text{ м}^2$ - грузовая площадь;

Таблица 4.4

Ветровая нагрузка на узлы сектора с наветренной стороны

Номера узлов	$w, \text{кН/м}^2$	c_x	$A, \text{м}^2$	γ_n	$W, \text{кН}$
47	0,31	1,3	0,5	1	-0,16
36	0,31	1,1	0,57	1	-0,12
30	0,31	0,8	0,57	1	-0,10
24	0,31	0,5	0,57	1	-0,09
16	0,31	0,25	0,57	1	-0,05
22	0,31	0	0,57	1	0
11	0,31	-0,2	0,57	1	0,06
13	0,31	-0,4	0,57	1	0,09
7	0,31	-0,6	0,57	1	0,12
12	0,31	-0,8	0,57	1	0,14
10	0,31	-0,8	0,5	1	0,8

γ_f - коэффициент надежности по ветровой нагрузке (1,4);

γ_n – коэффициент надежности по назначению здания (1,0).

Таблица 4.5

Ветровая нагрузка на узлы сектора с подветренной стороны

Номера узлов	$S, \text{кН/м}^2$	μ_1	$A, \text{м}^2$	γ_n	$F, \text{кН}$
47*	0,31	1,3	0,5	1	0,14
36*	0,31	1,1	0,57	1	0,15
30*	0,31	1,0	0,57	1	0,12
24*	0,31	0,8	0,57	1	0,11
16*	0,31	0,8	0,57	1	0,11
22*	0,31	0,7	0,57	1	0,08
11*	0,31	0,7	0,57	1	0,08
13*	0,31	0,6	0,57	1	0,07
7*	0,31	0,6	0,57	1	0,07
12*	0,31	0,6	0,57	1	0,07
10*	0,31	0,6	0,5	1	0,06

4.3.2. Исследование напряженно-деформированного состояния расчетной модели купола.

Статический расчет модели купола проводили с помощью программного комплекса Лира 9.4. Расчетные схемы, схемы загрузжений и результаты расчета, предоставлены на рис. 4.24-4.26.

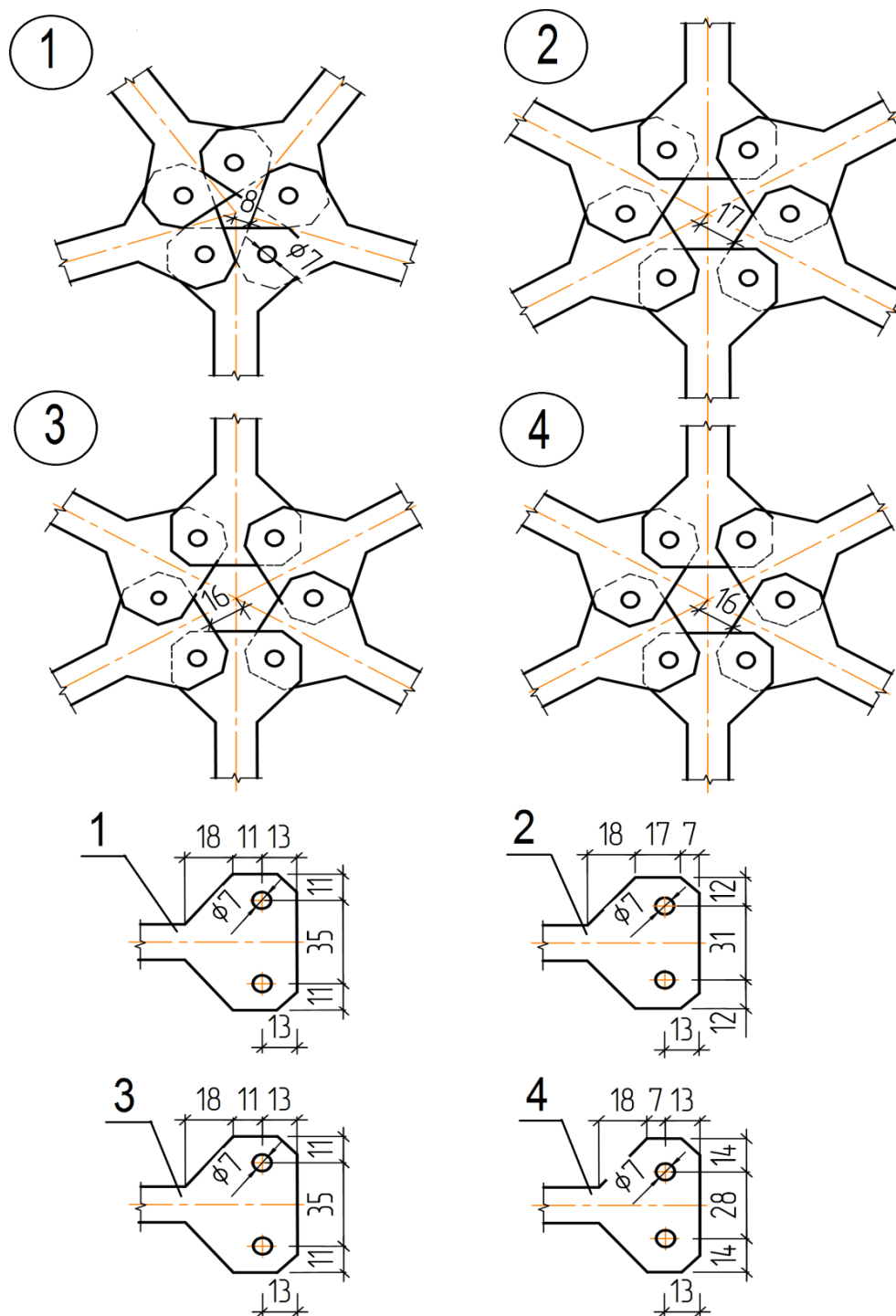


Рис. 4.22. К расчету стержней и узлов модели купола и нумерацией числа типоразмеров на купол элементов и узлов.

Анализ расчетных схем и нагрузок, а также распределение усилий в схемах (а – с эксцентриситетом без затяжек, б – с затяжками и без эксцентриситета рис. 4.24) показывает, что расчетные усилия и максимальные напряжения в стойках отличаются не более, чем на 15 %, затяжки усложняют узлы и утяжеляют купол.

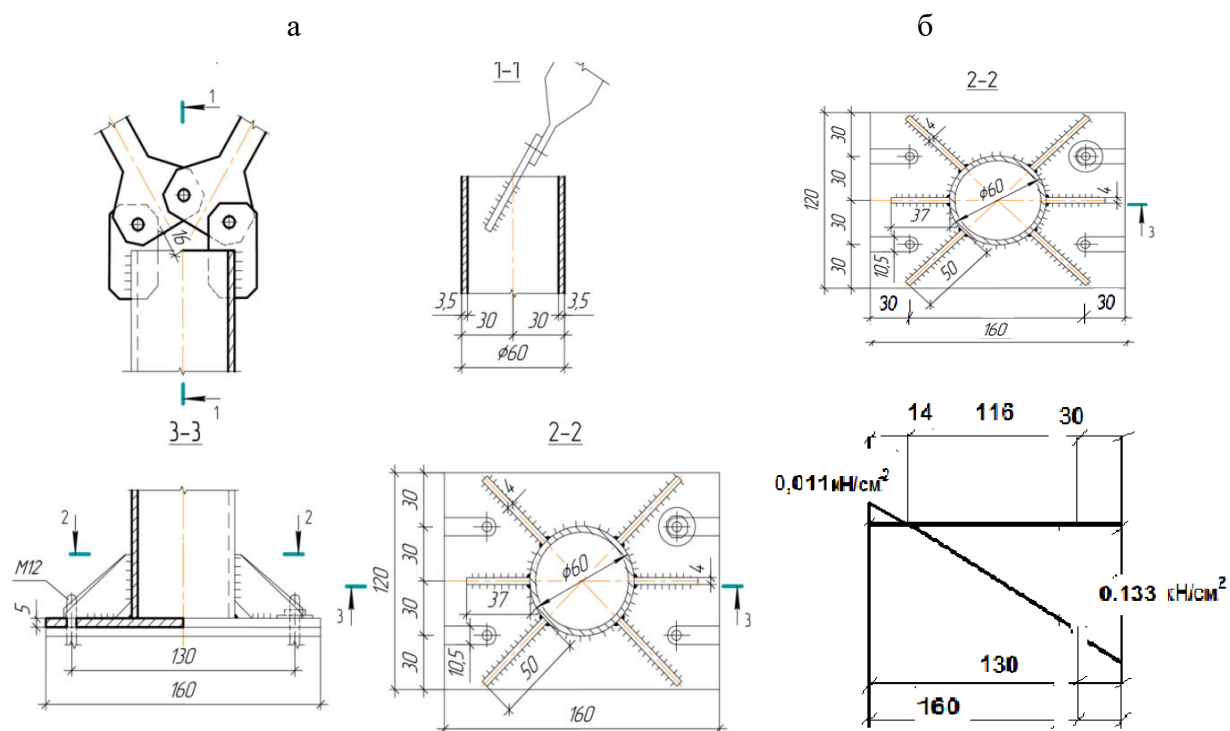


Рис. 4.23. К расчету оголовка и базы стойки: а - опорный узел купола; б - распределение давления у опорной плиты.

Поэтому выберем для экспериментальной проверки, менее изученный вариант на стойках с эксцентриситетом.

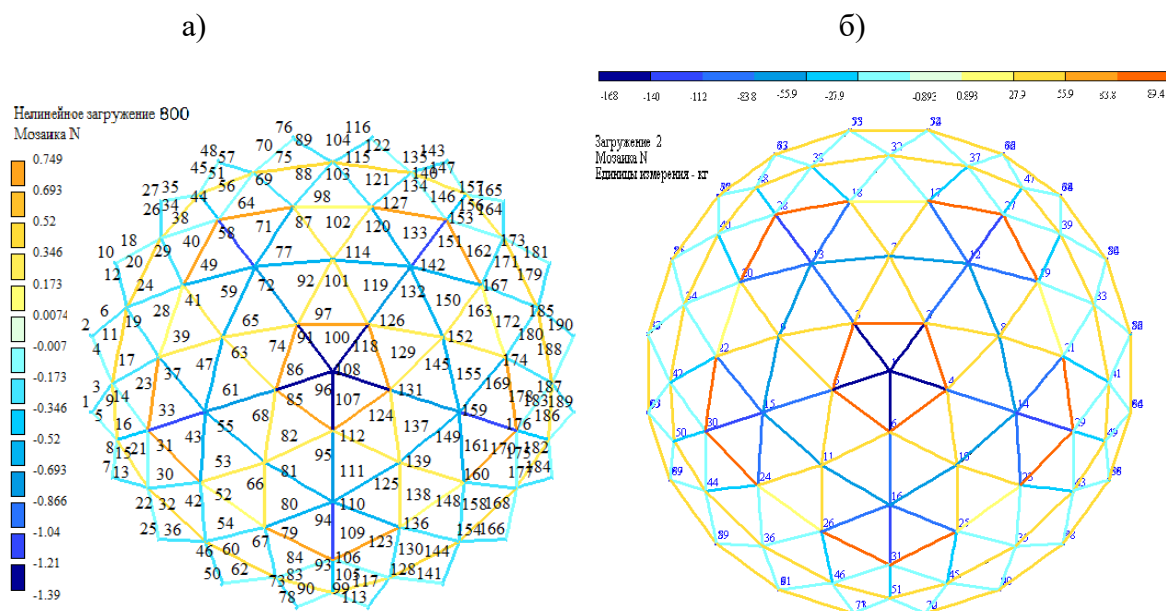


Рис. 4.24. Мозаика продольных усилий: а - для симметричного нагружения 8000 Н на б центральных узлов панели купола без затяжек; б – для симметричного нагружения 8000 Н на узел с затяжками по контуру.

4.3.3. Проверка устойчивости отдельных элементов и общей устойчивости модели купола как дискретной стержневой системы

Для определения критической узловой нагрузки предварительно вычисляются угол наклона стержней к касательной плоскости β , параметр начального отклонения ξ_0 и параметр прогиба узла ξ .

Угол наклона стержней к касательной плоскости в узле определяется:

$\beta = l/2 R$, где l - длина стержня купола.

Тогда для формулы (3.1) безразмерный параметр прогиба узла $\alpha = \xi_0 \beta$.

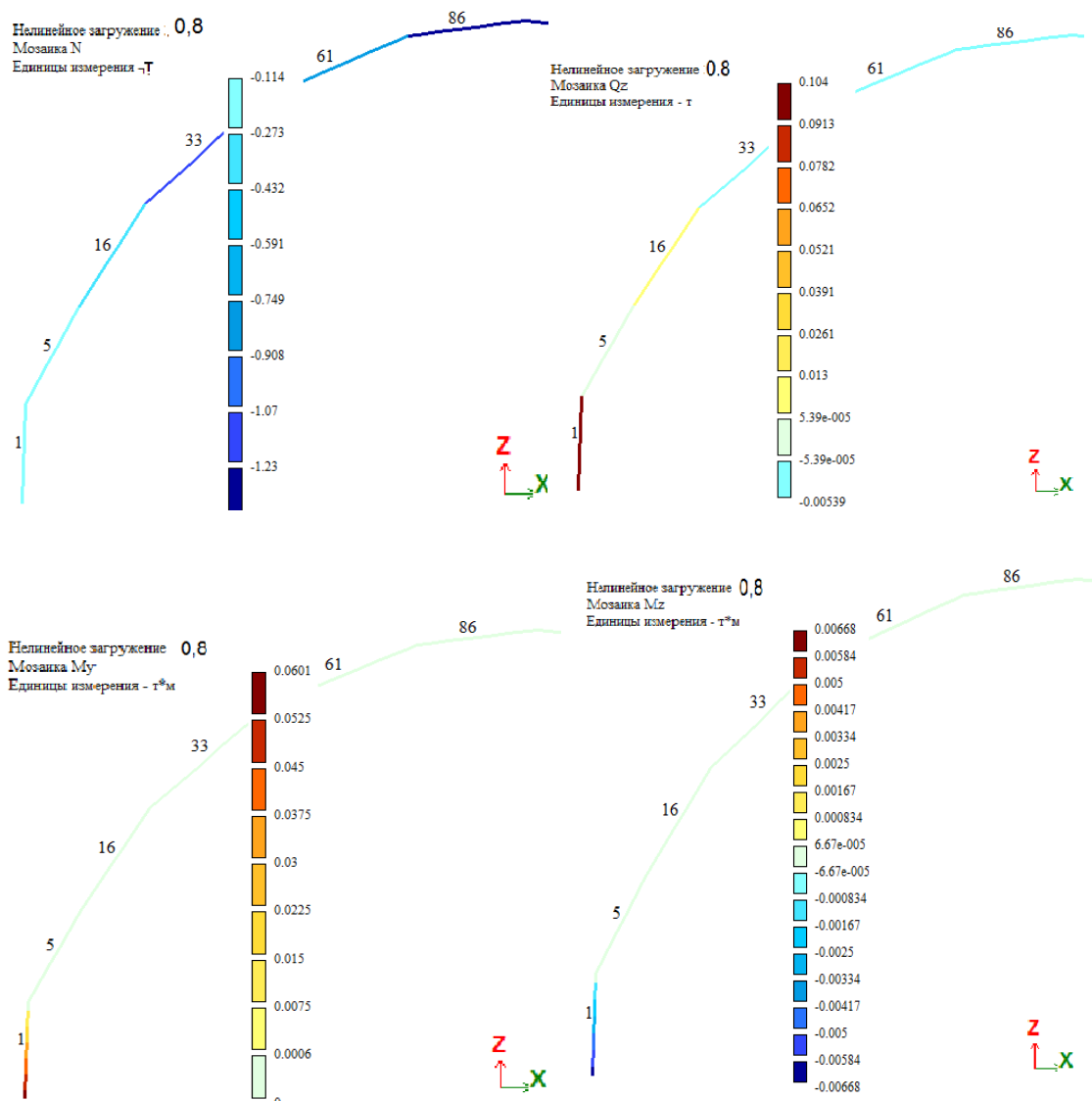


Рис. 4.25. Мозаика продольных, поперечных усилий и моментов для симметричного нагружения 8000 Н на узел модели купола.

Расчетное значение параметра начального отклонения в формуле (3.1):

$$\zeta_0 = 0,65 \times 1 \times 4 \times 3000^2 / 750^3 = 0,00555$$

где δ - допуск на изготовление стержней модели купола, $\delta = \pm 1,0$ мм.

Для снеговой нагрузки $\zeta_0 = 0,006$, $m = 0,5$, $p = 0,34$, $\zeta_{кр} = 0,29$. Для нагрузки заданной в эксперименте $\zeta_0 = 0,006$, $m = 0,25$, $p = 0,28$, $\zeta_{кр} = 0,35$.

Усилие в стержне с учетом его возрастания в процессе деформирования сетчатого купола определяется по формуле (3.2)

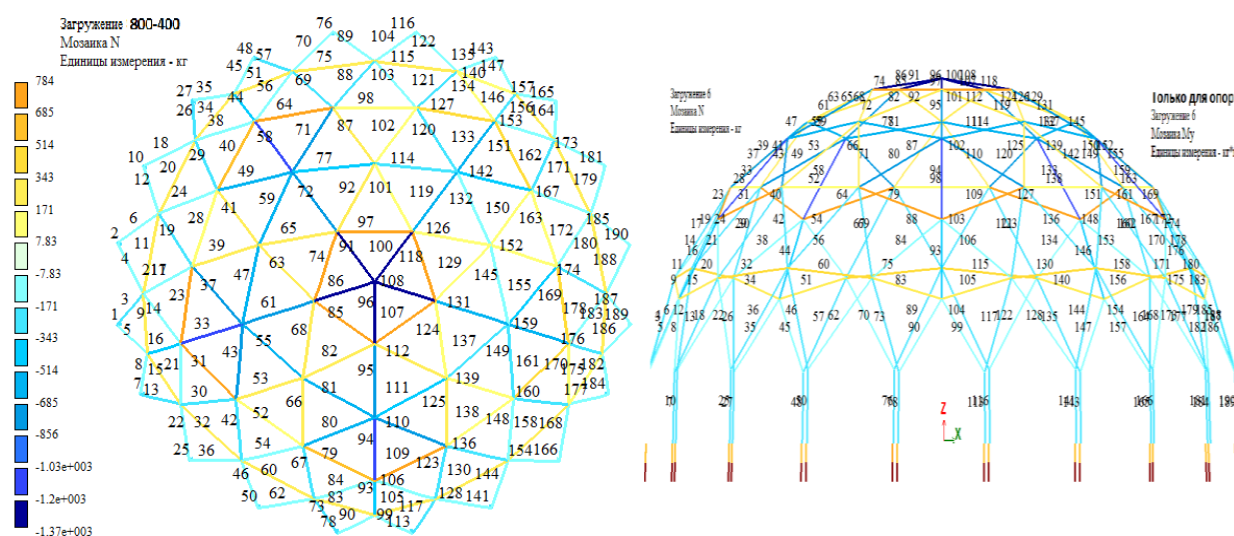


Рис. 4.26. Мозаика продольных, поперечных усилий и моментов для асимметричного нагружения 8000-4000 Н на шесть узлов модели купола.

Для расчетной нагрузки критические усилия в стержнях $N_{ef} = 13400 \times 1,41 = 189894$ Н, для модели купола с сосредоточенными нагрузками $N_{ef} = 13400 \times 1,54 = 20636$ Н, где k_1 - коэффициент возрастания продольной силы, определяется по формуле: $k_1 = 1 / (1 - \zeta_0 - \zeta) = 1 / (1 - 0,0000555 - 0,29) = 1,41$, для эксперимента $k_1 = 1 / (1 - \zeta_0 - \zeta) = 1 / (1 - 0,0000555 - 0,35) = 1,54$.

Для расчета узловой нагрузки с учетом геометрической нелинейности применяем формулу (3.3).

$$P_{cr} = 2 \times 2,1 \times 10^5 \times 152 \times 750^3 \times 0,4 / 8 \times 3000^3 = 7480 \text{ Н}.$$

Оценка местной потери устойчивости проведена для расчетной модели конструкции численными методами с учетом геометрической нелинейности (см. графики перемещений стержней в характерных сечениях купола на рис.

4.32-4.34). На графиках рисунка 4.34 видно критическое положение стержней, которое создается испытательной нагрузкой по центру пятиугольной панели купола.

4.3.4. Конструктивный расчет модели стального купола

Определяем усилия в стержнях и перемещения в узлах, используя программный комплекс «ЛИРА-9.4» (схемы статического расчета и деформированные схемы, рис.4.24-4.26, 4.32 -4.34).

Узлы модели купола, рядовые и монтажные, с болтовыми парными соединениями показаны на рисунках 4.22-4.23.

Подбор сечений стержневых элементов купола

Для купола расчет несущих стержней выполняем по расчетной схеме простой балки на двух опорах с расчетной длиной - L и предельной гибкостью $180 - 60\alpha$, невоспринимающей нагрузки по длине стержня;

$\alpha = \frac{N}{\varphi A R_y \gamma_c}$ - коэффициент, принимаемый не менее 0,5 (в необходимых случаях вместо φ следует применять φ_e).

Расчет на прочность элементов однопоясного купола, подверженных центральному сжатию силой N , выполняем по формулам [158]. Расчетные характеристики сечений приведены в таблице 4.6.

Расчет на устойчивость сплошностенчатых элементов, подверженных центральному сжатию силой N , выполняем по формуле для сжатых элементов каркаса шестиугольных панелей:

$$\sigma = N / \varphi A < R_y; \quad (4.1)$$

где φ - коэффициент устойчивости при центральном сжатии, значение которого при $\bar{\lambda} > 0.4$ следует определять по формуле [158]. как для сжатых элементов каркаса из шестиугольных панелей с учетом условий работы конструкции [158]:

$$\sigma = N / \varphi A < R_y = 13850 / 0,94 \times 152 = 96,9 < 240 \text{ МПа} .$$

С учетом геометрической нелинейности для сжатых элементов каркаса из пятиугольных панелей с коэффициентом k при проверке местной устойчивости

$$\sigma = N / \varphi A k < R_y = 13850 / 0,72 \times 152 \times 0,46 = 235,0 < 240,0 \text{ МПа}$$

Расчет на прочность растянутых элементов купола из стали С245, с соотношением $R_u / \gamma_u > R_y$, эксплуатация которых возможна и после достижения металлом предела текучести, выполняем по формуле

$$\frac{N}{A_n} \leq \frac{R_u \gamma_c}{\gamma_u} \quad (4.2)$$

Напряжения в растянутых элементах не превышают 12 МПа.

Расчет стоек купола

Расчет на прочность внецентренно-сжатых, сжато-изгибаемых, внецентренно-растянутых и растянуто-изгибаемых трубчатых стоек купола из стали С245, не подвергающихся непосредственному воздействию динамических нагрузок, выполняем по формуле:

$$\left(\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{M_x}{c_x W_{xn, \min} R_y \gamma_c} + \frac{M_y}{c_y W_{yn, \min} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (4.3)$$

где N , M_x и M_y – абсолютные значения соответственно продольной силы и изгибающих моментов при наиболее неблагоприятном их сочетании;

n , c_x и c_y – коэффициенты, принимаемые по таблице Е.1[158]. Коэффициенты для расчета элементов с учетом развития пластических деформаций $n=1,5$ $c_x=c_y=1.26$ при $A_n/A_c=0,5$.

Определим напряжения в стойке без учета эксцентриситета
 $\sigma = (2260/537) + 610900/7290 + 85600/7290 = 99,7 < R_y = 240 \text{ МПа}.$

С учетом эксцентриситета

$$\sigma = (2610/537) + 600000/7290 + 70000/7290 = 96,8 < R_y = 240 \text{ МПа}.$$

Проверка устойчивости стойки из плоскости действия изгибающего момента в виду симметричности сечения трубы не требуется.

Конструирование и расчет опорной стойки модели купола

Конструкцию оголовка принимаем в соответствии с рисунком 4.23 а.

Так как высота сечения $\varnothing 60$ стойки $h=60$ мм, а элементы купола передают нагрузку через ребра $100 \times 60 \times 3$ мм, то нагрузку на стойку передаем не через плиту оголовка, а непосредственно на стенку стойки.

Таблица 4.6.

Усилия и напряжения в стержнях

Параметры	№ элемента					
	86	61	64	14	1	2
A, см ²	1,52	1,52	1,52	1,52	5,37	5,37
I _x , см ⁴	1,12	1,12	1,12	1,12	21,88	21,88
I _y , см ⁴	3,34	3,34	3,34	3,34	21,88	21,88
i _x , см	0,86	0,86	0,86	0,86	21,88	21,88
i _y , см					21,88	21,88
W _x , см ³	1,12	1,12	1,12	1,12	7,29	7,29
W _y , см ³	1,67	1,67	1,67	1,67	7,29	7,29
L, см	709	930	918	827	600	574
L _{ef} , см	709	930	918	827	300	287
N*, Н	-13405	-10861	-7146	-7978	-2608	- 2264
M*x, Н*м	-	-	-	-	594,48	-610,95
M*y, Н*м	-	-	-	-	-67,49	- 85,56
N, Н	-13850	-8040	7230	-260	-2608	- 2264
M _x , т*м					600	620
M _y , т*м					7	9
λ	83	108	107	96	60	60
λ^-	2,80	3,64	3,61	3,24	2,94	2.94
δ	17,84	25,25	24,80	19.91	0.98	0.98
Напряжения	96.8	76,4	46,2	34.98	43.16	229.16
Нелинейные напряж.	235,0	-	-	-	-	-
Недонапряж. σ , %	59,6/2,9	65.55	81.08	82.36	40,1	40.1

Принимаем ширину опорного ребра, исходя из обеспечения передачи нагрузки с купола через торец,

$$b_r = 60 \text{ мм} > b_{fl} / 2 + t_{pl} - t_w / 2 = 40 / 2 + 20 - 3 / 2 = 43 \text{ мм}, \quad \text{здесь } t_w = 3 \text{ мм} -$$

толщина стенки стойки, $b_{fl} = 60 \text{ мм}$ - диаметр опорной стойки купола.

Толщину опорной плиты стойки и ее размеры в плане назначаем конструктивно, с учетом свесов (15...20 мм) плиты по контуру колонны для размещения сварных швов: $t_{pl} = 3\text{мм}$, $h_{pl} = 160\text{мм}$, $b_{pl} = 120\text{мм}$.

Для фундамента принимаем бетон класса В10 с $R_b = 0,6\text{кН} / \text{см}^2$. Задаемся шириной плиты, исходя из размещения на ней стержня колонны, анкерных болтов и сварных швов: $B = e + 60 = 60 + 60 = 120\text{мм}$, тогда требуемая длина плиты равна:

$$L = 160\text{мм} > \frac{N}{2B\psi R_{b,loc}} + \sqrt{\left(\frac{N}{2B\psi R_{b,loc}}\right)^2 + \frac{6|M|}{B\psi R_{b,loc}}} =$$

$$\frac{2260}{2 \cdot 120 \cdot 0,75 \cdot 7,2} + \sqrt{\left(\frac{2260}{2 \cdot 120 \cdot 0,75 \cdot 7,2}\right)^2 + \frac{6 \cdot 620000}{120 \cdot 0,75 \cdot 7,2}} = 89\text{мм}$$

где $N = 2260\text{Н}$ и $M = 620000\text{Н} \cdot \text{мм}$ - продольная сила и изгибающий момент в сечение 1-1 при расчетной комбинации усилий, дающей наибольшее сжатие у края плиты;

$R_{b,loc} = \varphi_b R_b = 1,2 \cdot 0,6 = 0,72\text{кН} / \text{см}^2$ — расчетное сопротивление бетона смятию, здесь предварительно принято $\varphi_b = 1,2$; $\psi = 0,75$ — коэффициент, учитывающий неравномерное распределение напряжений в бетоне.

Принимаем плиту размерами 160x120 мм. Уточним расчетное сопротивление бетона смятию $R_{b,loc} = 1,28 \cdot 0,6 = 0,768\text{кН} / \text{см}^2$, здесь $\varphi_b = \sqrt[3]{A_f / A_{pl}} = \sqrt[3]{(60 \cdot 60) / (160 \cdot 120)} = 0,57 < 2,5$, и проверим прочность бетона на смятие под плитой колонны (рис. 4.23)

$$\sigma_{f,max} = \frac{N}{BL} + \frac{6M}{BL^2} = \frac{-2260}{120 \cdot 160} + \frac{6 \cdot (-620000)}{120 \cdot 160^2} = 1,23\text{МПа} = 0,75 \cdot 0,786 = 0,59\text{кН} / \text{см}^2. \quad (4.4)$$

Прочность бетона плиты жесткости обеспечена.

Расчет опорных пластин (плит)

Площадь стальной опорной плиты должна удовлетворять требованиям расчета на прочность фундамента (плиты жесткости). Передача расчетного усилия на опорную плиту может осуществляться через ребро опирающейся

конструкции и через сварные швы. Определим положение нулевой точки в эпюре напряжений (рис.4.23 б)

$$x = \frac{\sigma_{\min} \cdot L}{\sigma_{\min} - \sigma_{\max}} = \frac{0,11 \cdot 16}{0,11 + 1,21} = 1,35 \text{ см},$$

$$\text{здесь } \sigma_{f,\min} = \frac{N}{BL} - \frac{6M}{BL^2} = \frac{-2260}{120 \cdot 160} - \frac{6 \cdot (-620000)}{120 \cdot 160^2} = 1,08 \text{ МПа} = 0,108 \text{ кН / см}^2.$$

Напряжения на участке сжатия эпюры напряжений по граням внутренней и наружной полок стойки

$$\sigma_1 = \sigma_{\max} \frac{116}{130} = -0,13 \cdot 0,89 = -0,1 \text{ кН / см}^2, \quad \sigma_2 = \sigma_{\max} \frac{116}{130} = -0,01 \text{ кН / см}^2.$$

Для определения толщины плиты вычислим изгибающие моменты на характерных участках плиты (рис. 4.23 б).

Требуемая толщина плиты

$$t_{\text{req, pl}} = \sqrt{\frac{6M_1}{bR_y \gamma_c}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 38,6}{60 \cdot 235 \cdot 1,2}} = 1,2 \text{ мм},$$

где $R_y = 235 \text{ кН / см}^2$ ([158] при толщине листового проката 3-20мм), $\gamma_c = 1,2$ [158] для опорных плит толщиной до 20мм).

На остальных участках толщины будут еще меньше. Окончательно принимаем плиту толщиной 4 мм с учетом толщин швов 3 мм и не менее максимально требуемой.

Анкерные болты рассчитываем на комбинацию усилий $-M_s = -620 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

При расчетах снижаем продольную силу на 10%, т.е. $N = 0,9 \cdot N_{\min} = -204 \text{ кН}$.

Краевые напряжения в бетоне фундамента при этой комбинации усилий (рис. 4.23 б):

$$\sigma_{f,\max} = \frac{N}{BL} + \frac{6M}{BL^2} = \frac{-2040}{160 \cdot 120} + \frac{6 \cdot (-620000)}{120 \cdot 160^2} = -1,31 \text{ МПа} = 0,13 \text{ кН / см}^2,$$

$$\sigma_{f,\min} = \frac{N}{BL} - \frac{6M}{BL^2} = 1,1 \text{ МПа} = 0,11 \text{ кН / см}^2.$$

Положение нулевой точки в эпюре напряжений

$$x = \frac{\sigma_{\max} \cdot L}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} = \frac{-0,121 \cdot 16}{-0,121 - 0,011} = 14,9 \text{ см}.$$

Растягивающее усилие в анкерных болтах

$$Z = \frac{|M| - |N|d}{y} = \frac{620000 - 2040 \cdot 37}{87} = 6259 \text{ Н},$$

где $d = 160/2 - 130/3 = 37 \text{ мм}$ - расстояние от геометрической оси колонны до центра тяжести сжатой зоны эпюры напряжений бетона под опорной плитой;
 $y = 16 - 3 - 13/3 = 8,7 \text{ см}$ - расстояние от оси анкерных болтов до центра тяжести сжатой зоны эпюры напряжений бетона под опорной плитой.

Определяем требуемую площадь сечения нетто анкерного болта:

$$A_{bn, req} = \frac{Z}{n R_{ba} \gamma_c} = \frac{6259}{2 \cdot 185 \cdot 1} = 16,91 \text{ мм}^2,$$

где $n=2$ – принятое количество анкерных болтов с одной стороны колонны; $R_{ba}=18,5 \text{ кН/см}^2$ – расчетное сопротивление растяжению фундаментных болтов из стали ВСт3кп2 [57].

Принимаем болт диаметром 8 мм ($A_{bn} = 36 \text{ мм}^2$) с глубиной заделки 240 мм.

4.3.5. Конструкция модели и стенда

Испытываемая стальная модель купола (далее СМК) представляет собой сферическую стержневую конструкцию (см. рис. 4.19.), стальные элементы которой сопряжены под углами $57-64^\circ$ и образуют треугольную сеть на сфере [12, 15, 167-169, 179. 187]. Пролет конструкции в осях составил 5974 мм, высота модели 2183 мм, высота опор 600 мм и 570 мм. Сечения элементов взяты из табл. 4.6. Схемы конструкции СМК приведены на рис. 4.19-4.26. Чертежи шарнирных узлов соединений стальных трубчатых стержней СМК, а также опорные стойки показаны на рисунке 4.25-4.26. Болтовые соединения позволяют поворот в плоскости стержней купола, но обеспечивают некоторую жесткость защемления из плоскости стержней, касательной к сфере, описывающей геодезический купол. Болтовые соединения также обеспечивают монтажную жесткость при сборке конструкции из панелей.

При выборе модели для экспериментального исследования купола в заданных условиях, руководствовались следующими соображениями:

- истощение несущей способности стержневой конструкции должно происходить по второй группе предельных состояний при выключении из работы пяти наиболее нагруженных стержней (по расчету за счет прощелкивания центрального узла (рис 4.19, 4.22.);

- загрузка узлов стержней вертикальной нагрузкой должно выполняться одновременно, для чего выполняется свободное выравнивание подвесок грузовых платформ, крепление которых происходит только за счет сил трения;

- потеря несущей способности стержня в составе модели должна происходить в плоскости действия нагрузки от центральной стойки; - закрепление опор А и С модели купола должно исключать их перемещение в процессе эксперимента для поддержания фиксированной величины возникающих в стержнях продольных усилий на каждом шаге нарастания λ и на каждом этапе падения напряжений.

Модель геодезического купола в виде части 320-гранника состоит из восьмидесяти пяти стальных трубчатых стержней с прямоугольным сечением 40x20x2 мм и двадцати опорных стоек из круглых труб $\Phi 60$ мм толщиной стенки 3 мм. Под действием вертикальной внешней узловой нагрузки от свободно подвешенных грузов в виде бетонных поребриков массой $24 \pm 0,5$ кг по шести характерным узлам, во всех стержнях модели возникают продольные осевые усилия без значительных изгибающих моментов в узлах и по длине (см. рис. 4.24).

Модель купола установлена на специально спроектированных стойках-опорах, которые позволяют исследовать ее в условиях, близких к критическим. При этом, все опорные узловые элементы, купола изготовлены для выбранного положения креплений - с эксцентриситетом к центру 20 мм (рис. 4.23). Стойки-

опоры в свою очередь опирались на железобетонную плиту толщиной 400 мм (узел крепления показан на рис.4.23).

Модель, примененная для исследования способов изготовления подобных куполов, воспроизводила в определенном масштабе не только схему, но и размеры всех элементов и деталей купола пролетом 23,4 м; причем физические параметры модели и натурной конструкций были идентичны, а геометрические параметры и нагрузки были определены по линейному масштабу (простое подобие) [12, 15, 33, 71].

4.3.6. Экспериментальное исследование крупномасштабной стальной модели купола

При испытании натурной конструкции модели геодезического купола специфической разрезки [12, 15, 167-168, 178,182] ставились в качестве основных задач: оценка напряженно-деформированного состояния с учетом деформированной схемы, а также разработка и проверка методики испытания систем с опорами в виде стоек и оценка влияния опор с заданной жесткостью. Для определения напряжений, возникающих в элементах каркаса купола, примыкающих к центральным узлам, установлены строенные и спаренные тензодатчики Гугенбергера (рис. 4.19-4.29), а также установлена разметка для сканирования напряжений с помощью прибора STRESSVISION EXPERT. Для фиксации перемещений на площадке для испытаний предусмотрены вертикальные и горизонтальные реперы (рис. 4.27 - 4.29). Для измерения перемещений узлов модели и опор (пяти направлений) на стенде и площадке подготовлены места для установки шести прогибомеров Максимова, электронных дальномеров Leica Disto D510 и их точек визирования (для второстепенных узлов), а также места установки индикаторов часового типа ИЧ-10 у опор.

Испытания проводили за три этапа:

Technical diagram of a dome structure with various measurement points and labels. The diagram includes the following labels and dimensions:

- Vertical dimensions (right side):** 2783.15 (total height), 2335.13 (height to the top of the dome).
- Horizontal dimensions (bottom):** 569.84 (left side), 5705.74 (total width), 500 (width of the central section).
- Labels:**
 - Вертикальный репер (Vertical reference point)
 - Спаренные тензометры (Paired strain gauges)
 - Гугенберга (Gauguin)
 - Подготовленное место место сканирования (Prepared scanning point)
 - Индикаторы ч.т. (Indicators of the object)
 - Горизонтальный репер (Horizontal reference point)
 - Центральный репер (Central reference point)
 - Тензоцентр Гугенберга у места сканирования (Gauguin strain center at the scanning point)
 - Прогибмер Максимова или Лазерный дальномер (Maximov's deflection gauge or laser distance meter)
 - Горизонтальный репер (Horizontal reference point)

Рис.4.27. Модель стального купола: а – вид сверху и разрез 1; б – узел Б модели, в – узел А модели.

После снятия нагрузки положение узлов купола практически не изменилось. Далее этого была произведена настройка приборов и снятие отсчетов по напряжениям и перемещениям;

- при симметричном действии сосредоточенных сил величиной $0,25P$, $0,5P$, $0,75P$ и P на шесть центральных узлов, т.е. четырех уровней нагрузки. На втором этапе после каждого уровня загрузки также были произведены замеры по приборам и снятие отсчетов по напряжениям и перемещениям после приложения каждого уровня нагрузки;

- при асимметричном действии сосредоточенных сил с разгрузкой с одной стороны купола на двух центральных узлах, затем также с интервалом $0,25P$ выполнялась разгрузка оставшихся узлов. На третьем этапе после каждого загрузки также были произведены замеры по приборам и снятие отсчетов по напряжениям и перемещениям.



Рис.4.28. Экспериментальная установка с моделью стального купола в сборе.

В период диагностирования 09.10.2016 температура воздуха составляла $+2^{\circ}\text{C}$. Влажность воздуха 78%.

По результатам обработки численного эксперимента показаны мозаики зависимостей максимальных усилий в стержнях СМК и опорах при конечных уровнях каждого этапа загрузки (рис.4.24-4.26).

Результаты численного эксперимента с деформированной схемой модели по оценке напряжений и данные измерений действительных перемещений приведены в таблицах 4.7-4.8 и показаны на графиках рисунков 4.32-4.34.



Рис.4.29. Спаренные тензометры Гугенберга на элементах пяти направлений СМК.

Действительные напряжения по стержням и опорам пяти направлений СМК, определенные с помощью тензометрии (см. рис. 4.27 - 4.29) в сравнении с данными теоретических исследований (см. рис. 4.24-4.26), приведены в таблице 4.4-4.6. В ней также использованы для проверки значения напряжений (рис. 4.30 - 4.31), возникающих в стержнях, измеренные с помощью прибора STRESSVISION EXPERT.

Измерения проводились при частично снятом изоляционном покрытии. Шаг сетки по $\{X, Y\}$ 10x20 mm. Размер сетки по $\{X, Y\}$ = 5x5 точек*строк. Объект диагностирования представляет основной металл — 40x20 мм и толщиной стенки 2 мм, изготовленной из ферромагнитной стали. Температура воздуха в период диагностирования составляла 8.3° C.

На начальной стадии можно утверждать, что в слое 0,3 мм с высоким значением КМН (концентрации максимальных напряжений) - 3,91 отсутствуют зоны с существенным значением КНН (концентрации начальных напряжений) - 2,99. К ним прилегают области (рис.4.30, а) низких значений градиента РГМН (результатирующего градиента максимальных напряжений) - 4,89. Эти характеристики соответствуют низким классам НДС.

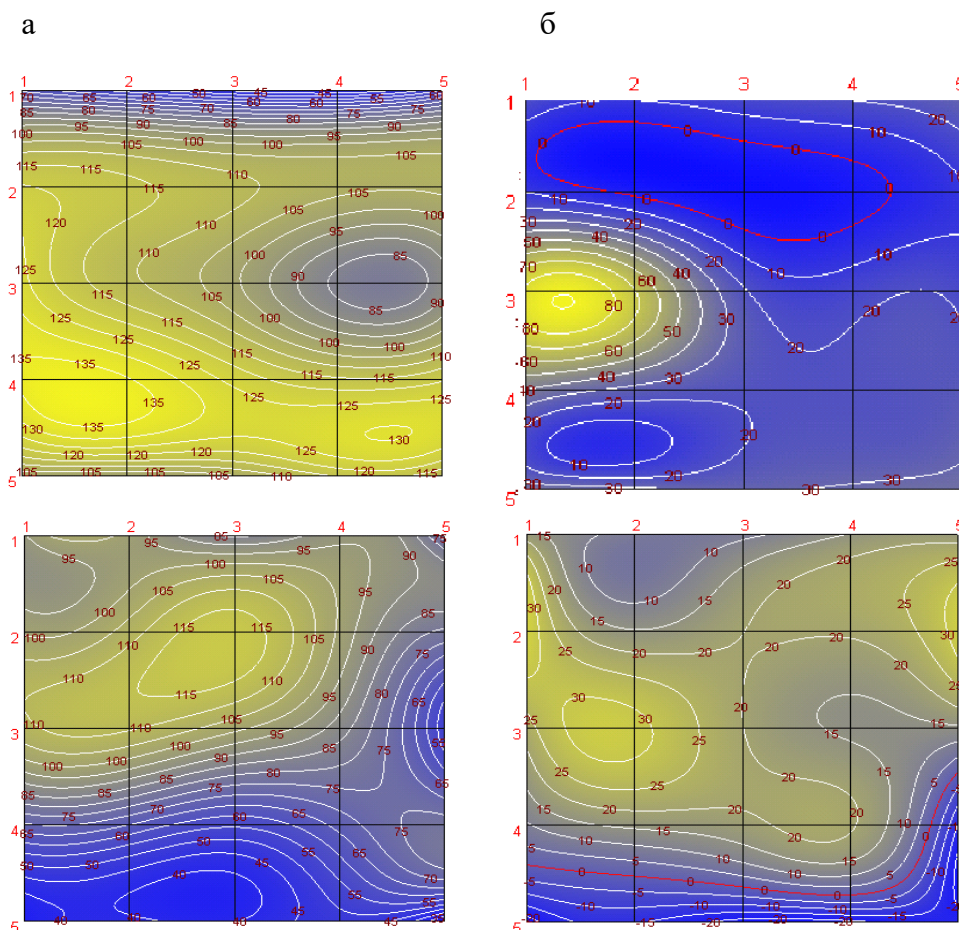


Рис. 4.30. Поля градиентов РГМН слоя 0,3 мм металла стенок стержня 33: а - уровень нагружения 2-2, б- уровень нагружения 2-4.

На основании классов НДС [51] для стали у зон с повышенным значением КМН (1.64) отсутствуют зоны с существенными значениями КНН (2,86). К ним прилегают области (рис.4.30, б) средних значений градиента РГМН (15,43). Эти характеристики соответствуют средним классам НДС.

На основании классов НДС для стали стенок стержня 33 у зон с повышенным значением КМН (2.62) отсутствуют зоны с существенными

значениями КНН (2,86). К ним прилегают области (рис.4.31, а) повышенных значений градиента РГМН (28,41). Эти характеристики соответствуют средним классам НДС.

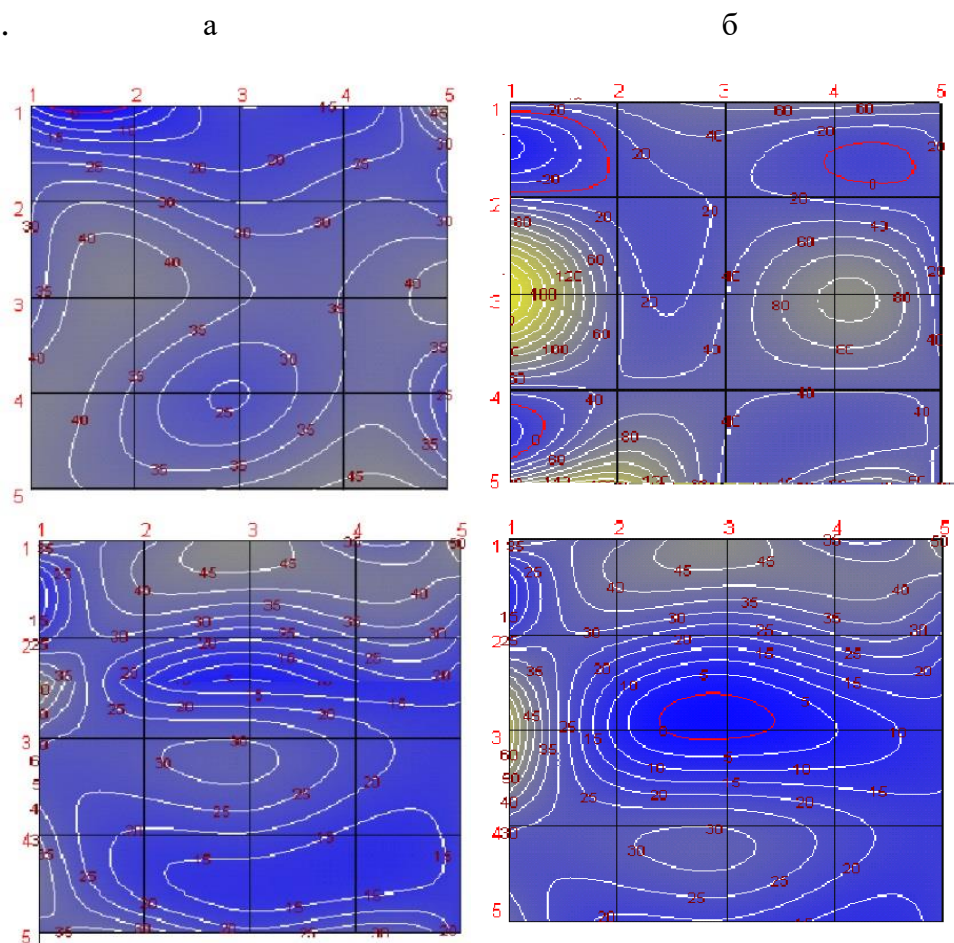


Рис. 4.31. Поля градиентов РГМН слоя 0,3 мм металла стенок стержня 86: а - уровень нагружения 2-2, б- уровень нагружения 2-4.

На начальной стадии перегрузок для стали стенок стержня 33 можно утверждать, что в слое 0,3 мм с высоким значением КМН (5,73) отсутствуют зоны с существенным значением КНН (4,64). К ним прилегают области (рис. 4.31 б) высоких значений градиента РГМН (59,72). Эти характеристики соответствуют высоким классам НДС. На мозаиках наблюдаются места концентрации напряжений.

По рисункам 4.22-4.24 и таблицам 4.7 и 4.8 видно, что в результате действия загрузений по узлам в нижних стержнях модели действуют усилия, которые вызывают краевые напряжения несколько меньше расчетных.

Таблица 4.7

Величины действительных и расчетных напряжений в стержнях купола загрузений 2 этапа

Порядко- вый	Данные тензометрии, полученные с помощью ТР-100		Экспериментальные значения напряжений, МПа			Теоретичес- кие значения напряжений	Ошибка, %
1	2	3	4	5		6	7
			2-2	400			
оси	z	y	z	y	z y	z y	
108	-19	-23	36	-49	-49	-49(-118)	0(58,1)
33	-15	-24	-30	-35	-37	-38	-20,8
58	-14	-18	-28	-36	-36	-38	5,6
133	-15	-18	-30	-36	-36	-38	5,6
159	-	-17		-33	-33	-38	7,8
86	-18	-22	36	-44	-44	-49(-118)	11(62,1)
положени	1	2			Макс.		
78	-41		-82		-82	-83	1,2
1	-42	37	-84	74	-84	-83	-1,2
27	-41	40	-82	80	-82	-83	1,2
165	-39	36	-78	72	-78	-83	6,0
189	-45	36	-90	72	-90	-83	8,4
			2-4	800			
оси	z	y	z	y	z y	z y	
108	-75(-25)	-79(-28)	-158	-166	-179	-97(-235)	22,3
33	-36	-38	-72	-76	-76	-76	0
58	-35	-39	-70	-78	-78	-76	2,5
133	-37	-38	-74	-76	-76	-76	0
159	-	-36	-	-72	-72	-76	5,7
86	-74(-25)	-89(-28)	-148	-178	-178	-97(-235)	24,3
положени	1	2		Макс.			
78	- 80(-41)	-	-160	-	-160	-166	3,6
1	-88(-42)	77(37)	-176	144	-176	-166	-6,7
27	-84(-41)	81(40)	-168	162	-168	-166	1,3
165	-83(-39)	79(36)	-166	158	-166	-166	0
189	-81(-45)	78(36)	-162	156	-162	-166	2,6

На них использовались в основном спаренные тензометры. Более точно напряжения в стержнях отражали строенные тензометры. Из сравнения ошибок следует, что больше всего отличаются от теоретических напряжений экспериментально определенные максимальные напряжения в стержнях, удаленных от центрального узла.

Таблица 4.8

Величины действительных и расчетных напряжений в стержнях купола
3-го этапа загрузений

Порядко- вый номер стержней	Данные тензометрии, полученные с помощью ТР-100		Экспериментальные значения напряжений, МПа			Теоретичес кие значения напряжения	Ошибка, %
1	2	3	4	5		6	7
			3-3	800-400			
оси	z	y	z	y	z y	z y	
108	-54	-63	-105	-107	-108	-92	12,1
33	-33	-32	-66	-64	-66	-66	0
58	-36	-32	-72	-64	-72	-66	5,8
133	-28	-24	-56	-48	-56	-46	21,7
159		-23	-50	-46	-50	-46	6,0
86	-55	-59	-110	-118	-118	-92(205)	12.0
Положен.	1	2			макс		
78	-82	-	-164	-	-164	-165	0,7
1	-84	77	-172	154	-172	-154	-11,6
27	-73	70	-146	140	-146	-141	0,8
165	-64	63	-128	126	-128	-126	0.9
189	-69	64	-138	128	-138	-126	-9,9

Кроме этого различия уменьшаются при увеличении уровня загрузки. Это является следствием кратковременного приложения нагрузок и включением в работу всех составляющих купола. Также в СМК в узловых элементах возможно возникновение пластических деформаций «смятия» металла болтовых соединений.

Как видно из таблиц опытной конструкции при увеличении уровня нагрузок с уровня 2 до уровня 3 на шести узлах, расхождения действительных напряжений сжатия в стойках опор от теоретических уменьшаются от 28,4 до 15,4%. Максимальные расхождения действительных напряжений и теоретических значений в центральных стержнях уменьшаются с 24, до 14.3%. В общем наблюдается совпадение экспериментальных и теоретических результатов. Максимальное расхождение результатов составляет 5...24%. Таким образом, подтверждается гипотеза об уменьшении максимальных

усилий в СМК при увеличении точности изготовления центральных узлов монтажных панелей купола.

Результаты измерений максимальных перемещений приведены на графиках рисунков 4.32 - 4.34 и в таблицах 4.9 - 4.10.

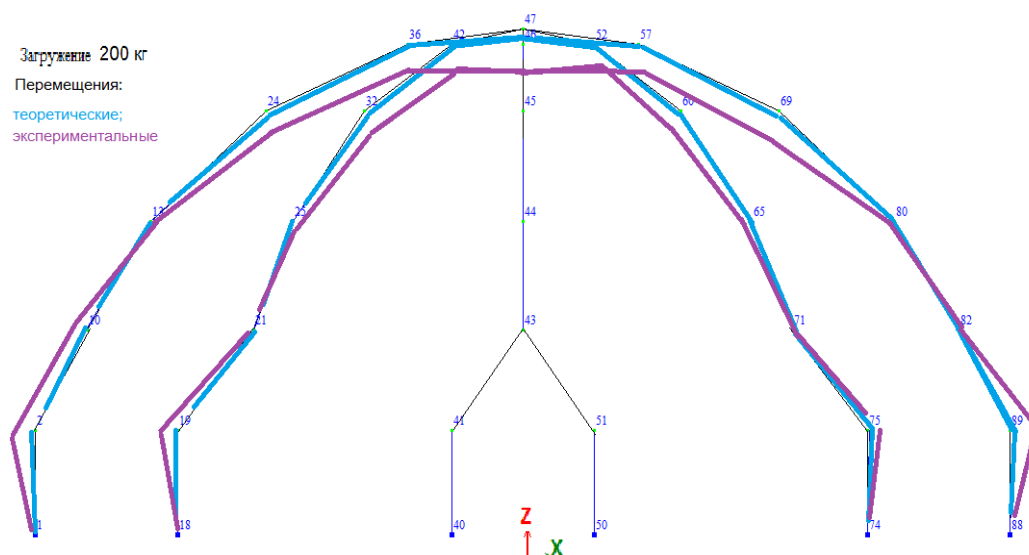


Рис. 4.32. Графики действительных и расчетных перемещения узлов и элементов модели на первом этапе, масштаб М 1/20.

Вертикальные перемещения от пластических деформаций и свободные перемещения после разгрузки третьего этапа составили максимально около 15 мм. Остаточные перемещения на первом этапе загрузки составили около 9 мм. Максимальные горизонтальные упругие перемещения верха опор зафиксированы величиной не более 4,4 мм (табл. 4.9, 4.10).

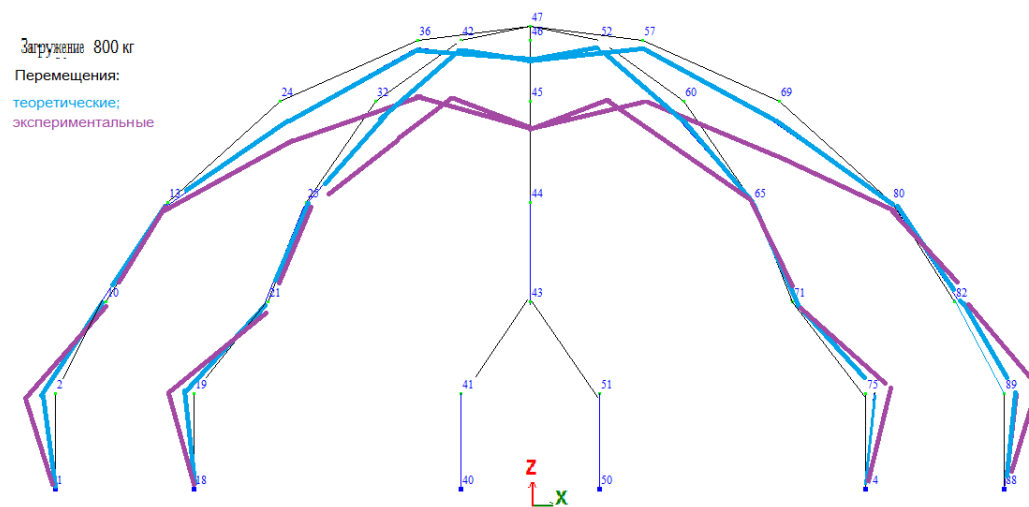


Рис. 4.33. Графики действительных и расчетных перемещения узлов и элементов модели на втором этапе, масштаб М 1/20.

По завершению 3 этапа у опор наблюдалось скалывание защитного слоя бетона на глубину до 15 мм. Суммарные вертикальные остаточные перемещения после первого этапа пригрузки-разгрузки и после второго этапа нагружений и третьего этапа асимметричной разгрузки составили 24 мм. Если учитывать только упругие деформации, то данные о действительных перемещениях уменьшатся для нагрузки 8000 Н на величину свободных перемещений за счет зазоров в узлах и пластических деформаций в болтовых соединениях СМК.

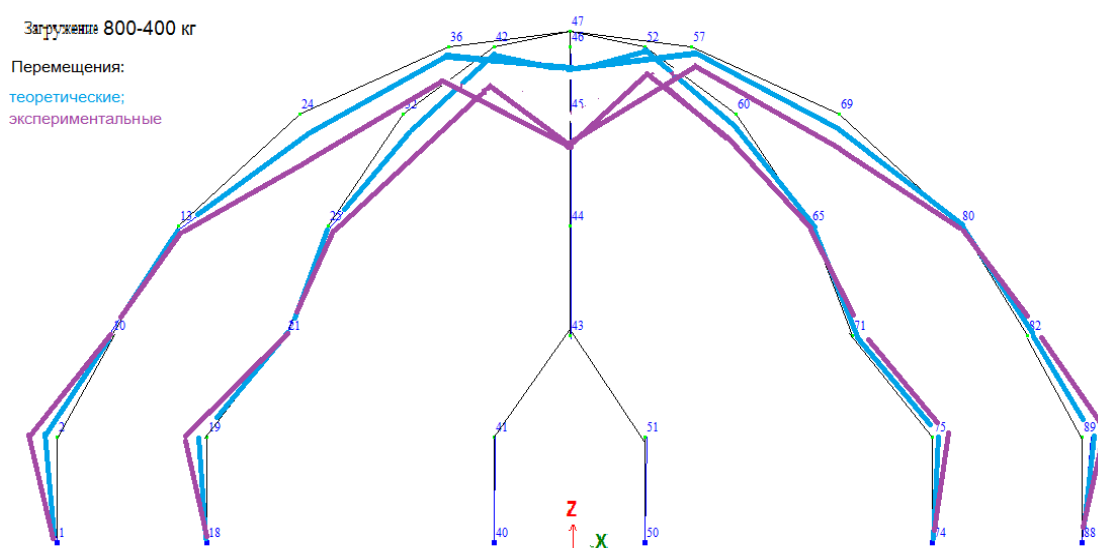


Рис. 4.34. Графики действительных и расчетных перемещения узлов и элементов модели на третьем этапе, масштаб М 1/20.

Поэтому в таблице 4.10 приведены остаточные перемещения после снятия всей нагрузки на этапах и приведены данные действительных перемещений при загрузении нагрузкой 8000 Н с учетом только упругой составляющей перемещений. Максимальная нагрузка на узел превысила критическую расчетную на 7%. После выдержки 20 мин были проведены повторные замеры продолжили испытание по третьему этапу. Нарастания перемещений за 20 мин после первых замеров не произошло. Оценка использованной методики расчета геодезических куполов по деформированной схеме проводилась на основании графиков и таблиц напряжений в стержнях и перемещений в узлах СМК.

Таблица 4.9

Общие перемещения узлов СМК

Порядков й номер узла	Экспериментальные перемещения в системе координат рис.4.20-21, мм			Теоретические перемещения с учетом геометрической нелинейности от нагрузки в системе координат, мм			Ошибка, %
	2	3	4	5	6	7	
1	х	у	z	х	у	z	
		2-2 уровень		400			
47	0	0,1	-14,8	0	0,001	-2,158	
45	0	0,5	-11,1	0	0,356	-1,168	
24	1,8	0,2	-11,7	0,338	0,110	-1,170	
32	0,5	-0,5	-11,2	0,209	-0,287	-1,170	
60	-0,3	-0,4	-11,3	-0,209	-0,287	-1,170	
69	-0,6	0,2	-11,1	-0,338	0,110	-1,170	
41	-0,1	-4,9	-	-0,022	-0,711	0,018	
2	-3,9	-2,4	-	-0,690	-0,200	0,018	
19	-2,2	3,6	-	-0,440	0,568	0,018	
75	2,4	3,5	-	0,440	0,568	0,018	
89	2,9	-1,1	-	0,690	-0,200	0,018	
		2-4 уровень		800			
47	0,1	0,2	- 19,5	0,000	0,001	- 4,315	
45	0,2	3,2	- 14,6	0,000	0,712	- 2,336	
24	3,7	0,9	- 15,3	0,677	0,221	- 2,339	
32	2,8	- 1,5	- 14,3	0,418	- 0,574	- 2,339	
60	- 2,4	- 2,7	- 13,7	- 0,418	- 0,574	- 2,339	
69	- 3,7	0,9	-15,1	- 0,677	0,221	- 2,339	
41	-	- 5,4	-	- 0,043	- 1,422	0,035	
2	- 6,3	- 1,9	-	- 1,379	- 0,399	0,035	
19	- 4,8	5,1	-	- 0,881	1,135	0,035	
75	4,1	5,5	-	0,881	1,135	0,035	
89	5,3	- 1,9	-	1,379	- 0,399	0,035	
		3-2 уровень		800-400			
47	0,2	0,3	- 18,0	0,118	0,039	- 4,040	
45	0,1	0,7	- 14,2	0,133	0,777	- 2,252	
24	1,9	0,9	- 13, 89	0,790	0,258	- 2,289	
32	1,4	- 1,1	- 14,2	0,564	- 0,549	- 2,254	
60	- 0,4	- 0,7	- 12,8	- 0,014	- 0,174	- 1,262	
69	- 0,5	0,4	- 13,2	- 0,115	0,134	- 1,262	
41	-	- 5,0	-	0,112	- 1,320	0,033	
2	- 5,2	- 1,1	-	- 1,288	- 0,356	0,034	
19	- 2,6	3,3	-	- 0,694	1,143	0,033	
75	2,2	3,1	-	0,652	0,708	0,025	
89	2,9	- 0,9	-	0,944	- 0,188	0,025	

Анализ результатов, полученных при действии статических нагрузок, показывает вполне удовлетворительное совпадение опытных и теоретических параметров, полученных с учетом деформированной схемы: для симметричной нагрузки максимальные расхождения составили по перемещениям 29%, по напряжениям – 14%; для несимметричной статической нагрузки для напряжений 5-24%.

Максимальные напряжения сжатия на стойках модели отличались в большую сторону на 2-8,4 %, перемещения превысили теоретические на 12-45%. Это вызвано увеличением расчетной длины коротких опор модели (за счет снижения верхней площадки опирания в монолитной железобетонной плите с бетоном В10), т.е. небольшим снижением их изгибной жесткости.

При расчете куполов оказалось, что недоучет податливости в узлах приводит к погрешности в определении максимальных перемещений в пределах 4...29%, напряжений –5...14%.

В целом же проведенное исследование позволило констатировать пригодность разработанной методики расчета сетчатых и геодезических куполов с различными конструктивными схемами при различных схемах загрузки. По результатам проведенных исследований разработаны рекомендации по конструированию и расчету сетчатых и геодезических куполов, в том числе, с применением древесины.

Выводы по главе 4

На основании проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Метод оценки потерь преднапряжения металлодеревянных крупномасштабных моделей и натурных геодезических куполов, разработанный на основе численного и физического экспериментов, позволяет учитывать конструктивные особенности стальных и деревянных куполов с предварительным напряжением и более точно определить возможность преднапряжения в разных условиях.

Таблица 4.10

Величины упругих перемещений узлов СМК с учётом остаточных перемещений на этапах загрузений

Порядковый номер узла	Экспериментальные перемещения, f/l мм			Теоретические перемещения от нагрузки 2 кН, f/l			Ошибка, %
	2	3	4	5	6	7	
1	х	у	z	х	у	z	-
		1-1 уровень		200			
47	0	0,1	-8,8	0	0,001	-2,158	
45	0	0,5	-6,1	0	0,356	-1,168	
24	0,2	0,2	-6,7	0,338	0,110	-1,170	
32	0,5	-0,3	-7,2	0,209	-0,287	-1,170	
60	-0,3	-0,4	-6,3	-0,209	-0,287	-1,170	
69	-0,6	0,2	-6,4	-0,338	0,110	-1,170	
41	-	-3,9	-	-0,022	-0,711	0,018	
2	-2,9	-2,4	-	-0,690	-0,200	0,018	
19	-1,2	3,6	-	-0,440	0,568	0,018	
75	1,4	3,5	-	0,440	0,568	0,018	
89	1,9	-1,1	-	0,690	-0,200	0,018	-
		3-4 уровень		0-0			
47	0,2	0,3	- 15,0				-
45	-0,1	2,7	- 12,5				
24	2,9	0,9	- 13,3				
32	1,9	- 1,1	- 12,1				
60	- 1,4	- 1,7	- 11,8				
69	- 2,5	0,4	- 12,2				
41	-	- 5,0	-				
2	- 5,0	- 1,2	-				
19	- 2,9	5,4	-				
75	2,8	4,1	-				
89	3,7	- 1,3	-				
		2-4 уровень		800			-
47	-0,1	0,1	- 4,5	0,000	0,001	- 4,315	5,4
45	0,0	0,5	- 2,1	0,000	0,712	- 2,336	5,2
24	0,8	0,4	- 2,0	0,677	0,221	- 2,339	2,5
32	0,9	- 0,4	- 2,2	0,418	- 0,574	- 2,339	3,9
60	- 1,0	- 1,0	- 1,9	- 0,418	- 0,574	- 2,339	19,6
69	- 1,2	0,5	- 2,9	- 0,677	0,221	- 2,339	8,1
41	-	- 1,4	-	- 0,043	- 1,422	0,035	3,3
2	- 1,3	- 0,7	-	- 1,379	- 0,399	0,035	10,4
19	- 1,9	1,7	-	- 0,881	1,135	0,035	26,4
75	1,3	1,4	-	0,881	1,135	0,035	24,0
89	1,6	- 0,6	-	1,379	- 0,399	0,035	29,7

Назначение преднапряжения в стержнях каркасных панелей с применением древесины березы в условиях 2-го климатического района, необходимо выполнять с применением найденных степенных зависимостей потерь преднапряжения.

2. Эксперимент по исследованию потерь преднапряжения подтвердил правильность теоретических предпосылок, положенных в основу численного эксперимента. Эксперимент позволил уточнить влияние технологии изготовления на величину начальных несовершенств при преднапряжении металлодеревянных панелей куполов. Значительно снизить неблагоприятное влияние этого фактора можно за счет предложенных в работе конструкций узлов, а также за счет более точного изготовления элементов в кондукторах. Анализ результатов усовершенствованных расчетов, выполненных с учетом результатов эксперимента, показал, что учет начальных несовершенств при расчете куполов на 10-20% снижает величину запасов предельного значения предварительного напряжения.

3. Эксперимент по исследованию местной устойчивости показал, что значительно снизить неблагоприятное влияние начальных несовершенств можно за счет применения новых конструкций узлов, а также за счет более точного изготовления укрупненных элементов панелей в кондукторах.

4. Физический эксперимент по исследованию влияния жесткости опор на горизонтальные перемещения этих опор также подтвердил правильность теоретических предпосылок, положенных в основу численного эксперимента. Эксперимент позволил оценить возможность установки купола на высокие опоры, при этом горизонтальные перемещения определяются только упругими деформациями конструкции и не превышают 6-10 мм.

5. Анализ результатов расчетов, выполненных по усовершенствованным методам показал, что учет неупругих перемещений при расчете на устойчивость на 20-30% снижает расчетную величину предельного напряжения в элементах. Учет исправлений несовершенств на стадии укрупнительной

сборки панелей позволяет увеличить величину критической нагрузки на 10-15% при расчете по деформированной схеме куполов. Уточнение при расчете жесткостей опорных стоек и эксцентриситета опор также позволяет снизить расхождения в определении горизонтальных перемещений верха этих опор.

5. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ТИПОВ СТАЛЬНЫХ И МЕТАЛЛОДЕРЕВЯННЫХ КУПОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

5.1. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СБОРНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ КУПОЛОВ

5.1.1. Предложения по выбору оптимальной схемы разрезки и геометрическому расчету геодезических куполов

В 2016 году был разработан рабочий проект универсального летнего павильона с каркасно-тентовым купольным покрытием. В плане павильон представляет собой 20-ти угольник. Максимальный пролет оболочки по главным координатным осям равен 8,10 м. Высота оболочки составляет 5,26 м.

Разрезка купола выбрана на основании разбивки 20ТАТ320 из гл. 2 с использованием конструктивно-технологических решений, запатентованных в 2012-2014 г.г. [134], а также защищенных приоритетом от 07.06.2017 №2017119827. Купольная конструкция запроектирована в 2-х вариантах из стальных прямоугольных труб сечением 40x20 (50x25) мм. По первому варианту ребра купола выполнены с узлами на сварке. По второму варианту соединения в узлах осуществляются на сварке и на болтах с помощью узловых деталей-фасонок. Сверху купольное покрытие закрывается тентом из водонепроницаемой ткани типа «Турист». Благодаря небольшой массе монтажных элементов (17-18 кг) монтаж павильона производится вручную всего за 15-17 часов, по второму варианту за 4-6 часов [29]. Общие виды купольного покрытия заданной разрезки показаны на рисунке 5.1.

Универсальное купольное покрытие может быть использовано в качестве летнего кафе, для укрытия летней торговой площадки, детских аттракционов и т.п.

Данные предложения распространяются на геодезические купола пролетом L , диаметром D (радиусом основания R) и стрелой подъема (высотой) H , имеющие пирамидальные и треугольные ячейки.

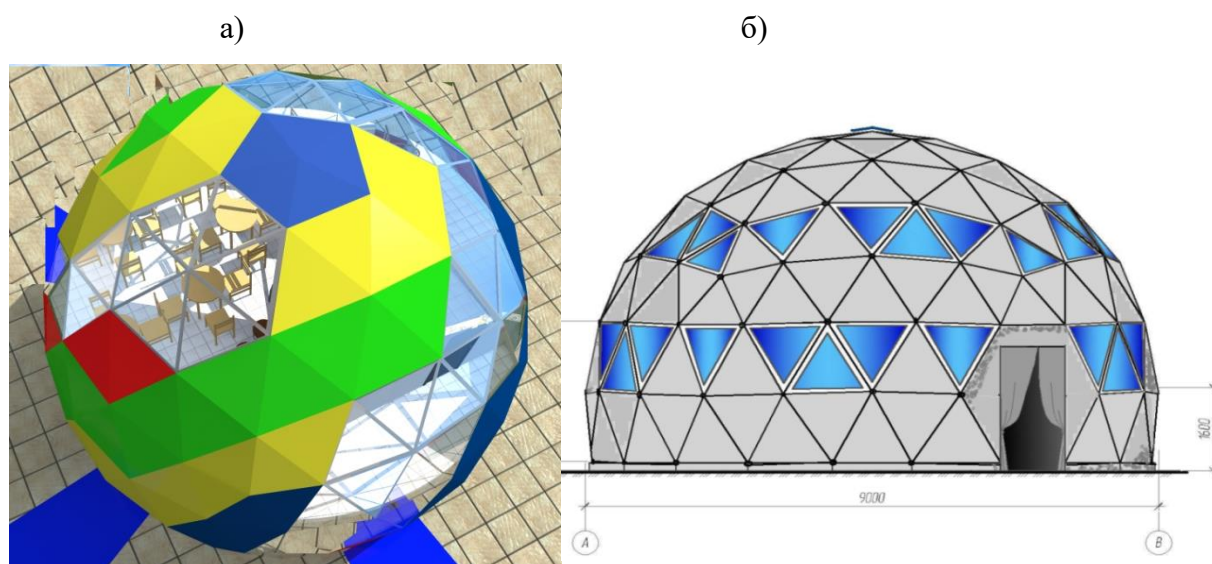


Рис. 5.1. Купольный навес(на основе 320 –гранника) с опорами на одном уровне ниже экватора: а – летнее кафе, вид сверху; б – тентовый павильон, фасад.

Выбор оптимальной схемы разрезки купола включает в себя ряд последовательных вычислений:

а) определяются значения L , D и H , при $L/H < 4$ геометрический расчет поверхности производится на основе икосаэдра без оптимизации отношения L/H

в) для выбранной многогранной поверхности определяется минимальное число типоразмеров элементов, затем панелей и узлов сопряжений.

Разрезка такого купола имеет 5 типоразмера стержней, 2 типоразмера монтажных элементов, два симметричных типоразмера опорного узла (см. рис. 5.1 б).

Сопоставление характеристик, которые имеет указанный купол с другими, показывает, что число типоразмеров стержней купола остается неизменным. Зато число монтажных элементов по сравнению с другими эффективными разрезками уменьшается в полтора раза и становится равным трем, число типоразмеров узлов уменьшается тоже в полтора раза, а опорных узлов в два раза.

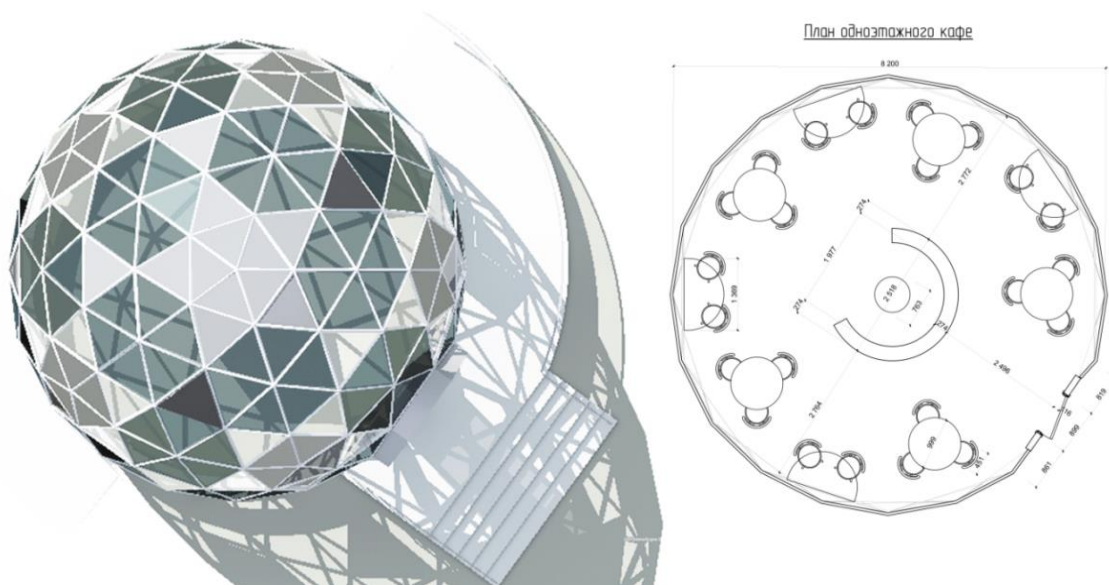


Рис. 5.2. Купольный отопливаемый павильон-кафе(на основе 320–гранника) с опорами на одном уровне ниже экватора.

Определение геометрических параметров куполов, образованных на основе икосаэдра (октаэдра или тетраэдра), производим с помощью программного комплекса Autodesk AutoCad 2015. После запуска программы необходимо перейти в режим 3D-моделирования. Геометрические построения 3D-моделирования Autodesk AutoCad 2015 реализуются затем в рабочие чертежи (рис.5.1-5.3). Так получена рабочая документация павильонов на основе 320 - гранника для диаметров 9000 мм, 8400, 8100 и 7200 мм.

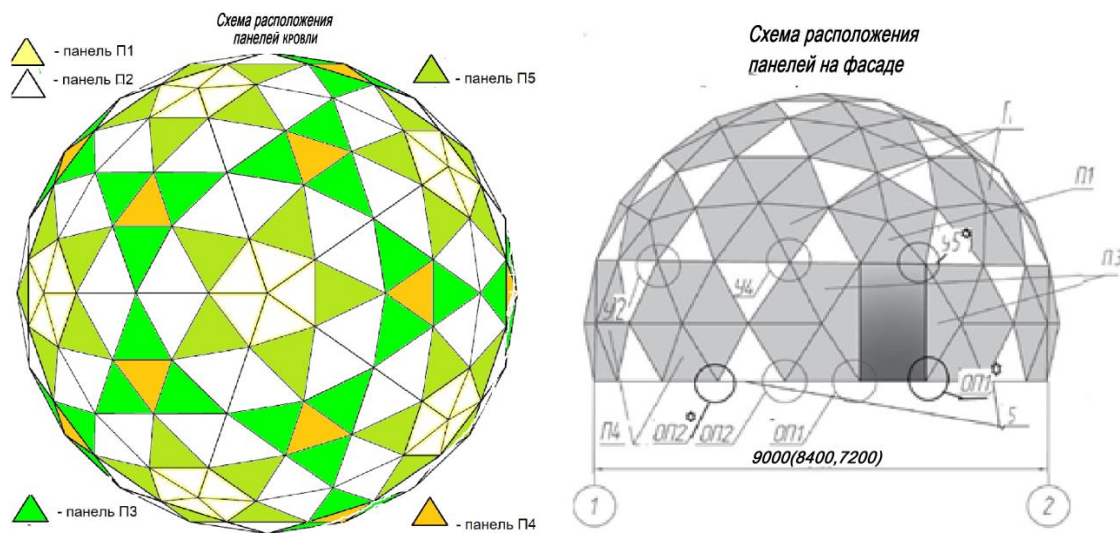


Рис. 5.3. Схемы каркаса покрытия купольного навеса-павильона на основе 320 – гранника с опорами на одном уровне ниже экватора, имеющие 5 типоразмеров стержней и 2 типоразмера монтажных несущих элементов.

Сечения стержневого купола с опиранием на одном уровне ниже экватора, конструкции пролетных узлов и опорных узлов, данные из спецификации стали для варианта пролётом 8,4 м приведены в таблице 5.1.

5.1.2 Выбор вариантов конструктивно-технологического решения геодезических куполов

Первый вариант узловых решений модели отличается исключительной простотой в изготовлении и сборке. Этот вариант использован при сборке экспериментальной модели купола и применен в куполе навеса-беседка в пригороде г. Саранска (рис. 4.19, 4.24, 4.25). Такие узлы не дают монтажной жесткости при сборке высокого купола. Это особенно важно при сборке куполов с опорами ниже экватора, поэтому для подобных куполов были разработаны и рекомендованы узлы, дающие монтажную жесткость или на сварке.

В процессе установки модели геодезического купола (рис. 4.19) был проверен также комбинированный (болтовой и на сварке) узел однопоясного купола, собираемого из монтажных панелей в виде правильных пятиугольников и шестиугольников (рис. 3.2-3.6, 5.11), который увеличивает монтажную

жесткость при сборке, и позволяет собирать быстро и надежно небольшие купола до 12 м. Подобные купола собираются из укрупненных элементов, которые в свою очередь собираются из трубчатых стержней. Из плоскости панелей предлагаемые соединения обеспечивают монтажную жесткость. Панели трех типоразмеров (один из них симметричный со входом) собираются в кондукторах. Таким образом, при монтаже собираются пять типов отправочных марок, три из которых опорные и две рядовые.

Несомненным достоинством предложенных конструктивно-технологических решений является то, что оси стержней в этих соединениях пересекаются в центре узлов, благодаря чему образуются конструкции с четкой расчетной схемой. Узлы воспринимают усилия как растяжения и сжатия, так и моменты с поперечными усилиями, поэтому необходимы развитые сечения как в рядовых соединениях, так и в монтажных. Узловые соединения данного типа позволяют несколько изменять длину стержня и исправлять угол торцевого реза при изготовлении за счет смещения в трубчатом узловом элементе (рис. 3.2 - 3.7).

Разработанные узлы обладают относительно низкой трудоемкостью изготовления (отклонения геометрических размеров элементов при изготовлении не превышают допуск (1,0-3,0 мм) и пониженной материалоемкостью при соблюдении условия равнопрочности сечений в соединительных узлах.

В сетчатых и геодезических однополосных куполах стержни каркаса незначительно отличаются по длине, имеют малый разброс расчетных усилий и поэтому могут быть запроектированы одного сечения. При сборке легкого купола-навеса не используются подъемные средства при пролетах до 12 м (рис. 5.10). При больших пролетах можно использовать реечные домкраты и т.п. грузоподъемные средства.

Предложенные решения для стальных конструкций куполов могут эффективно применяться и для соединений в узлах куполов из деревянных

элементов. Для этого рекомендуются подобные узлы, но с узловыми вклеенными в торцы деревянных стержней деталями в виде сплюснутых стальных круглых труб. В геодезических и сетчатых куполах несущие деревянные элементы также примыкают друг к другу под различными углами, поэтому в случае выполнения узловых деталей с использованием предложенных решений значительно упрощается устройство узлов и потребуется меньше типоразмеров деталей этих узлов. Разработанные узловые соединения прошли экспериментальную проверку при испытаниях крупномасштабной модели и фрагментов купольного покрытия (см. главы 3 и 4). Новизна соединений подтверждена авторским свидетельством и патентом [28,136,137].

Рассматриваемые конструкции каркасно-панельных геодезических куполов имеют высокие технико-экономические показатели. Так, например, расход тепловой энергии на отопление таких сооружений на 18-20 % меньше расхода энергии на отопление равных им по площади прямоугольных сооружений (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Покрытие для пролета 8,4 м и высоты 5,6 м	Предлагаемая структура покрытия 55м2	Купол «Алтай-тент» - 55 м2	Купол ООО «Мобильные конструкции» - 55 м2
Расход стали: каркас, кг	733	848	802
Трудоемкость: изготовления /монтажа ч/час	1782 ч/час 216 ч/час	1569 ч/час 145 ч/час	1669 ч/час 149 ч/час
Стоимость; изготовления / монтажа, руб.	294956/ 72054	278114/ 86300	279989/ 89700

Масса купола диаметром 7-9 м составляет всего 400-700 кг и, поэтому его можно перевозить в самые отдаленные районы, и монтировать вручную, с применением средств малой механизации, но без применения кранов [29]. Расход металла на квадратный метр площади для куполов диаметром 7,20 - 9,00

м составляет, соответственно, 14-11 кг.



Рис.5.11. Легкий тентовый купол-навес пролетом 6 м с узлами купола параграфа 5.3.

Все вышеперечисленные достоинства данных сооружений позволяют с успехом использовать их в качестве быстровозводимых покрытий, особенно эффективно в отдаленных районах и зонах стихийных бедствий. Дополнительная жесткость и устойчивость тентового купола в целом обеспечивается тремя симметричными пригрузами на опорах по 0,6 т каждый, либо оборудованием установленным внутри.

Предлагаемая номенклатура круглых неотапливаемых тентовых зданий диаметрами от 6 до 24 м, может использоваться в качестве складов, ангаров для стоянки сельскохозяйственной техники, ремонтно-механических мастерских, крытых токов, сортировальных пунктов, павильонов рынков и т. п. (рис.5.1-5.3, 5.4, 5.5). Эти здания позволяют сократить сроки, трудоемкость и стоимость монтажа за счет малой массы и комплектности поставляемых конструкций.

а)



б)



Рис.5.12. Тентовые купольные павильоны пролетом в парке г.о. Рузаевка с узлами варианта II с опорами одного уровня: а - стальной каркас типового навеса 8.1 м; б - тентовый купол 7,2 м.

5.1.3. Предложения по повышению надежности несущих элементов геодезических куполов.

Как правило, в геодезическом куполе наиболее короткие элементы расположены в зените купола в виде пятиугольника. Эксперимент показал, что нарастание деформаций и потеря устойчивости стержней происходит, на стыке панелей, критическую нагрузку рекомендуется определять по усредненной длине стыкуемых стержней.

Предложения распространяются на сетчатые купольные покрытия с каркасом из элементов сплошного сечения, соединяемых в узлах с помощью стальных узловых деталей на болтах.

1) Статический расчет купола следует производить по деформированной схеме (см. раздел 3.1). Продольную жесткость элементов следует вычислять с учетом эквивалентного модуля деформации или приближенно с учетом приведенного раздела. По результатам статического расчета в каждом элементе купола определяются продольное усилие N и изгибающие моменты в расчетных сечениях. Для определения критической узловой нагрузки предварительно вычисляются угол наклона стержней к касательной плоскости β (см. параграф 3.1). С учётом экспериментальных данных, угол наклона стержней к касательной плоскости в узле следует определять из соотношения $\beta = l/2 R$, где l - длина стержня купола, в качестве которой выбирается не наименьшая, а средняя длина стыкуемых стержней. Далее расчет элемента купола производится как для внецентренно-сжатого или сжато-изгибаемого элемента в соответствии с рекомендациями [105,113-115] и с учетом жесткого или шарнирного присоединения панелей по формулам [105,113-115],

2) Метод оценки потерь преднапряжения металлодеревянных сетчатых и геодезических куполов, разработанный на основе численного и физического экспериментов, позволяет учитывать конструктивные особенности стальных и деревянных куполов и более точно определить возможность преднапряжения в разных условиях.

Назначение преднапряжения в стержнях раскосов и затяжек каркасных панелей с применением древесины березы возможно с применением найденной степенной зависимости для уровня напряжений 0,6 R_{max} :

$$R - R_t = 151.2146 t^{-0.1859}, \text{ МПа),}$$

для уровня напряжений 0,4 R_{max} :

$$R - R_t = 127.132 t^{-0.1711}, \text{ МПа),}$$

в зависимости от времени службы конструкции t (где t - месяцы).

3) При конструировании узлов деревянных элементов с простым упором для преднапряженных конструкций следует избегать сопряжений с острыми углами биссектрисных врезок. Для древесины березы и дуба они не должны быть больше 45° к направлению волокон, для сосны и ели не больше 65° . Для соединения деревянных элементов со сжатием под более острыми углами следует применять стальные узловые упоры.

4) Необходимо уточнение при расчете по деформированной схеме углов поворота жестких стержней при создании преднапряжения, изменений зазоров деревянных элементов, характера защемления и жесткостей опорных стоек, что также позволяет снизить расхождения в определении горизонтальных перемещений верха этих опор и оценке общих перемещений оболочек, повысить надежность расчета местной и общую устойчивости.

5.2. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ, КОНСТРУИРОВАНИЮ, ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ВОЗВЕДЕНИЮ СЕТЧАТЫХ ОДНОПОЯСНЫХ КУПОЛОВ С КАРКАСНЫМИ ПАНЕЛЯМИ

В рамках выполнения программы развития малых городов Министерства экономического развития РФ разработаны эскизные проекты зданий в виде однопоясных куполов-оболочек с каркасными панелями.

5.2.1. Выбор вариантов схем сетчатых однопоясных куполов с каркасными панелями

Выбор перспективных разрезов сетчатых однопоясных куполов следует выполнять в зависимости от архитектурно-планировочного задания на зальное здание, руководствуясь классификацией геометрических схем, предложенной в данной работе в главе 2 и [3, 19, 134-135]. Наиболее проработанный вариант из однопоясных куполов представлен по классификации схемой ТАТ24 [3, 19, 134-137] на рисунках. 2.1, 2.6-2.7. Параметры отдельных, наиболее выгодных с конструктивно-технологической точки зрения разрезов, представлены в работе. Общий вид 1У варианта конструктивного решения сетчатого купола показан на рисунках 5.6 и 3.18, 3.23.

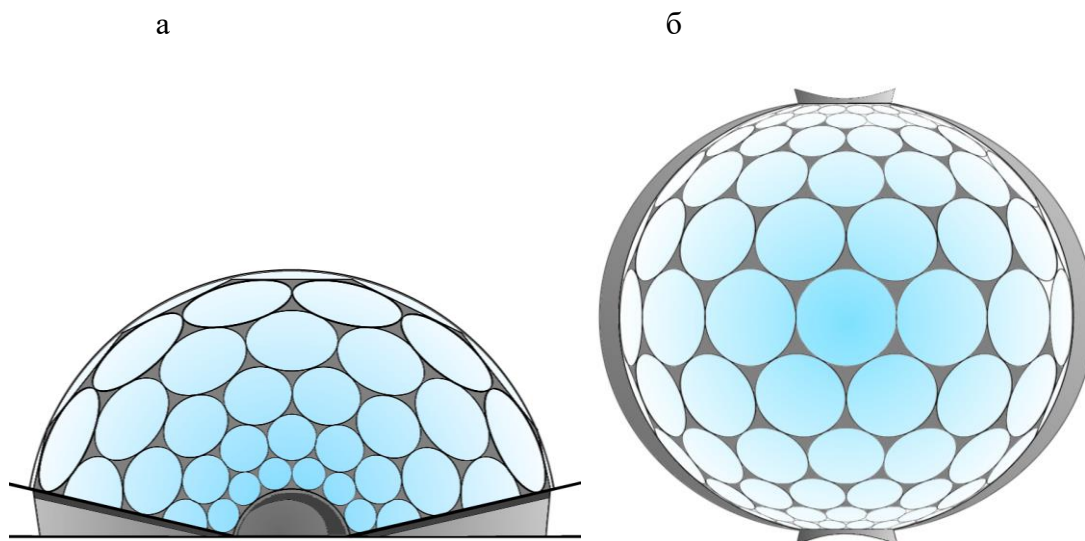


Рис. 5.6. Проект павильона пролетом 24 м в виде сборной сферической оболочки из круговых панелей с каркасом в виде шестиугольников на основе совместимых сферических сегментов 12-90-90°: а – фасад, б- вид сверху.

Рассматриваемые конструкции имеют высокие технико-экономические показатели. Так, например, расход тепловой энергии на отопление таких сооружений на 18-20 % меньше расхода энергии на отопление равных им по площади прямоугольных сооружений. Масса купола диаметром 8-18 м составляет всего 700-1600 кг и поэтому его можно перевозить в самые отдаленные районы, и монтировать вручную, с малой механизацией и без применения кранов [4,14, 29]. Расход металла на квадратный метр площади для куполов диаметром 7,20 -9,00 м составляет, соответственно, 15-19 кг.

5.2.2. Предложения по выбору вариантов конструктивно-технологического решения.

При проектировании купольных покрытий с каркасными панелями рекомендуется использовать узлы, показанные на рисунках 3.14, 3.15, которые позволяют использовать в покрытии узловую деталь одного типоразмера. При сравнительно небольших пролетах в качестве узловой детали с проушинами используется отрезок толстостенной трубы квадратного сечения (рис. 5.7). Ребра панели соединяются с узловой деталью с помощью спаренных фасоннок-накладок, которые служат для соединения ребер панелей в узлах. При увеличении пролета узловую деталь необходимо усилить ребрами жесткости. Присоединение стержней контура сборной оболочки к узлам 2 (рис.5.6) панелей происходит в таком же порядке, так как концевые детали у них используются такие же.

Соединение деревянных элементов в узлах выполняется с помощью вклеенных стальных концевых деталей [28] или на уже показанных узловых соединениях на шарнирах-болтах. В сетчатых куполах несущие элементы примыкают друг к другу под различными углами, поэтому в случае выполнения узловых деталей многоугольной формы требуется несколько типоразмеров таких деталей.

В сечении элементов каркаса возникают в основном сжимающие напряжения, а растягивающие напряжения близки к нулю. В этом случае

влияние концентраций растягивающих напряжений весьма мало, что повышает надежность работы элемента. Отклонения фактических продольных и угловых размеров элементов оболочек от проектных должны быть минимальными, поэтому изготовление элементов и укрупнение в монтажные панели рекомендуется производить в специальных кондукторах.

При монтаже сборного покрытия способом «подъема с поворотом конструкции в целом» [29] могут использоваться также реечные домкраты для пролетов до 12 м. При больших пролетах можно использовать гидравлические домкраты, которые либо имеют эксцентриситет опирания, либо устанавливаются наклонно.

Основные особенности применения сборных панельных оболочек с сетчатой разрезкой связаны с преднапряженными конструкциями:

1) Сетчатые оболочки по классификации ТАТ24 и составные оболочки из панелей в виде правильных шестиугольников эффективны для соотношений стрелы подъема к пролету от $1/2$ до $1/4$. Поскольку у них имеется возможность блокировки для покрытий большой длины, то рациональное применение их - для зданий с двумя противоположащими проемами любого размера.

2) При возведении оболочки из преднапряженных панелей следует учитывать влияние несовершенств на местное преднапряжение панелей. Неплоскостность панелей при сборке в кондукторах также, как и прочие отклонения линейных размеров должны быть менее 1-3 мм. Поскольку жесткость развитых преднапряженных панелей выше, чем прочих, то величины отклонений необходимо замерить и учесть в расчете по деформированной схеме.

3) При расчете по деформированной схеме деревянных каркасных панелей с односторонними связями необходима также оценка углов поворота жестких стержней при создании преднапряжения, изменений зазоров деревянных элементов, характера защемления и жесткостей опорных стоек, что позволит снизить расхождения в определении горизонтальных

перемещений верха этих опор и оценке общих перемещений оболочек, повысить надежность расчета местной и общей устойчивости.

4) Для уменьшения отклонения фактических продольных и угловых размеров элементов оболочек от проектных размеров, изготовление элементов и укрупнение в монтажные панели, а также преднапряжение, рекомендуется производить в специальных кондукторах.

5.3. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ И КОНСТРУИРОВАНИЮ СЕТЧАТЫХ ДВУХПОЯСНЫХ КАРКАСНЫХ КУПОЛОВ.

В 2016 году был разработан рабочий проект купольного покрытия [136] для зданий многоцелевого назначения (см. акт прилож.1). В дальнейшем этот проект будет использован при проектировании и изготовлении быстровозводимого покрытия цирка «Шапито» (рис. 3.24, 3.27). Диаметр купола — 42 м, пролет 34,6 м; высота 16,4 м, полезная площадь 802 м². Это здание (рис. 5.7, 5.8) имеет по сравнению с применяемым мобильным тентовым неотапливаемым куполом пролетом 35 м (проекты компаний «Камтент – Екатеринбург» и "Челябинский завод театрального оборудования") большую массу, трудоемкость изготовления и монтажа, но меньшую стоимость, из-за применения более дешёвого и самонесущего тента.



Рис. 5.7. Вид купола.

Здание запроектировано без фундамента для площадок с бетонным или асфальтобетонным покрытием, каркасного типа, из конструкций полной

последующем использовать для транспортировки купола и последующей сборки уже из отдельных ферм и в соответствии с опробированной раскладкой элементов и панелей.

Рассматриваемые конструкции имеют высокие технико-экономические показатели. Масса первого купола пролетом 35-36 м составляет 35000-39700 кг и, поэтому его можно перевозить в самые отдаленные районы, и монтировать вручную с применением легких кранов [4, 29]. Масса второго купола пролетом 32 м соответственно 18000 кг и монтируется он только вручную и с применением домкратов

Расход металла в покрытии на квадратный метр площади для куполов диаметром 35-36 м составляет, соответственно, 34-42 кг, для 32 м - 26.4 кг. Все вышеперечисленные достоинства данных сооружений позволяют с успехом использовать их в качестве быстровозводимых покрытий, особенно эффективно в отдаленных районах и зонах стихийных бедствий.

Применение вариантов конструктивно-технологического решения купола

Купол собирается из укрупненных элементов, которые в свою очередь собираются из ферм (рис. 3.14, 3.24, 5.7, 5.8). Наибольшие трудности вызваны необходимостью максимального снижения веса деталей, предназначенных для ручной сборки.

В сетчатых и геодезических однополосных куполах стержни каркаса незначительно отличаются по длине, имеют малый разброс расчетных усилий и, поэтому элементы ферм могут быть запроектированы одного сечения.

При назначении размеров отдельных сжато-изгибаемых элементов купола следует придерживаться оптимальных значений параметров сечений. При проектировании куполов предлагаемых схем с применением цельной древесины, соединение деревянных элементов в узлах выполняется с помощью вклеенных стальных узловых деталей [28, 136]. В сетчатых куполах несущие элементы примыкают друг к другу под различными углами, поэтому в случае

выполнения узловых деталей многоугольной формы требуется несколько типоразмеров таких деталей. При проектировании купольного покрытия рекомендуется использовать узлы, показанные на рис. 3.27-3.33, которые позволяют использовать в покрытии узловую деталь одного типоразмера [136].

Ребра соединяются с узловой деталью с помощью фасонных шайб, накладок и приваренных к ним шпилькам. При увеличении пролета опорную узловую деталь ферм необходимо усилить ребрами жесткости. Отклонения фактических продольных и угловых размеров деревянных элементов от проектных должны быть минимальными, поэтому изготовление элементов рекомендуется производить в специальных кондукторах.

Опорные конструкции запроектированы в виде развитых конструкций (рис. 3.32, 3.33) с учетом опирания на уплотненный грунт. Размеры проанализированы и определены расчетами в параграфе 3.3.

Основные особенности применения сборных панельных оболочек с двухпоясной сетчатой разрезкой связаны с увеличенной жесткостью и статической неопределимостью конструкций:

1) Сетчатые оболочки по классификации ТА60ПС, ТА120ПС и составные оболочки из панелей в виде правильных шестиугольников эффективны для соотношений стрелы подъема к пролету от 0,35 до 0,20. Однако это могут быть и высокие купола-оболочки. Поскольку у них имеется возможность организации трех или шести симметричных проёмов, то рациональное применение этих оболочек - для зданий с зальным помещениями пролетами от 20-35 м до 150-250 м с двумя-шестью притиволежащими проемами до половины высоты куполов.

2) При монтаже из двухпоясных панелей следует учитывать значительное влияние несовершенств на НДС оболочки и панелей. Неплоскостность двухпоясных панелей при сборке в кондукторах также, как и прочие линейные размеры должны составлять 1-3 мм. Поскольку жесткость развитых двухпоясных панелей выше, чем жесткость однопоясных систем, то величины

отклонений необходимо максимально нивелировать при изготовлении и возведении оболочек и учесть их в расчете по деформированной схеме.

3) При расчете по деформированной схеме двухпоясных деревянных каркасных панелей с односторонними связями необходима также оценка углов поворота жестких стержней при создании преднапряжения, изменений зазоров деревянных элементов, характера защемления и жесткостей опорных стоек, что позволит снизить расхождения в определении горизонтальных перемещений верха этих опор и оценке общих перемещений оболочек, повысить надежность расчета местной и общей устойчивости.

4) Для уменьшения отклонения фактических продольных и угловых размеров элементов оболочек от проектных, изготовление элементов и укрупнение в двухпоясные монтажные панели рекомендуется производить теми же мероприятиями что и при изготовлении предыдущих конструкций в параграфах 5.1 и 5.2. Так как предложенная конструкция сборно-разборная, то возможно применить полную сборку купола-оболочки с последовательной разборкой и исправлением несовершенств.

5.4. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ СОСТАВНЫХ СЕТЧАТЫХ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ

5.4.1 Выбор параметров модулей и технологического решения составных сетчатых структурных покрытий

Для конструирования несущего каркаса с составной сферической структурой из типовых блоков были вначале выбраны схемы разрезов структурного модуля покрытия, которые можно применить при формировании верхнего и нижнего поясов [4, 16]. Для верхнего пояса наиболее выгодной, исходя из критерия минимума типоразмеров, принята схема, приведенная в патенте [136, 137], по классификации данной работы как ТА60 или, так называемая схема «Транеран». Для нижнего пояса выбрана выровненная по контуру правильного шестиугольника схема опорной сети сектора с углом раствора 60 градусов. Эта опорная треугольная сеть с меньшими искажениями,

чем другие, образует в плане правильный шестиугольник. Разработаны не только схема модуля, но также набор стыковочных и доборных элементов для формирования составного покрытия (рис. 3.49). Для принятия обоснованных конструктивно-технологических решений определена оптимальная геометрия в целом модуля, затем оптимизированы отдельные его геометрические, технические и эксплуатационные параметры, далее был проведен анализ и разработка специфических узловых соединений.

Разработанная и предлагаемая конструкция составного покрытия представляет собой сборную стержневую структуру, установленную на опорах и выполненную в виде [16, 137] трех шестиугольных в плане двухсетчатых оболочек (рис. 3.49, 5.8-5.10). Строительный подъем двухсетчатые оболочки образуется за счет сферической поверхности структуры, которая использована при формировании покрытия.

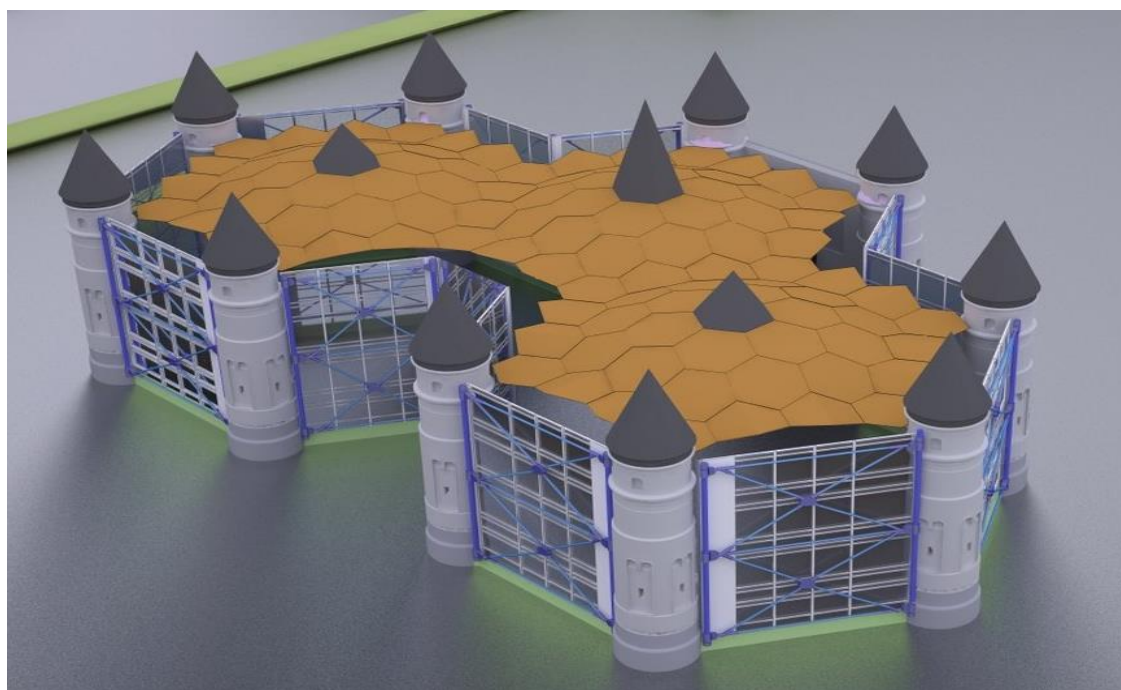


Рис.5.8. Вид павильона с составной сферической структурой в покрытии.

При этом контурные стержни и узловые элементы нижнего пояса в виде треугольной сетчатой оболочки существующих разрезов смещены так, что только проекции контурных стержней и узлов образуют правильный

Рис. 5.9. Схема модульного покрытия: а – схема внешних стоек, связей и покрытия; б – вид сбоку; в - план опор структурных модулей.

Верхний пояс имеет стыковочные горизонтальные стержни, симметричные относительно проекций контурных стержней, стыковочные и контурные узлы поясов развернуты для их соединения с соседними блоками или концевыми стержнями модуля.

Предлагаемый модуль имеет лишнее число стержней на нижнем поясе, но требует дополнительного внешнего раскрепления. из-за недостатка их в верхнем поясе. Так для преодоления изменчивости угловых и контурных элементов установлены связи в виде раскреплений сквозной системы по внешним углам покрытия. в вертикальной и горизонтальной плоскостях связями. Кроме этого, составные модули имеют повышенную деформативность контура в горизонтальном направлении по сравнению с обычными структурами и куполами (рис. 5.9) и, поэтому постановка связей по углам покрытия устраняет этот недостаток.

Монтажная сборка из укрупнённых элементов структурного покрытия состоит в соединении двух основных монтажных элементов: неполных панелей верхнего пояса и решетки и элементов нижнего пояса. Далее, выполняется установка опорных стоек покрытия и доборных стыковочных стержней и прогонов. Монтаж составного блока сборного структурного покрытия производится установкой его в проектное положение с инвентарных передвижных лесов с грузоподъемными устройствами малой грузоподъемности.

Перемещение лесов осуществляется вокруг центральных лесов каждого модуля по схеме, показанной на рисунке 5.10. Устанавливаются леса 31-38 и производится сборка одного сектора, начиная от опор 39 к центру 36, после сборки первого сектора леса смещаются по часовой или против часовой стрелки вокруг центрального элемента, леса у центра не переставляются для всех шести секторов, стальные переставляются по мере сборки и обеспечения жесткости структуры. Стыковочные, контурные элементы устанавливаются сразу, либо по завершению сборки основных и контурных элементов и узлов.

Затем собираются прогоны, рядовые стойки и опорные стойки, также устанавливаются в той же последовательности, но по завершению сборки основных несущих элементов и узлов.

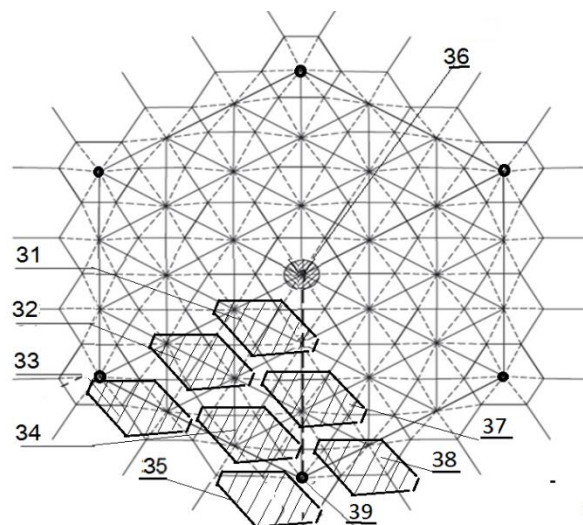


Рис.5.10. Монтаж с лесов вариантов 1-III узловых соединений структур.

При выполнении узлов на сварке структурного покрытия его собирают из укрупненных элементов нижнего пояса, затем завершают сборку структуры из укрупненных элементов решетки и элементов верхнего пояса. Сначала производят сборку монтажных элементов одного сектора, а в других секторах собирают конструкцию после смещения и поворота лесов вокруг центра. За два раза поворота вокруг центра и смещений лесов монтаж проводят при поэлементной сборке. Нижние обоймы из цилиндрических (вместо полусфер) узловых элементов могут служить сборочными кондукторами стержней и обоймами для ванной сварки сплюснутых торцов основных трубчатых стержней. Прорези в обоймах выполняются по месту или в 3D-технологии. В качестве ограждающих конструкций стен и кровли используются складчатые панели из стали толщиной 0,7-0,8 мм, прикрепляемые к каркасу с помощью кляммер и самонарезных винтов, и соединяемые между собой фальцами.

Рассматриваемые конструкции имеют высокие технико-экономические показатели. Так, например, расход тепловой энергии на отопление таких сооружений на 12-15 % меньше расхода энергии на отопление равных им по площади прямоугольных сооружений.

Таблица 5.2

Покрытие и каркас для пролета 18 м	Предлагаемая структура покрытия 900м ²	Структура «Кисловодск» - 900 м,2	Структура «Мархи» - 900 м ²
Расход стали: покрытие/ каркас, кг	14966 12308	15897 14891	15495 14455
Трудоемкость: изготовления /монтажа ч/час	3782 ч/час/ 616 ч/час	3569 ч/час/ 545 ч/час	3669 ч/час/ 549 ч/час
Стоимость: изготовления / монтажа руб.	2949560/ 720540	2781140/ 863000	2799890/ 897000

Масса каркаса с составным структурным покрытием из 3-х модулей пролетом 18 м составляет 61700 кг и, поэтому его можно перевозить в самые отдаленные районы и монтировать с применением легких кранов [16,28]. Расход металла покрытия и каркаса стен, приведенный на квадратный метр здания с полезной площадью 873,9 м², составляет 31,21 кг/м²., расход стали показан в таблице 5.2.

Все вышеперечисленные достоинства данных сооружений позволяют с успехом использовать их в качестве быстровозводимых покрытий, что особенно эффективно в отдаленных районах.

Основные особенности применения сборных структурных оболочек из составных модулей связаны с увеличенной жесткостью и внутренней статической неопределимостью покрытия, и разреженными опорами каркаса:

1) Составные структурные оболочки по классификации ТА60ПСП из отдельных элементов, каркасных панелей или объемных блоков в виде шестиугольных пирамид эффективны для соотношений стрелы подъема к пролету от 0,25 до 0,10. Это связано с решениями контурных и стыковых элементов, а также с искажениями опорной сети при формировании правильного шестиугольника опорного контура. Поскольку у них имеется возможность организации сквозных проездов, проёмов и непрерывных прозрачных вертикальных ограждений, то рационально применение этих

оболочек для зданий с многозальными помещениями пролетами от 18 – 48 м с произвольной блокировкой модулей.

2) При монтаже сферических структур и, особенно, при монтаже из укрупненных элементов, следует учитывать значительное влияние несовершенств на НДС оболочек и укрупнённые монтажные элементы. Поскольку жесткость развитых структур выше, чем жесткость однопоясных систем, то величины отклонений также необходимо максимально нивелировать при изготовлении и возведении оболочек и учесть в расчете по деформированной схеме. Необходимо обратить внимание на повышенные горизонтальные перемещения элементов каркаса структурных модулей и обеспечить жесткость контурных элементов и опорных стоек.

4) Предложенная составная структура - сборно-разборная, и для неё также как для предыдущих конструкций возможно применить полную сборку купола-оболочки с последовательной разборкой, пересортировкой элементов и завершающим исправлением несовершенств.

5.4.2 Выбор варианта узловых соединений составных сетчатых структурных покрытий

В процессе проектирования структуры разработаны болтовые узлы для соединения стержней двухпоясного сферического покрытия [16, 136, 137], собираемого из отдельных стержней или монтажных неполных шестиугольников (варианты I и II, рис. 3.50, 5.9). Составные модули структурного покрытия собираются из укрупненных элементов, которые в свою очередь собираются из стальных (1-III варианты, рис. 3.50-3.56) узловых элементов или цилиндрических цельнодеревянных стержней со вклеенными стальными узловыми элементами [16, 28, 108, 136, 137].

Предложенные решения торцов стальных трубчатых стержней позволяют присоединять их под углами 50-72 градуса, а также позволяют реализовать способ монтажа [136,137] из неполных каркасных шестиугольных панелей, что уменьшает вес монтажных панелей, в отличие, от существующих панелей

куполов. Узловые соединения, этого типа позволяют также несколько изменять длину стержня при изготовлении за счет изменения размеров муфт, нивелируя неточности изготовления.

В целом, все варианты узлов обладают относительно низкой трудоемкостью изготовления (отклонения геометрических размеров элементов при изготовлении также не должны превышать допуск (1,0-3,0 мм) и пониженной материалоемкостью при соблюдении условия равнопрочности сечений в соединительных узлах. Оси стержней всех трёх вариантов пересекаются в центре узлов, благодаря чему образуются конструкции с четкой расчетной схемой. Узлы воспринимают усилия как растяжения и сжатия, так и моменты с поперечными усилиями, поэтому нет надобности в большем развитии сечений, как в рядовых соединениях, так и в монтажных.

В структурных покрытиях стержни каркаса незначительно отличаются по длине, имеют малый разброс расчетных усилий, поэтому элементы верхнего пояса могут быть запроектированы одного сечения, а элементы нижнего другого, раскосы - третьего.

Опорный контур модуля этой сборной оболочки выполняется в виде отдельных опор с одной отметкой (рис. 5.10 и 3.60), составляет в плане правильный шестиугольник. При учете влияния опор ограждения, особенно угловых опор, перемещения контурных узлов становятся больше на 30-40% опорных. Главное то, что эти расчетные горизонтальные перемещения не превышают 8-10 мм.

Выводы по главе 5:

1. Приведено обобщение и внедрение в практику строительства результатов выполненных исследований, а также созданы научные предпосылки для развития нового направления по совершенствованию сборных сферических оболочек покрытий зданий и сооружений..

2. Разработаны рекомендации по совершенствованию методов расчета и применению конструктивно-технологических решений сборных сферических

куполов из дерева и стали, позволяющих назначить оптимальные параметры покрытий, более точно оценить напряженно-деформированное состояние предложенных конструкций, уменьшить трудоемкость проектирования, изготовления и монтажа новых конструкций куполов.

3. Разработанные и исследованные сборные купола-оболочки и структуры с применением предложенных эффективных разрезов могут применяться для покрытий зданий различного назначения. По сравнению с существующими, эти конструкции имеют максимум однотипных монтажных элементов, возможности укрупнительной сборки и максимум эстетического качества при минимуме сборных деталей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований получены следующие результаты и сделаны соответствующее заключение:

1. Разработаны перспективные конструкции с эффективными технологиями изготовления и возведения на основе вновь созданных перспективных разрезов сборных сферических оболочек, сетчатых или образуемых из каркасных панелей, а также в виде несущих каркасов павильонов из составных структурных модулей.

2. Разработаны новые эффективные схемы разбивки поверхностей сферических оболочек и геодезических куполов, разработана их классификация, а также выполнено обобщение и систематизация геометрических закономерностей конструктивно-технологического формирования сферических оболочек.

3. Определены оптимальные параметры геометрических одноуровневых, двухъярусных и двухуровневых треугольных сетей, образующих конструктивно-технологическую основу купольного покрытия в виде плоских или пирамидальных панелей, обеспечивающие эффективные решения несущих конструкций.

4. В результате численного эксперимента и конструктивно-технологических исследований покрытий получены оптимальные параметры для каркасных куполов из стали, а также из цельной и клееной древесины. В качестве критерия оптимальности для систем был принят минимум типов ребер сферической оболочки, что значительно упрощает и снижает трудоёмкость процесса проектирования купольных покрытий. Оптимизация геометрических параметров разрезов сферических куполов-оболочек, позволяет уменьшить до 40% количество типоразмеров сборных элементов.

5. Разработана комплексная методика экспериментальных и теоретических исследований куполов-оболочек из дерева и стали, позволяющая выявить необходимые закономерности и определить влияние отдельных факторов и их сочетаний на прочность, устойчивость и деформативность, как отдельных элементов

покрытий, так и сборных оболочек в целом.

6. Экспериментальные исследования позволили уточнить влияние начальных несовершенств на технологию предварительного напряжения металлодеревянных панелей куполов-оболочек, значительно снизить неблагоприятное влияние этого фактора можно за счет применения новых конструкций узлов, а также за счет более точного изготовления элементов в кондукторах. Метод оценки потерь преднапряжения металлодеревянных крупномасштабных моделей и натурных геодезических куполов-оболочек, разработанный на основе численного и физического экспериментов, позволяет учитывать конструктивные особенности стальных и деревянных куполов-оболочек и более точно определить возможности преднапряжения при различных климатических условиях.

7. Разработанные методики расчета сборных сферических куполов-оболочек на местную устойчивость позволяют учитывать конструктивные особенности куполов-оболочек и более точно определять критическую нагрузку с учетом совокупного влияния нелинейных зависимостей:

а) Численный эксперимент по исследованию местной устойчивости сборных сферических куполов-оболочек с учетом нелинейностей, позволил определить степень влияния различных факторов на величину критической нагрузки. Наибольшее влияние, при этом, оказывает жесткость сопряжения элементов купола, а также физическая нелинейность материала, податливость в узлах, характер приложения нагрузки;

б) Физический эксперимент по исследованию местной устойчивости куполов-оболочек подтвердил правильность теоретических предпосылок, положенных в основу численного эксперимента. Он позволил уточнить влияние начальных несовершенств на величину критической нагрузки. Также было исследовано влияние жесткости опор на их горизонтальные перемещения, что позволило оценить возможность установки купола на высокие опоры.

8. Разработанные рекомендации по совершенствованию методов расчета и конструктивно-технологические решения сборных сферических куполов-оболочек из дерева и стали позволяют назначать оптимальные параметры покрытий, более точно оценить напряженно-деформированное состояние предложенных конструкций,

уменьшают трудоемкость проектирования, изготовления и монтажа сферических оболочек на 15 — 30%.

9. Внедрены в практику проектирования и строительства результаты выполненных исследований, а также созданы научные предпосылки для развития нового направления по совершенствованию покрытий зданий и сооружений в виде сферических оболочек.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алпатов В.Ю., Холопов И.С. Оптимизация геометрической формы пространственно-стержневых конструкций // Металлические конструкции. 2009. – № 1. – Т. 15. – С. 47-57.
2. Алексеевский Д. В., Винберг Э.Б., Солодовников А.С. Геометрия пространств постоянной кривизны//Итоги науки и техники. Современные проблемы математики.// Фундаментальные направления.- М.: ВИНТИ, – Т. 29. – С. 1-146.
3. Антошкин В.Д. Конструкционно-технологическое формообразование оболочек отрицательной гауссовой кривизны из сборных плоских шестиугольных и треугольных панелей // Вестник ТГАСУ. 2017 – №4.– С.93-100.
4. Антошкин В. Д. Эффективные конструктивно-технологические решения сборных сферических куполов// Региональная архитектура и строительство. 2015. – № 3 (24). – С. 112-121.
5. Антошкин В. Д., Гудожников С. С., Перфильева О. И., Ерофеева И. В. Перспективные конструктивно-технологические решения сборных сферических оболочек/ В сборнике: Актуальные вопросы архитектуры и строительства // Материалы Тринадцатой Международной научно-технической конференции: в 2 частях/ 2014. – С. 4-15.
6. Антошкин В.Д., Гудожников С.С., Ерофеева И.В. Задача оптимизации треугольной геометрической сети на сфере В сборнике: Актуальные вопросы архитектуры и строительства /Материалы тринадцатой международной научно-технической конференции. 2014. – С. 124-130.
7. Антошкин В.Д., Гудожников С.С., Перфильева О.И., Нежданов Р.С. Варианты конструктивно-технологических решений сферических оболочек/ В сборнике: Актуальные вопросы архитектуры и строительства XII Международная научно-практическая конференция: материалы 9 конференции. ответственный редактор: В. Т. Ерофеев. 2013. – С. 12-18.

8. Антошкин В. Д. К вопросу оптимизации треугольной геометрической сети на сфере //В сб.: Актуальные вопросы архитектуры и строительства XII Международная научно-практическая конференция: материалы конференции. ответственный редактор: В. Т. Ерофеев. 2013. – С. 21-27.

9. Антошкин В. Д., Гудожников С. С., Кожельцов В.И., Перфильева О.И. Анализ формообразования сферических куполов. В сб.: Актуальные вопросы архитектуры и строительства XII Международная научно-практическая конференция: материалы конференции. ответственный редактор: В. Т. Ерофеев. 2013. – С. 4-11.

10. Антошкин В. Д., Никонов В. И. К вопросу оптимизации треугольной геометрической сети на сфере// Фундаментальные исследования. 2014. № 11-8. С. 1669-1673.

11. Антошкин В. Д., Коновалов А. Г. Сборные сферические оболочки из шестиугольных панелей// Огарёв-Online. 2015. – № 13 (54). – С.1-6.

12. Антошкин В. Д., Антошкин В. Д. Испытание стальной модели геодезического купола В сборнике: Актуальные вопросы архитектуры и строительства// Материалы XV Международной научно-технической конференции: в 2 частях/ 2017. – С. 61-69.

13. Антошкин В.Д., Коновалов А.Г. Листинг построения сетчатого купола с помощью программного комплекса Autodesk Autocad 2015/Огарёв-Online. 2016. – № 5 (70). – С. 4

14. Антошкин В. Д., Коновалов А.Г. Сборные сферические оболочки из шестиугольных панелей/ Огарёв-Online. –2015. – № 13 (54). – С.6.

15. Антошкин В. Д. Разработка и исследование предварительно-напряженных многошарнирных деревянных арок с системой затяжек: автореф. дис... кан. техн. наук / Моск. гос. ун-т путей сообщ. – М., 1987. — 33 с.

16. Антошкин В. Д. Исследование расчетных моделей несущего каркаса с составным сферическим структурным покрытием./Academia. Архитектура и строительство. 2017. – №1. – С.133-138.
17. Антошкин В. Д. К вопросу оптимизации геометрической сети на сфере//В сборнике: Актуальные вопросы архитектуры и строительства XII Международная научно-практическая конференция: материалы конференции. ответственный редактор: В. Т. Ерофеев. 2013. – С. 19-20.
18. Антошкин В. Д. К задаче формирования треугольной сети на сфере с узлами на одном уровне// International journal for computational civil and structural engineering 2017 Т.13.№2 – С.154-160.
19. Антошкин В. Д. Конструкционно-технологическое формообразование оболочек из сборных плоских шестиугольных и треугольных панелей, размещенных в повторяющихся секторах сфер / Строительство и реконструкция. 2017. – №3 - С. 201-207
20. Алексеев Е. Р., Чеснокова О. В. Введение в Octave для инженеров и математиков: М.: ALT Linux, 2012. – 368 с.
21. Арленинов Д. К. О расчете деревянных конструкций по деформированной схеме/ Д.К. Арленинов// Промышленное и гражданское строительство. - 2016. - №1. – С. 43-46.
22. А.с. 2100539 СССР). Шарообразная пространственная конструкция ./С. Л. Канакин. Оpubл. в Б.И., 1988, №7.
23. А.с. 594271 (СССР). Сетчатый купол /В.А. Савельев. – Оpubл. в Б.И., 1978, №7.
24. А.с. 1548376 (СССР). Сферический купол/ Б. В. Миряев. – Оpubл. в Б.И.,1990, № 9.
25. А.с. 968232 (СССР). Элемент сферического купола/ Б.В. Миряев. — Оpubл. В Б.И., 1982, №39.
26. А.с. №1652481 (СССР) Стыковое соединение стержней / Миряев Б.В. – Оpubл. в Б. И. 1991, №20.
27. А.с. 87940 (СССР) Щитовой деревянный купол /М.С.Туполев. -

Опубл. 14 октября 1949 г.

28. А.с. №1661316 (СССР) Стыковое соединение деревянных элементов/Антошкин В. Д., Курганский В. Г. опубл. 09.11.1988.
29. А.с. №1174546 (СССР) Способ монтажа криволинейной конструкции/Антошкин В. Д., Курбаков Г. В., Бочкин В. С., Аладышев В. В. опубл. 10.05.1983.
30. А.с. №876894 (СССР) Предварительно напряженный строительный элемент/Толмачев И. Н., Иванов-дятлов А. И., Антошкин В. Д. опубл. 03.01.1980.
31. А.с. №1321794 (СССР). Сборный сферический купол. Б. Г. Мухин, А.С. Гвамичава, О. Н.Царапкин и Г. Г.Зедгинидзе.
32. Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е. К. Ашкенази. – М. : Лесная промышленность, 1978. – 222 с.
33. Баранова Т.И., Миряев Б.В., Толушов С.А. Исследование напряжённно-деформированного состояния сжато-изгибаемых элементов сетчатых деревянных куполов. (Монография). вып. 1, 2003, ПГАСА– 95 с.
34. Барашков Ю. А. Клеевые деревянные конструкции в сетчатых куполах // Изв. вузов. Лесной журнал, 1975.- № 3. – С.90-92.
35. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. - М.: Наука, 1986. – 544 с.
36. Бубнов, Ю. Н. Архитектурное проектирование сетчатых оболочек / Ю. Н. Бубнов [и др.] // Архитектура СССР. – 1980. – № 10. – С. 11-17.
37. Берк К., Кэйри П. Анализ данных с помощью Microsoft Excel: Пер. с англ. – М.: Издательский дом Вильямс, 2005, – 560 с
38. Валуйских В. П. К оценки влияния конструктивного исполнения узлов сферических каркасов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1984. – №2. – С. 11-15.
39. Веселев Ю. А., Журавлев А. А., Штенкер Х. Расчет многогранных куполов по безмоментной теории // Изв. вузов. Строительство, 1984. – № 6.

– С. 25-29.

40. Ведяков И. И. Перспективы совершенствования норм проектирования деревянных конструкций / И.И. Ведяков, А.А. Погорельцев, К.П. Пятикрестовский// Промышленное и гражданское строительство. - 2015. – № 4. – С. 28-32.

41. Володин Н. М. Статический расчет конструкций зданий с учетом податливости связей// Учебное пособие по дипломному проектированию/. - Пенза, ПГАСА, 1983.- 105 с.

42. Гайдаров Ю.В., Зотова Н. Г., Козьмина В. К. К выбору оптимальной высоты сетчатых сводов и куполов // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1981, № 8. – С. 14-18.

43. Гайдаров Ю. В., Козьмина В. К. Оптимальная высота трехслойных оболочек вращения // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1981. – №5. – С. 21-26.

44. Гениев Г. А., Чаусов Н. С. Некоторые вопросы нелинейной теории устойчивости пологих металлических оболочек: Науч. сообщ. ЦНИИПС. – М.: Госстройиздат, 1954. – Вып. 13. – 52 с.

45. Гениев Г. А., Пятикрестовский К. П. Вопросы длительной и динамической прочности анизотропных конструкционных материалов (брошюра). ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, М.: 2000. 38 с.

46. Городецкий А. С., Здоренко В. С. Типовая проектирующая подсистема ЛИРА для автоматизированного проектирования несущих строительных конструкций //Сб.: Системы автоматизированного проектирования объектов строительства, вып.1, 1982. – С.169-172.

47. ГОСТ Р 50779.76-99 (ИСО 8423-91) Статистические методы. Последовательные планы выборочного контроля по количественному признаку для процента несоответствующих единиц продукции (стандартное отклонение известно)/ М.: Издательство стандартов, 2000. — 26 с.

48. ГОСТ Р 21.1101–2013. СПДС. Основные требования к проектной и рабочей документации (Электронный ресурс). – Режим доступа:

<http://files.stroyinf.ru/Data1/57/57874/>.

49. ГОСТ 21.501–2011. СПДС. Правила выполнения рабочей документации архитектурных и конструктивных решений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-21-501-2011>.

50. ГОСТ Р 52643-2006. Болты и гайки высокопрочные и шайбы для металлических конструкций. Общие технические условия.

51. ГОСТ Р 54257-2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Издательство стандартов, 1991. 8 с.

52. ГОСТ Р 8.694-2010. (Руководство ИСО 352006) ГСИ. Стандартные образцы материалов (веществ)..

53. ГОСТ Р 21.502-2007 Система проектной документации для строительства. Правила выполнения проектной и рабочей документации металлических конструкций.

54. ГОСТ Р 54157-2010. Трубы стальные профильные для металлоконструкций. Технические условия.

55. ГОСТ Р 54864-2011. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные для сварных стальных конструкций.

56. ГОСТ 27772-88. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия. М.: Стандартиформ, 2009.

57. ГОСТ 20700-75. Болты, шпильки, гайки и шайбы для фланцевых и анкерных соединений, пробки и т.д.

58. ГОСТ Р 52643-2006 Болты и гайки высокопрочные и шайбы для металлических конструкций. Общие технические условия

59. ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

60. ГОСТ 16483.0 «Древесина. Методы испытаний. Общие требования к механическим испытаниям. М.: Изд.-во стандартов, 1991. – 9 с.

61. ГОСТ 16483.10-73 Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. М.: Изд.-во стандартов, 1991. – 8 с.

62. ГОСТ 16483.9-73 (СТ СЭВ 1142-78) Древесина. Методы определения модуля упругости при статическом изгибе. М.: Изд.-во стандартов, 1991. – 8 с.
63. ГОСТ 21554.3-82. Пиломатериалы и заготовки. Метод контроля прочности при изгибе, растяжении и сжатии. М.: Изд.-во стандартов, 1991. – 8 с.
64. Григорьев Д. С. Большие прогибы прямолинейных мембран. Изв. АН СССР отд. тех. и маш. – М.: Мир, 1965. – 53 с.
65. Губенко А. Б. Строительные конструкции с применением пластмасс. М., Стройиздат, 1970. – 290 с.
66. Гурьев А.Ю. Особенности напряженно-деформированного состояния конструкции стержневого купола из клееной древесины с учетом деформативности узловых соединений: Дис...канд. техн. наук: 05.23.01. — Л.: 1991. – 220 с.
67. Денисова, А.П. Методы оптимального проектирования строительных конструкций: учеб. пособие/ А.П. Денисова, С.А. Ращепкина. – М.: Изд-во АСВ, 2012. – 216 с.
68. Дыховичный Ю. А., Жуковский Э. З., Ермолов В. В. и др. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): Справочник; под ред. Ю.А. Дыховичного, Э.З. Жуковского. – М.: Высшая школа, 1991. – 543 с.
69. Денеш Н. Д. Показатели надежности и коэффициенты условий работы древесины сжато-изгибаемых элементов в зависимости от эксплуатационной температуры и влажности // Исследования и методы расчета строительных конструкций и сооружений. - М.: ЦНИИСК, 1988. — С. 91-100.
70. Дехтярь А. С., Узаков Х. Купол наименьшего веса // Прикладная механика, 1974. №10, вып. 6. – С.118 - 121.
71. Дмитриев И. К. К вопросу возведения экспериментального стержне-вантового купола/ И. К. Дмитриев, К. Г. Петухова. – Промышленное и гражданское строительство, 2012. – №12. – С. 26-27.

72. Дмитриева К.О. Устойчивость стержневых элементов из древесины при силовом и средовом нагружении: дис...канд. техн. наук: 05.23.01. – Курск: 2016. –166 с.

73. Дмитриева Т.Л., Ле Чан Минь Дат. Оптимальное проектирование пространственной металлической конструкции с использованием ПК ANSYS. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. Volume 10, Issue 2 2014, – С. 79-84.

74. Еремеев, П. Г. Металлические пространственные конструкции покрытий уникальных большепролетных сооружений в России / П. Г. Еремеев // Промышленное и гражданское строительство. 2013. – № 10. – С. 9-14.

75. Ермолов В.В. Построение сетки геодезических куполов способом центральной проекции // Строительная механика, расчет и конструирование сооружений: Тр, МАрхИ, вып. 5. М.: 1976, – С. 79 - 40.

76. Ерофеев В.Т., Гудожников С. С., Федорцов А. П., Антошкин В. Д. и др. Определение физико-механических свойств древесины. (Методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов»). Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. 48 с.

77. Ерофеев В.Т., Старцев О. В., Антошкин В.Д., Гудожников С. С., Самолькина Е. Г., Болдина И.В., Махоньков А.Ю. Оценка изменения прочности древесины в условиях повышенной влажности/ Фундаментальные исследования. 2014. № 9-12. – С. 2630-2638.

78. Ерофеев В.Т., Антошкин В. Д., Смирнов В.Ф., Гудожников С.С., Самолькина Е. Г., Смирнова О.Н., Захарова Е. А. Исследование биологической стойкости образцов древесины//В сб.: Инновационное направление учебно-методической и научной деятельности кафедр материаловедения и технологий конструкционных материалов. Материалы Всероссийского совещания с международным участием зав. кафедрами материаловедения и технологий конструкционных материалов. 2016. – С.

298-303.

79. Журавлев А. А., Веселев Ю. А., Вержбовский Г. Б. К вопросу геометрического расчета купола из шестиугольных плоских панелей // Изв. вузов. Строительство. 1993. – № 7-8. – С. 24-30.

80. Журавлев А. А. Купольные покрытия из дерева и пластмасс. Спецкурс. Ростов н/Д.: Рост. инж.-строит ин-т, 1983. – 102 с.

81. Журавлев А. А., Осетинский Ю. В. Практический метод расчета структурных сферических оболочек // Теория оболочек и пластин: Тр. IX всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. Л.: 1975. – С.267-270.

82. Журавлев А. А. Прошелкивание стержневой конструкции сетчатого купола в форме 980-гранника // Изв. вузов. Строительство и архитектура., 1983.-№6. –С. 34-39.

83. Журавлев А.А., Скуратов С.В. Расчет многогранных куполов на воздействие ветровой нагрузки // Легкие конструкции зданий: Сб. тр. — Ростов н/Д: 1989. – С. 68-78.

84. Журавлев А.А., Скуратов С.В. Устойчивость однопоясного сетчатого купола при неравномерности распределения нагрузки // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1989. – № 6. – С. 13-15.

85. Журавлев А.А. Прочность и устойчивость пологих многогранных куполов из дерева и пластмасс: автореф. дис. ... д -ра тех. наук: (05. 23. 01.) / Моек. инж. - строит., ин-т. им. В .В. Куйбышева – М., 1988. – 43 с.

86. Журавлев А. А. Экспериментальное исследование несущей способности и деформативности конструкции двухъярусного купола // Изв. вузов. Стр. и арх. 1987. – №11. – С. 121-124.

87. Журавлев А. А., Муро Г. Э., Кимсуор Лонг, Журавлев Ан. А. Стержневые конструкции многогранных куполов: монография / под ред. А. А. Журавлева; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Рост. гос. строит. ун-т. – Ростов н/Д.: РГСУ, – 2007. – 315 с.

88. Зверев В. В. Эффективные строительные металлоконструкции на

основе объемно-формованного тонколистового проката: Исследование, проектирование, изготовление: автореф. дис.... д-ра тех. наук: (05. 23. 01.)Липецк, 2000.- С41.

89. Инжутов И. С., Дмитриев П. А., Деордиев С. В., Захарюта В. В. Анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций и разработка сборно-разборного узлового элемента /Вестник МГСУ.- 2013, – № 3. – С.61-71.

90. Каталог производителей металлических конструкций Ассоциации развития стального строительства (АРСС) М.: 2015.

91. Каталог проектов общественных зданий с покрытиями из клееных деревянных конструкций. – М.: Госгражданстрой, 1985. – 72 с.

92. Карпов, В. В. Математическое моделирование и расчет элементов строительных конструкций [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Карпов В. В., Панин А. Н. – Электрон. текстовые данные. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный ун.-т, ЭБС АСВ, 2013. – 176 с.

93. Калугин, А. В. Деревянные конструкции [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.В. Калугин. – издание 2-е, испр. и доп. – Электрон. текстовые данные.— М. : Издательство АСВ, 2008. - 288 с. – Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930935691.html>. – ЭБС «Консультант студента», по паролю.

94. Клееные деревянные решетчатые купола большого диаметра с узловыми элементами типа "Варакс" (США) // Строительные конструкции. Строительная физика: ЦИНИС, Реферат, инф., серия VIII. М.: 1979. – вып. 4. – С. 26-30.

95. Клееный деревянный решетчатый купол спортивно-зрелищного сооружения диаметром 208 м (США) // Строительные конструкции. Строительная физика: ЦИНИС, Реферат, инф., серия УШ. М.: 1978, вып. 12, с.38.

96. Коновалов А. Г., Антошкин В. Д. Формирование сетчатого купола с

помощью AUTODESK-AUTOCAD/ В сборнике: Актуальные вопросы архитектуры и строительства материалы 14 Международной научно-технической конференции. Ответственный редактор В. Т. Ерофеев. 2015. – С. 48-53.

97. Клятис Г. Я. Оболочки покрытий из пластмасс (обзор). — М.: ЦИНИС, 1972. – 88 с.

98. Колесников Г. Н. Геометрический расчет сетчатых куполов с использованием ЭВМ // Легкие ограждающие конструкции покрытий зданий: Сб. науч. тр. Ростов-на-Дону, 1978. – С.32-37.

99. Колесников Г. Н. Оптимизация геометрических схем купольных покрытий в форме многогранника // Организация, методы и технология проектирования: ЦИНИС, Реферат, инф., серия 13. М., 1979, вып.2, – С.15-18.

100. Колесников Г. Н. Формообразование, статический расчет и конструирование несущих каркасов сетчатых куполов: дисс... канд. тех. наук. - Ростов-на-Дону, 1980. – 154 с.

101. Колесников Г.Н. Статический расчет сетчатых оболочек как нелинейных систем // Облегченные покрытия зданий: Межвуз. Сб., Ростов н/Д.: 1979. – С. 140-143.

102. . Клячин А. З. Металлические решетчатые пространственные конструкции регулярной структуры (разработка, исследование, опыт применения). Екатеринбург: ДИА-мант, 1994. – 276 с.

103. Косолапов, А. Н. Проекционные основы рационального проектирования геодезических куполов [Текст] : (Руководство к дипломному проектированию) / А. Н. Косолапов ; Науч. ред. проф. Н. А. Соболев ; Воен.-инж. Краснознам. акад. им. В. В. Куйбышева. - Москва : [б. и.], 1969. – 60 с.

104. Колчунов В. И. Пространственные конструкции покрытий: Курсовое и дипломное проектирование: учеб. пос. / В.И. Колчунов, К.П. Пятикрестовский, Н.В. Ключева. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 352 с.

105. Колчунов В. И. Особенности расчета деревянных конструкций на прочность по деформациям [Текст]/ В. И. Колчунов, К. П.

Пятикрестовский//Строительство и реконструкция, 2013. – №2. – С. 25-34.

106. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Аналитические поверхности в архитектуре зданий, конструкций и изделий. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 328 с.

107. Крылов Н. А. Оптимизация расчетных параметров строительных конструкций / Н. А. Крылов, А. А. Воеводин, К. А. Глуховской, Д. П. Хлутков. - Л. : Стройиздат : Ленингр. отд-ние, 1989. – 111,[2] с.

108. Лабудин Б. В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой: моногр. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. – 267 с.

109. Липницкий М. Е. Купола (расчет и проектирование). - Л.: Стройиздат, Ленинград, отд-ние, 1973. –129 с.

110. Мак Хел Д. Геодезические купола. Конструкции Букминстера Фуллера // Современная архитектура (пер. журн. L'architecture d'aujourd'hui). – 1962. – №1. – С.30-35.

111. Мандриков А. П. Примеры расчета металлических конструкций [Электронный ресурс]: учебное пособие/ А.П. Мандриков. – 3-е изд., стер. – Электрон. текстовые данные. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 432 с. – Режим доступа: [Http://E.Lanbook.Com/Books/Element.Phppl1_Id=9466](http://E.Lanbook.Com/Books/Element.Phppl1_Id=9466).

112. Мажид К. И. Оптимальное проектирование конструкций / К.И. Мажид. - М.: Высшая школа, 1979. – 238 с.

113. Металлические конструкции : учеб. для строит. вузов : в 3 т. Т. 2 : Конструкции зданий / под ред. В. В. Горева. – 2-е изд., испр.. – М.: Высш. шк., 2002. – 528 с.

114. Металлические конструкции : в 3 т. Т.2 под общ. ред. В. В. Кузнецова. – М.: АСВ, 1998. – 576 с.

115. Металлические конструкции. Справочник проектировщика; под ред. Н. П. Мельникова. – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с.

116. Мищенко А. В. Расчет и проектирование деревянных стержневых систем с учетом физической нелинейности / А.В. Мищенко, Ю.В.

Немировский // Строительная механика и расчет сооружений. - 2007. – № 6. – С. 46 – 52.

117. Миряев Б. В. Оптимизация геометрической схемы сетчатых куполов, образованных на основе икосаэдра// Региональная архитектура и строительство. 2012, – №3. – С.122–125.

118. Миряев Б. В., Данилова М. В. Определение геометрических параметров оптимальных многогранников на основе икосаэдра // Актуальные проблемы современного строительства. 4.2. Архитектура, градостроительство, строительные конструкции. Экономика и менеджмент. Материалы Всероссийской XXXI научно - технической конференции.- Пенза, 2001. –90 с.

119. Михайлов В. В. Пространственные стержневые конструкции покрытий (структуры) : учеб. пособие / В. В. Михайлов, М. С. Сергеев ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим.гос. ун-та, 2011. – 56 с.

120. Молев И.В., Конструктивные разработки, экспериментально-теоретические исследования и внедрения стальных куполов: автореф. дис.... д.-ра тех. наук. – Пенза, 1996. – 34 с.

121. Молева Р. И., Молев И. В. Влияние конструктивного решения узлового соединения на несущую способность элементов сетчатого купольного покрытия // Известия вузов. Стр-во и арх-ра. -1988. №4. – С. 18-21.

122. Мухин Б. Г. Использование правильных сетей Чебышева для формообразования сборных оболочек вращения // Большепролетные пространственные конструкции. ГОСИНТИ, М., 1973. – с. 28-31.

123. Нельке Х., Журавлев А. А., Веселев Ю.А., Вержбовский Г. Б. К вопросу аппроксимации сферического купола многогранником из шестиугольных плоских панелей // Легкие строительные конструкции: Сб. науч. трудов. - Ростов н/Д: Рост. гос. акад. стр-ва, 1993. – С. 5–15.

124. Насонов, С. Б. Руководство по проектированию и расчету строительных конструкций : в помощь проектировщику / С. Б. Насонов. -

Москва: АСВ, 2013. – 816 с

125. Нехаев, Г.А. Легкие металлические конструкции [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Г.А. Нехаев. – Электрон. текстовые данные. – Саратов: Вузовское образование, 2012. – 91 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/21546.html>. – ЭБС «IPRbooks»..

126. Нехаев, Г. А. Металлические конструкции в примерах и задачах [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Г.А. Нехаев, И.А. Захарова. - Электрон. текстовые данные. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 128 с. – Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930937169.html>.

127. Никонов В. И., Антошкин В. Д. К задаче оптимизации расположения сферических треугольников/Вестник Мордовского университета. 2015. – Т. 25. – № 1. – С. 24-29.

128. Никонов В. И., Антошкин В. Д. К задаче оптимизации расположения сферических треугольников//В сборнике: Актуальные вопросы архитектуры и строительства /Материалы тринадцатой международной научно-технической конференции. 2014. – С. 226-229..

129. Ольков Я. И., Холопов И. С., Оптимальное проектирование предварительно-напряженных металлических ферм. – М.: Стройиздат. 1986. –156 с.

130. Павлов Г. Н. Автоматизация архитектурного проектирования геодезических куполов и оболочек: монография / Г. Н. Павлов, А. Н. Супрун; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун.-т. – Н. Новгород: Изд-во НГАСУ, 2006. – 162 с.

131. Павлов Г. Н. Композиционное формообразование кристаллических куполов и оболочек // Архитектура СССР.- 1977. – №2. – С. 30-41.

132. Павлов, Г. Н. Новые виды малопролётных купольных сооружений в городской застройке / Г. Н. Павлов, Г. М. Голов // Вопросы планировки и эстетического решения при застройке городов : сб. тр. – Пенза: 1980. – С. 32-33.

133. Патент на полезную модель RUS 930591- 02.11.1993. Сборно-

разборная строительная оболочка/ Веселев Ю.А.

134. Патент на полезную модель RUS 129534 – 15.10.2012. Сборная сферическая оболочка /Травуш В. И., Антошкин В. Д., Ерофеев В.Т.

135. Патент на изобретение RUS 2520192 –23.04.2012. Сборная сферическая оболочка /Травуш В. И., Антошкин В. Д., Ерофеев В.Т.

136. Патент на изобретение RUS 2564545 – 28.07.2014. Сборная сферическая оболочка / Антошкин В. Д., Травуш В. И., Ерофеева И. В., Антошкин Д. В.

137. Патент № 26117202. Составной блок сборного структурного покрытия / Антошкин В. Д., Травуш В. И., Коновалов А. Г., Ерофеева И. В.

138. Патент RUS 2235833. Треугольный сегмент многогранного сферического купола Миряев Б. В., Данилова М. В. / Пензенская государственная архитектурно-строительная академия. Оpubл. 16.10.01.

139. Палкина Л. В. Исследование напряженно-деформированного состояния сжато-изгибаемых клееных деревянных элементов: автореф. дис... канд. тех. наук. – М.: 1980. – 21 с.

140. Парлашкевич, В. С. Металлические конструкции, включая сварку. Часть 1. Производство, свойства и работа строительных сталей [Электронный ресурс]: учебное пособие/ В.С. Парлашкевич. – М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2014. - 161 с. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/27040.html>.

141. Прагер В. Основы теории оптимального проектирования конструкций / В. Прагер // Серия Механика: Новое в зарубежной науке. – М.: Мир, 1977. – 112 с.

142. Пономарев В. В., Беликов Г. И. Численный метод решения краевых задач статики сетчатых оболочек вращения // Изв. вузов. Стро-во и архитектура.- 1977. – № 10. – С. 34-40.

143. Пермяков В. А., Перельмутер А. В., Юрченко В.В. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций.- Киев: «Сталь», 2008. 538 с.

144. Пятикрестовский К. П., Щепеткина Е. Н. Исследования модели купольного покрытия из клееной древесины и фанеры // Пространственные конструкции в Красноярском крае. – Красноярск: 1982. – С. 121-133.

145. Пятикрестовский К. П., Турковский С. Б. Крытый рынок с куполом из клееной древесины // На стройках России. — 1987. – № 7. – С. 16-17.

146. Пятикрестовский К. П. Обоснование нормируемых значений модулей упругости при расчетах деревянных конструкций./ К.П. Пятикрестовский, А.А. Погорельцев //Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №10. – С.33-35.

147. Пятикрестовский К. П. О программировании нелинейного метода расчета деревянных конструкций / К. П. Пятикрестовский, В. И.Травуш //Academia. Архитектура и строительство. – 2015. – № 2. – С. 115-119.

148. Рекомендации по испытанию деревянных конструкций. - ЦНИИСК. – М.: Стройиздат, 1976. – 28 с.

149. Рекомендации по определению снеговых нагрузок для некоторых типов покрытий. – М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1983. – 24 с.

150. Рекомендации по проектированию деревянных клееных куполов для покрытий залов общественных зданий / Центр, н. - и. и проект, ин-т типового и экспериментального проектирования комплексов и зданий культуры, спорта и управления им. Б.С. Мезенцева. – М.: ЦНИИЭП им. Б. С. Мезенцева, 1989. – 130 с.

151. Ружанский И. Л. Опыт проектирования и осуществления сетчатых куполов // Пространственные конструкции зданий и сооружений (исследование, расчет, проектирование, и применение): сб. статей. Вып. 9 / МОО “Пространственные конструкции”; под ред. В.В.Шугаева и др.- М.: ООО “Девятка Принт”, 2004. – С. 141-148.

152. Современные технологии расчета и проектирования металлических и деревянных конструкций: курсовое и дипломное проектирование. Исследовательские задачи: учеб. пособие по направлению 270100 "Строительство" / М. С. Барабаш [и др.] ; под ред. А. А. Нилова. –Москва:

Ассоц. строит. вузов, 2008. – 336 с.

153. Савельев В. А. Теоретические основы проектирования металлических куполов.: автореф.. дис....док.тех. наук. ЦНИИПроектсталь-конструкция им.Мельникова. - М., 1995. – 22 с.

154. Савельев В. А., Ломбардо И. В., Кречетова Т. А. Сетчатый сферический купол диаметром 65 м для производственного корпуса в г. Душанбе // Проектирование металлических конструкций: ЦИНИС, Реферат, инф., серия XVII. М.: 1978, – С. 2-5.

155. Скуратов С. В. Теоретические основы расчета и проектирования деревянных конструкций непологих многогранных куполов: автореф... дис. канд. тех. наук. - Ростов-на-Дону, 1990. - 24 с.

156. Супрун А.Н., Дыскин Л.М., Платов А.Ю., Лахов А.Я. Автоматизированное проектирование и расчет на прочность одноконтурных геодезических оболочек из плоских элементов / А.Н Супрун, Л.М. Дыскин, А.Ю. Платов, А.Я. Лахов // Вестник МГСУ. 2012. № 8. С. 226—233.

157. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 11–25–80. – М.: Минрегион России, 2011. – 72 с.

158. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II–23–81*. – М.: Минрегион России, 2010. – 176 с.

159. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. – М.: НИЦ «Строительство» Минрегиона России, 2011. – 80 с.

160. СП 20.13330.2011 79 Приложение Ж (рекомендуемое) Карты районирования территории Российской Федерации по климатическим характеристикам.

161. СП 128.13330.2012. Алюминиевые конструкции. Актуализированная редакция СНиП 2.03.06–85.– М.: Минрегион России, 2012. – 74 с.

162. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): Справочник. - М. Высш. шк., 1991. -543с.

163. СТО 02494680-0058-2008. Конструкции стальные строительные. Нагрузки и воздействия (Дополнения).

164. Травуш В. И., Колчунов В. И., Дмитриева К. О. Исследование прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины при силовом нагружении и переменной влажности//Известия высших учебных заведений. /Технология текстильной промышленности.- 2016. – № 6. – С. 159.

165. Травуш В. И., Колчунов В. И., Дмитриева К. О. Экспериментально-теоретическое исследование прочности и устойчивости сжатых стержней из древесины при силовом и средовом воздействии//Известия высших учебных заведений./Технология текстильной промышленности.- 2016. – № 3 (363). – С. 280-285.

166. Травуш В. И., Антошкин В. Д., Ерофеева И. В., Гудожников С. С. Исследование конструктивно-технологических возможностей сборных сферических оболочек//Региональная архитектура и строительство. 2014. – № 2. – С. 89-101.

167. Травуш В. И., Антошкин В. Д., Ерофеев В. Т., Гудожников С. С. Современные конструктивно-технологические решения сферических оболочек// Строительство и реконструкция. 2012. № 6 (44). С. 45-55.

168. Травуш В. И., Антошкин В. Д., Ерофеев В. Т., Гудожников С.С. Конструктивно-технологические возможности сборных сферических оболочек// Строительство и реконструкция.- 2013. – № 6 (50). – С. 36-48.

169. Таиров, В. Д. Сетчатые пространственные конструкции / В. Д. Таиров. - Киев : Будивельник, 1966. – 74 с.:

170. Трофимов В. И. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений (разработка конструкций, исследование, расчет, изготовление, монтаж): учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по строит. спец. / В. И. Трофимов, А. М. Каминский – М.: АСВ, 2002. – 576 с.

171. Трофимов В. И., Бегун Г. Б. Структурные конструкции (исследование, расчет и проектирование). М. : Стройиздат, 1972. – 272 с.

172. Трофимович В. В., Пермяков В. А. Оптимальное проектирование

металлических конструкций. Киев: Будивельник, 1981. – 200 с.

173. Толушов С. А. Совершенствование методов расчета и конструктивных решений сетчатых деревянных куполов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Пенза, ПГАСА, 2002 – 26 с.

174. Трофимов, В. И. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений: учебное пособие/ В.И. Трофимов, А.М. Каминский. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 235 с.

175. Туполев М. С. Новые варианты сборных куполов и сводов-оболочек. - В кн.: Новые виды пространственных покрытий: Учеб, пособие по курсу гражд. и пром. зданий/ МАрхИ, 1963. – С. 4-37.

176. Туполев М. С. Геометрия сборных сферических куполов/ М. С. Туполев // Архитектура СССР. – 1969. – № 1. – С. 15-18.

177. Тур В. И. Устойчивость пологого металлического предварительно-напряженного сетчатого купола, подкрепленного пространственным шпренгелем // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1983. – № 2. – С.1-5.

178. Турков А. В. Учет податливости соединений при расчете ребристо-кольцевого купола из древесины [Текст] / А.В. Турков, Т.В. Зульфикарова // Сборник научных трудов Таджикского ПИ. – Душанбе: Ирфон, 1991. – С. 35-37.

179. Фадеев А. А. Экспериментальное исследование устойчивости сетчатых сферических оболочек покрытий на моделях при кратковременных нагрузках // Тонкостенные и пространственные конструкции пространственных покрытий зданий: Тез. докл. Всесоюзной конференции 23-25 сент. 1986 г., Таллин; 1986, – т. 2. П-я, – С. 69-70.

180. Филимонов, Э. В. Конструкции из дерева и пластмасс [Электронный ресурс]: учебник/ Э.В. Филимонов, М.М. Гаппоев, И.М. Гуськов, Л.К. Ермоленко, В.И. Линьков, Е.Т. Серова, Б.А. Степанов. - Электрон. текстовые данные. - М.: Издательство АСВ, 2010, – 440 с. – Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930933024.html>.

181. Фридкин, В. М. Формообразование строительных конструкций

[Электронный ресурс]: монография/ В.М. Фридкин. - Электрон. текстовые данные. - М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2011. – 171 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16318.html>.

182. Шаучювенас Г. Л. Оптимальное проектирование пространственных стержневых стальных конструкций. Киев: 1993. 42 с.

183. Хахаев И. А. Gnumeric и линейная оптимизация. URL: ftp://ice.spb.ru/pub/articles/gnumeric_1.odt (дата обращения: 29.07.2011).

184. Шеховцов А. С. Исследование напряженно-деформированного состояния сжато-изогнутых несущих стержневых элементов деревянных сетчатых куполов и совершенствование их узловых соединений : Дис.... канд.-та техн.-х наук: 05.23.01/: С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Санкт-Петербург: 2008. – 152 с.

185. Широков В. С. Поиск оптимальных соотношений стрелы подъема и пролета структурной купольной конструкции // Вестник МГСУ. – 2013. – № 9. – С. 32–40.

186. Шишкин А. И. Решетчатые сферические оболочки. Анализ прочности и устойчивости с учетом начальных несовершенств: автореф. дис...канд. тех. наук. Ленинград.политех. ин-т. им. М.И. Калинина. - Л., 1989. – 16 с.

187. Щуко, В. Ю. Клееные армированные деревянные конструкции : учеб. пособие к курсовому и дипломному проектированию / В. Ю. Щуко, С. И. Рощина; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 68 с.

188. Antoshkin V. D., Travush V. I., Erofeev V. T., Rimshin V .I., Kurbatov V. L.The problem optimization triangular geometric line field// Modern Applied Science. 2015. Т. 9. № 3. P. 46-50.

189. Behzad A., Hamid M., Amran A. Find the Optimum Shape Design of Externally Pressurized Torispherical Dome Ends Based on Buckling Pressure by Using Imperialist Competitive Algorithm and Genetic Algorithm // Applied Mechanics and Materials Vols. 110—116 (2012). P. 956–964.

190. Çarbaş S., Saka M.P. Optimum design of single layer network domes using harmony search method // Asian journal of civil engineering (building and housing) Vol. 10, No. 1 (2009), P. 97–112.

191. Britvec S.F., Nardini D. Some aspects of the non linear elastic, behavior and instability of reticulated shell-tube system. "Teor. I primen. Meh.", 1976,.- №2. – P. 15–23.

192. Dome Built From Top Down.- Civil Engineering, 1959, Vol.2, Dezember, P. 58–59.

193. Geodatische Kuppel als Ausstellungsraum, Leuk VS. - Jn.: Werk/geuvre, 1976. – NIL– S. 758-759.

194. Horrigmoe Gjeir. Hybrid stress finite element model for nonlinear shell problems. // Int., J. Numer . Meth., 1978, №12, 1819–1839.

195. Hamilton, W. Aluminium Dome Structures and Span Roof Units / W. Hamilton // Civil Engineering - 1959. № 5. P. 263-266

196. Huybers P. Reciprocal polyhedra. - Lightweight structures in civil engineering. Proceedings of the international symposium. Warsaw, Poland, 24 - 28 June, 2002.

197. Lopez A., I. Puente and M.A. Serna. Analysis of single layer latticed domes: A new beam-element. „Proceedwgs of the international semposium". Warsaw, Poland, 24-28 june, 2002. – S. 639-644.

198. Lienhard W. Cyclic polygons in non-Euclidean geometry// Elem. math. 2011. V. 66, N 2. P. 74-82.

199. M'Clelland W. J., Preston T. A treatise on spherical trigonometry with application to spherical geometry and numerous examples. P. II. London: Macmillian and Co. 1886.

200. El Damatty A. A., Nassef A. O. A finite element optimization technique to determinate critical imperfections of shell structures// Struct Multidisc optim 23, Springer-Verlag 2001. – P. 75–87.

201. Fuller study group // Perspecta. – 1953. – № 2. P. 33-35.

202. Niku-Lari A. Structural analysis system, (Software-Hardware, Capability -

Compatibility-Applications). pergamon Press, vol. 1-3, 1986.

203. Flyng dome; TR-500 geodesic dome made of glass-fiber reinforset plastics panels // Plastic Word. - 1961. March. – P. 21.

204. Fuller , R. B. Synergetics / R. B. Fuller. – New-York : London, 1975.

205. Richard Buckminster Fuller.- Archit. Design. 1961, vol. 31, N7, – P. 290319.

206. G. A. Korn, T. M. Korn. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers, 1151, 2000. 456 c

207. Software Scilab 5.4.1 - The free platform for Numerical Computation 06.17.2014/ www.softkumir.ru/index.

208. Travush V. I., Antoshkin V. D., Erofeev V. T.. The problem 4 of placement triangular geometric line field. 01031. Published online: IPICSE 28 November 2016. MATEC Web of Conferences 86, V. Andreev (Ed.).(2016) C. 01031. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20168601031>.

209. Travush V .I., Antoshkin V. D., Erofeev V. T./ The problem 7 forming triangular geometric line field. 01032. Published online: IPICSE 28 November 2016. MATEC Web of Conferences 86, V. Andreev (Ed.).(2016)C. 01032. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20168601032>.

210. Travush V. I., Antoshkin V. D., Konovalov A. G. / To the problem 5 of emplacement of triangular geometric net on the sphere. 01081. Published online: IPICSE 23 May 2017. MATEC Web of Conferences 106, V. Andreev (Ed.).(2017) C. 02003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710602003>.

211. Travush V .I., Antoshkin V. D., Erofeeva I. V./ To the problem 6 of emplacement of triangular geometric net on the sphere. 01082. Published online: IPICSE 23 May 2017. MATEC Web of Conferences 106, V. Andreev (Ed.).(2017)C. 01032. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710602012>.

212. Taylor Plastics 110 Ft. Space- Frame Rado-me.- Reinforced Plastica, 1966, Vol.10, N7. – P.283-285.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Национального
исследовательского Мордовского
государственного университета им.
Н.П. Огарёва, д. т. н., профессор

П.В.Сенин



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результаты исследований, проведенных Антошкиным В.Д., использовались при выполнении х\д НИР (№ 97-1/17) и по теме «Разработка энергоэффективных куполов из каркасных пирамидальных панелей» в рамках (ПНР-1) Программы развития университета 2010-2019 г.г.

Декан архитектурно-строительного
факультета, академик РААСН, д.т.н.,
профессор

В.Т. Ерофеев

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Национального
исследовательского Мордовского
государственного университета им.
Н.П. Огарёва, д. т. н., профессор

П.В.Сенин



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Антошкин В.Д. разработал программы для геометрического и статического расчета сетчатых куполов. Им разработаны предложения по расчету и конструированию данных покрытий, которые использовались на кафедре зданий, сооружений и автомобильных дорог и на кафедре прикладной механики в ходе курсового и дипломного проектирования.

Заведующий кафедрой
прикладной механики, член-корреспондент
РААСН, д.т.н., проф.

В. Д. Черкасов



Общество с ограниченной ответственностью
«Региональный проектно-экспертный центр»

430030, Республика Мордовия, г.о. Саранск,
 ул.Титова, д. 34, каб.21

ИНН/КПП 1326212443/132601001,

ОГРН 1091326002460

Банковские реквизиты:

К/счет 30101810600000000808;

Р/с 40702810100000024269 в ЗАО АКБ

«ЭКСПРЕСС-ВОЛГА», г. Саратов, ул. Мичурина,
 166/168, Почтовый индекс 410002;

ОКАТО 89401364000

БИК 046311808

Тел./факс: 8(8342) 23-28-78

Моб.: 8-927-977-07-01 Директор

E-mail: 2evgeniy@mail.ru

Председателю
 диссертационного совета

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

В соответствии с договором 97/17 от 01.02.2017, заключенным между
 ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П.Огарёва» и ООО «Мордовский региональный
 проектноэкспертный Центр» разработан рабочий проект купольного
 каркасотентового покрытия летнего кафе пролетом 8,1 м.

При разработке проекта использовались результаты научных исследований,
 проводимых Антошкиным В.Д. в ходе работы над докторской диссертацией.

Генеральный директор
 ООО«Мордовский
 региональный
 проектно-экспертный Центр»



Е. А. Комков



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Н.П. ОГАРЁВА»
(ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва»)**

ул. Большевикская, д. 68, г. Саранск,
Республика Мордовия, Россия, 430005,
Тел. (8342) 24-37-32, 24-48-88, факс (8342) 47-29-13,
E-mail: dep-general@adm.mrsu.ru,
<http://www.mrsu.ru>
ОКПО 02069964, ОГРН 1021300973275,
ИНН/КПП 1326043499/132601001

26.05.2017 № 97-1/17

Председателю

диссертационного совета

Д 999.94.03

доктору технических наук,
профессору

Федоровой Наталии Витальевне

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Юго-Западный
государственный университет»
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94,
конференц-зал.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

В соответствии с договором 97-1/17 от 01.02.2017, заключенным между ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П.Огарёва» и «ГБПОУ РМ «Саранский политехнический техникум» г. Саранск, совместно изготовлено купольное каркасно-тентовое покрытие для здания мобильного павильона.

При разработке проекта павильона, изготовлении и монтаже использовались результаты научных исследований, проводимых Антошкиным В.Д. в ходе работы над докторской диссертацией.

Научный руководитель
Научно-исследовательского и
проектно-конструкторского института
(НИПИ АСФ ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва»)
академик РААСН профессор, д.т.н.



В.Т.Ерофеев

ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

Листинг 2.1:

**Листинг операций в программном комплексе
AutodeskAutoCad 2015**

Этап 1. Определение осей-границ сектора сферы. Необходимо создать окружность единичного радиуса, проходящую через центр сферы(такие окружности создают «главные линии» на сфере), в плоскости ХОУ (выбрана по умолчанию) для дальнейшего удобства обозначим ее «Окружность 1», для этого используя кнопку «Центр радиус» (прилож. 2, рис. 2.1)

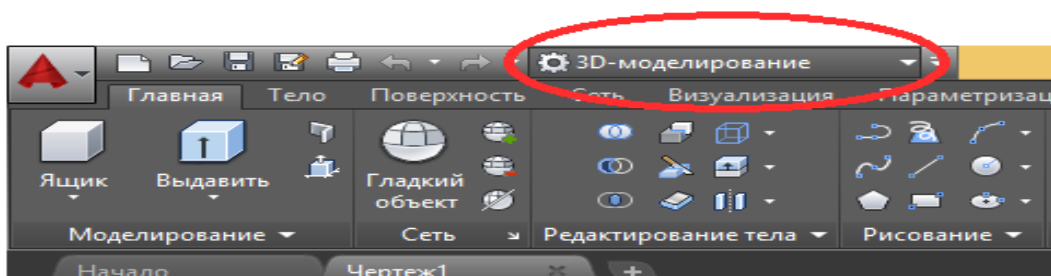



Рис. 2.1. Режим 3D-моделирование

создаем окружность равную 1000, используя динамический ввод, с центром в точке $[0.0.0]$. После этого ставим видовой куб в положение как показано на рисунке 2.3 прилож. 2., выделяем «Окружность 1» и, используя функцию 3D-поворот  с базовой точкой $[0,0,0]$.

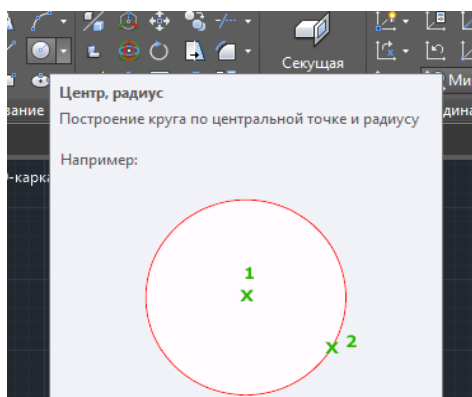


Рис. 2.2. Центр, радиус

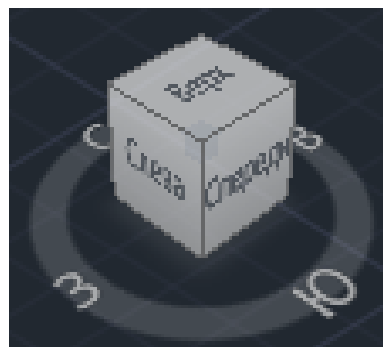


Рис. 2.3. Видовой куб

Затем поворачиваем «окружность 1» с копированием относительно оси «Y», тем самым получая «Окружность 2». С помощью таких же действий создаем «Окружность 3», копированием с поворотом на 30 градусов

«окружности 2» относительно оси «Z», и командой «Отрезок» проводим отрезки, ограничивающие необходимый нам сектор. После выполнения указанных действий мы обязательно получаем 3 окружности в разных плоскостях как показано на рисунке 2.4 прилож. 2,.

Этап 2. Построение окружностей для размещения шестиугольной сети.

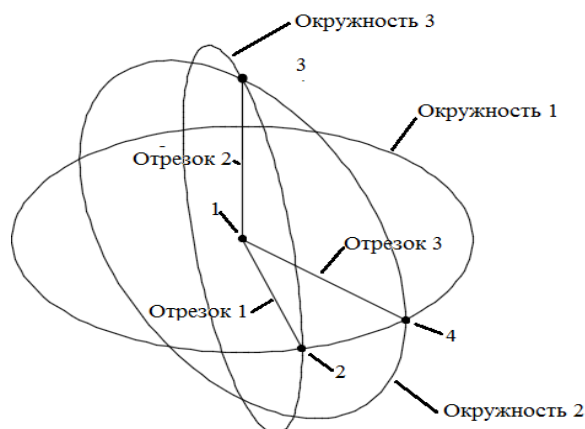




Рис. 2.4.

Для формирования листинга с определенным шагом главных линий в данном случае 15 градусов нам необходимо задать «Пользовательскую систему координат» (далее ПСК) плоскость окружности 3 (прилож. 2, рис. 2.4), с

помощью кнопки  на панели задач и выбрать точки 1, 2, 3 (прилож. 2, рис. 2.4), затем скопировать «отрезок 1» с поворотом с базовой точкой в центре сферы с шагом 15 градусов (в общем случае - шаг главных линий). Для этого необходимо нажать кнопку «Повернуть» , и в командной строке на запрос «базовая точка», - указать центр сферы. Затем следует нажать «Копия», после чего указать «Шаг главных линий» - в нашем случае 15 градусов, после этого произвести те же самые действия со следующим отрезком и. так далее,

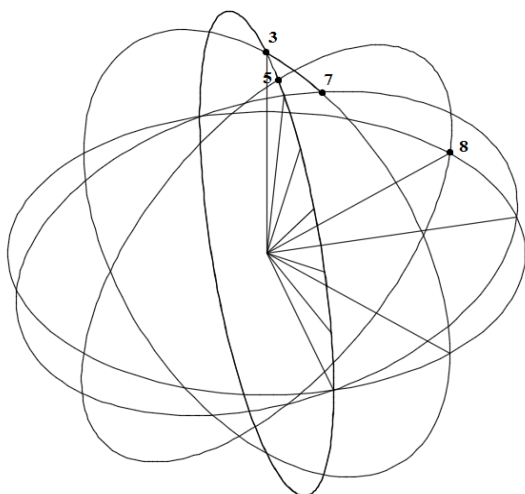



Рис. 2.5.

пока последующий отрезок не совпадет с отрезком 2. Необходимо также копировать отрезок один с поворотом на угол (15, 30, 45, 60, 75, 90 градусов), В конечном итоге должно получиться так, как показано на рисунке 2.5 прилож. 2.1.

Для дальнейших построений надо построить «отрезок 4», для этого нам

надо установить «Мировую систему координат» выделить «отрезок 1», нажать кнопку «Повернуть»  и в командной строке на запрос «базовая точка» указать центр сферы. Затем нажать «Копия» и после этого указать угол поворота 90 градусов. Так мы получаем «отрезок 4». Следующим этапом построим отрезок 5, по тому же принципу, только поворотом на 90 градусов «отрезка 3». Тем самым получаем точку 8, как показано на рисунке 5, прилож. 2. После этого необходимо построить окружность 5, ее плоскость перпендикулярна плоскости окружности 3 и находится в плоскости образованной точками [0,0,0], точка 5, точка 6. Для построения окружности 5 необходимо задать ПСК, образованную точками точка 1, точка 5, точка 6, и провести окружность в этой плоскости с центром [0,0,0]. Следует радиусом указать точку 5 (прилож. 2, рис. 2.5).

Затем необходимо провести «окружность 6» единичного радиуса перпендикулярно «окружности 2», проходящую через центр основной сферы и середину дуги ограниченной точками 3 и 7 (прилож. 2, рис. 2.5).

Для данного построения необходимо установить ПСК по точкам 3,1,4, установить объектную привязку «Ближайшая», затем командой «Дуга» начертить дугу с центром в точке 1, длину установить точками 3, 7 и выбрать одну произвольную точку на окружности, ограниченной точками 3 и 7. После этого мы зададимся новой ПСК, которая будет определяться точками: 1, 8, и точкой, которая будет являться серединой дуги 3-7 (середину дуги следует задавать при помощи объектной привязки «Середина»)

Таким образом, мы получили точки 3 и 7. Они являются центрами окружностей, в которые в дальнейшем будет вписаны шестиугольники сети. На основе вписанных шестиугольников мы построим треугольные сети на сфере. Отрезки 3-5 и 5-7 являются радиусами 1-ой и 2-ой окружности сети соответственно. Вначале удаляем все ненужные для дальнейших построений линии, и приступаем к построению первой окружности сети. Для этого проведем отрезок 1-5 и отразим его зеркально относительно отрезка 1-3 в плоскости 3,1,2 и в плоскости 3,1,8 или в двух любых других плоскостях,


которым принадлежит отрезок 1-3. Таким образом мы получаем три точки окружности, которая лежит на поверхности сферы, затем необходимо задать новую ПСК, которая определяется тремя полученными точками, после этого командой «Окружность, три точки» построить первую окружность O_1 сети (рис. 2.16).


Следующим шагом приступаем к построению 2 окружности, лежащей на поверхности сферы, ее центр будет располагаться на пересечении окружности 2 (прилож. 2.1, рис. 2.5) и второй главной линии сферы, т.е. в точке 7. Для построения данной окружности нам необходимо задать новую ПСК, определяемую точками 1,7,8 и сделать зеркальное копирование отрезка 1-5 относительно отрезка 1-7. Так мы получим отрезок 1-8, где точка 8 является второй точкой окружности. Для построения окружности на поверхности сферы нам необходимо три точки, мы задаемся новой произвольной ПСК так, чтобы отрезок 1-7 лежал в ее плоскости, и делаем зеркальное копирование отрезка 1-5 или 1-8. Таким образом мы получаем три точки для построения второй окружности. Далее мы определяем новую ПСК получившимися точками и командой «Окружность, три точки» строим вторую окружность O_2 .

Аналогично строим третью окружность с центром в точке пересечения «окружности 3» (прилож. 2.1, рис. 2.5) и третьей главной линии. Далее задаемся новой ПСК, определенной следующими точками и зеркально копируем отрезок, чтобы получить вторую точку окружности. Таким образом мы получаем третью окружность, которая лежит на поверхности сферы.

Центр четвертой окружности, лежащей на поверхности сферы, находится в точке пересечения окружности O_2 и следующей главной линии. Построение производится аналогично построению второй окружности лежащей на поверхности сферы.

Точка центра следующей окружности лежит на пересечении следующей главной линии, перпендикулярной дуге-оси сектора сферы и окружности проходящей через центр второй окружности, лежащей на

поверхности сферы. и двух точках пересечения третьей и четвертой окружностей поверхности сферы. Далее для построения сектора из треугольной сети на сфере нам необходимо отразить зеркально получившиеся окружности таким образом, чтобы окружность O_1 и окружность O_2 остались на своем месте. Для этого зададимся новой ПСК и командой «Отразить зеркально» , получаем окружности (рис. 2.10 главы 2). Затем. точно также отображаем все окружности относительно плоскости окружности O_3 . Таким образом мы формируем сектор - лепесток сферы. По точкам пересечений окружностей строим вписанные в окружность шестиугольники, тем самым получая структуру сетчатого купола (рис. 2.12 главы 2).

Этап 3. Формирование треугольной сети оболочки. Командой  «Поворот» с копированием на 60 градусов получаем полную сферу. Удаляем все вспомогательные линии построения (рис. 2.12) и добавляем шестиугольники или фрагменты их для образования проемов в покрытии купола.

Координаты

Сектор с шагом	18	градусов через равные радиусы, большой радиус R=	10000	мм
----------------	----	--	-------	----

	X	Y	Z		X	Y	Z		X	Y	Z
1	0	0	0	15	4929,386	1803,364	1488,3	29	6840,008	2535,47	3159,99
2	1016,69	0	51,8174	16	4391,555	2535,466	1381,087	30	6278,224	3212,86	2910,47
3	2107,22	0	224,541	17	5776,317	0	2549,348	31	8645,845	0	5024,87
4	1558,00	899,513	163,156	18	6258,656	880,4812	2250,55	32	8347,047	880,481	4563,86
5	3090,17	0	489,435	19	5786,481	1756,376	2035,593	33	7964,407	1756,38	4213,52
6	2590,69	880,481	381,629	20	5183,653	2552,624	1838,269	34	7545,672	1047,39	3521,89
7	4041,09	0	852,891	21	7450,652	0	3330,084	35	7089,528	3212,86	3721,77
8	3557,62	880,481	695,804	22	7058,379	867,4721	2969,582	36	6546,537	3779,645	3453,46
9	3042,13	1756,38	637,278	23	6465,457	2153,861	2681,615	37	0	0	0
10	5024,87	0	1354,16	24	6160,43	2552,624	2547,939	38	0	0	0
11	4521,50	899,513	1126,06	25	5566,079	3213,577	2338,95	39	0	0	0
12	3988,69	1803,36	1008,99	26	8090,17	0	4122,147	40	0	0	0
13	5877,85	0	1909,83	27	7749,45	880,4812	3741,344	41	0	0	0
14	5436,134	880,4812	1652,95	28	7318,385	1803,364	3428,157	42	7150,519	3495,35	3945,86

Исходные данные

o1o5	2*oaA2	o5o13	o13o26	o26o43	o26a31	O31	o19c12	o1aA17	O16=O17
18	18	18	18	18	5,835299	0	5,835299	45	0

o1a2	o5a3	o5b6	O13a10	o26a21	o43a37	o9b6	o19c15	o33c28	o52c45o1o5
9	5,835299	5,835299	5,835299	5,835299	5,835299	5,835299	5,835299	5,835299	5,835299

o4a2	o4a3	o11a7	o22a17	o22a17	o11a10	o13b14	o5b6	O25	O36
6,051625	6,051625	6,051625	6,051625	6,051625	6,051625	5,835299	5,835299	30	30

O1	o1	x1	y1	z1	O9	O1A10	O7	O4=O5	O2=O3
0	0	0	0	0	30	0	0	30	0

$\alpha_{109} = \arctg(\tg \alpha_{105} / \cos 30^\circ) =$	33,69007	
$x_9 = R \cdot \sin \alpha_{109} \cos O_9$	4803,845	
$y_9 = R \cdot \sin \alpha_{109} \sin O_9$	2773,501	$y_5 = R \cdot \sin \alpha_{105} \sin O_5$
$z_9 = R \cdot (1 - \cos \alpha_{109})$	1679,497	$z_5 = R \cdot (1 - \cos \alpha_{105})$
$\alpha_{104} = \arctg(\tg \alpha_{1a2} / \cos 30^\circ) =$	17,19212	
$O_{4a2} = \arcsin(\sin \alpha_{104} \sin 30^\circ) =$	8,498781	
$x_4 = R \cdot \sin \alpha_{104} \cos O_4$	2559,77	
$y_4 = R \cdot \sin \alpha_{104} \sin O_4$	1477,884	
$z_4 = R \cdot (1 - \cos \alpha_{104})$	446,81	
$\alpha_{1a2} = \arctg(\tg(\alpha_{509}/2) / \cos 30^\circ) =$	9,276324	
$\alpha_{4a2} = \arccos(\cos \alpha_{1a2} \cos \alpha_{104} + \sin \alpha_{1a2} \sin \alpha_{104} \cos 30^\circ) =$		
$x_2 = R \cdot \sin \alpha_{1a2} \cos O_2$	1611,96	10,23469
$y_2 = R \cdot \sin \alpha_{1a2} \sin O_2$	0	
$z_2 = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1a2})$	130,7759	
$\alpha_{1a3} = \alpha_{105} - \alpha_{5a3} =$	20,72368	
$x_3 = R \cdot \sin \alpha_{1a3} \cos O_3$	3538,614	
$y_3 =$	0	
$z_3 = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1a3})$	647,0211	
$\alpha_{1b6} = \arccos(\cos \alpha_{5b6} \cos \alpha_{105} + \sin \alpha_{5b6} \sin \alpha_{105} \cos 60^\circ) =$		26,49171
$O_{1B6} = \arcsin(\sin \alpha_{5b6} \sin 60^\circ / \sin \alpha_{1b6}) =$	18,23747	
$x_6 = R \cdot \sin \alpha_{1b6} \cos O_{1B6}$	4236,613	
$y_6 = R \cdot \sin \alpha_{1b6} \sin O_{1B6}$	1395,998	
$z_6 = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1b6})$	1050,011	
$\alpha_{1a7} = \alpha_{105} + \alpha_{5a3} =$	39,27632	
$x_7 = R \cdot \sin \alpha_{1a7} \cos O_7$	6330,61	
$y_7 =$	0	

$$z7 = R * (1 - \cos \alpha_7) \quad 2258,981$$

$$\alpha_8 = \alpha_{18} = \arccos(\cos \alpha_5 \cos \alpha_{10} + \sin \alpha_5 \sin \alpha_{10} \cos 120) =$$

$$O_8 = O_{18} = \arcsin(\sin \alpha_5 \sin 120^\circ / \sin \alpha_8) = \quad 13,91982$$

$$x_8 = R * \sin \alpha_{18} \cos O_{18} \quad 5632,611 \quad 35,47183$$

$$y_8 = R * \sin \alpha_{18} \sin O_{18} \quad 1395,998$$

$$z_8 = R * (1 - \cos \alpha_{18}) \quad 1855,991$$

$$\alpha_{10} = \alpha_{13} - \alpha_3 = \quad 50,72368$$

$$x_{10} = R * \sin \alpha_{10} \cos O_{10} \quad 7741,019$$

$$y_{10} = \quad 0$$

$$z_{10} = R * (1 - \cos \alpha_{10}) \quad 3669,39$$

$$A_{10} O_{11} = A_3 O_{14} = \arcsin(\sin \alpha_4 \sin 30^\circ / \sin \alpha_{14}) = \quad 56,28036$$

$$\alpha_{11} = \arccos(\cos \alpha_{10} \cos \alpha_{10}) + \sin \alpha_{10} \sin \alpha_{10} \cos A_{314}) = \quad 45,62576$$

$$O_{11} = \arcsin(\sin O_{11} \sin A_{10} O_{11} / \sin \alpha_{11}) = \quad 11,93246$$

$$x_{11} = R * \sin \alpha_{11} \cos O_{11} \quad 6993,42$$

$$y_{11} = R * \sin \alpha_{11} \sin O_{11} \quad 1477,884$$

$$z_{11} = R * (1 - \cos \alpha_{11}) \quad 3006,58$$

$$O_{18} O_9 = 30 - O_{18} = \quad 11,76253$$

$$O_9 B_{60} = \arcsin(\sin \alpha_6 \sin O_{18} O_9 / \sin \alpha_{60}) =$$

$$O_9 C_{12} O_1 = 60 + 3 * O_9 B_{60} = \quad 163,0233$$

$$\alpha_{12} = \arccos(\cos \alpha_{19} \cos \alpha_{10} + \sin \alpha_{19} \sin \alpha_{10} \cos O_9 C_{12} O_1) =$$

$$O_{12} = 30 - O_{12} O_{16} = 30 - \arcsin(\sin \alpha_9 \sin O_9 C_{12} O_1 / \sin \alpha_{12}) = \quad 26,01559 \quad 42,63783$$

$$x_{12} = R * \sin \alpha_{12} \cos O_{12} \quad 6087,279$$

$$y_{12} = R * \sin \alpha_{12} \sin O_{12} \quad 2971,015$$

$$z_{12} = R * (1 - \cos \alpha_{12}) \quad 2643,5$$

$$\alpha_{14} = \arccos(\cos \alpha_{13} \cos \alpha_{10} + \sin \alpha_{13} \sin \alpha_{10} \cos O_{13} A_{10} B_{14}) =$$

$$O_{14} = \arcsin(\sin \alpha_{14} \sin 60 / \sin \alpha_{14}) =$$

$$x_{14} = R * \sin \alpha_{14} \cos O_{14} \quad 8144,009$$

$$y_{14} = R \cdot \sin \alpha_{1b14} \sin O_{14} \quad 1395,998$$

$$z_{14} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1b14}) \quad 4367,389$$

$$\alpha_{13\alpha_{19}} = \alpha_{5\alpha_9} = \arcsin(\sin \alpha_{1\alpha_9} \sin 30^\circ) = 16,10211 \quad x_{19} = R \cdot \sin \alpha_{1\alpha_{19}} \cos O_{19}$$

$$\alpha_{1\alpha_{19}} = \arccos(\cos \alpha_{13c_{19}} \cos \alpha_{1\alpha_{13}}) = 61,28949 \quad y_{19} = R \cdot \sin \alpha_{1\alpha_{19}} \sin O_{19}$$

$$O_{19O_{13}O_1} = \arccos((\tan \alpha_{19\alpha_{13}} / \tan \alpha_{1\alpha_{19}})) = 80,90256 \quad z_{19} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1\alpha_{19}})$$

$$O_{19O_{13}C_{15}} = 30 + 2 \cdot O_{9B6O_1} = 98,68219$$

$$O_{19O_1C_{15}} = O_{19O_{13}C_{15}} - O_{19O_{14}O_1} = 17,77962$$

$$O_{19} = \arccos((\tan \alpha_{1\alpha_{13}} / \tan \alpha_{1\alpha_{19}})) = 18,43495$$

$$\alpha_{1c_{15}} = \arccos(\cos \alpha_{1\alpha_{19}} \cos \alpha_{19c_{15}} + \sin \alpha_{1\alpha_{19}} \sin \alpha_{19c_{15}} \cos O_{19O_1C_{15}}) =$$

$$O_{1C_{15}O_{19}} = \arcsin(\sin \alpha_{19c_{15}} \sin O_{19O_1C_{15}} / \sin \alpha_{1c_{15}}) =$$

$$O_{15} = O_{19} + O_{15O_{19}O_1} = 21,99194 \quad 3,55699$$

$$x_{15} = R \cdot \sin \alpha_{1c_{15}} \cos O_{15} \quad 7356,5$$

$$y_{15} = R \cdot \sin \alpha_{1c_{15}} \sin O_{15} \quad 2971,015$$

$$z_{15} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1c_{15}}) \quad 3912,721$$

$$O_{1O_{15}O_{16}} = 30 - O_{15} \quad 8,008061$$

$$\alpha_{1\alpha_{16}} = \arctg(\tan \alpha_{1\alpha_{A7}} / \cos 30^\circ) = 49,10661$$

$$\alpha_{16c_{15}} = \arccos(\cos \alpha_{1\alpha_{16}} \cos \alpha_{1c_{15}} + \sin \alpha_{1\alpha_{16}} \sin \alpha_{1c_{15}} \cos O_{1O_{15}O_{16}}) = 7,070335$$

$$x_{16} = R \cdot \sin \alpha_{1\alpha_{16}} \cos O_{16} \quad 6546,537$$

$$y_{16} = R \cdot \sin \alpha_{1\alpha_{16}} \sin O_{16} \quad 3779,645$$

$$z_{16} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1\alpha_{16}}) \quad 3453,463$$

17)

$$\alpha_{1\alpha_{25}} = \arctg(\tan \alpha_{1\alpha_{13}} / \cos 30^\circ) = 63,43495$$

$$\alpha_{1\alpha_{17}} = \alpha_{1\alpha_{13}} + \alpha_{13\alpha_{10}} =$$

$$x_{25} = R \cdot \sin \alpha_{1\alpha_{25}} \cos O_{25} \quad 7745,967$$

$$x_{17} = R \cdot \sin \alpha_{1\alpha_{17}} \cos O_{25}$$

$$y_{25} = R \cdot \sin \alpha_{1\alpha_{25}} \sin O_{15} \quad 4472,136$$

$$y_{17} = 0$$

$$z_{25} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1\alpha_{25}}) \quad 5527,864$$

$$z_{17} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1\alpha_{17}})$$

$$\alpha_{1b_{18}} = \arccos(\cos \alpha_{1\alpha_{13}} \cos \alpha_{13\alpha_{10}} + \sin \alpha_{1\alpha_{13}} \sin \alpha_{13\alpha_{10}} \cos 120^\circ) =$$

$$64,93404$$

$$O_{18} = \arcsin(\sin \alpha_{1\alpha_2} \sin 60^\circ / \sin \alpha_{1b_{18}}) = 8,865427$$

$$\begin{aligned}x_{18} &= R \cdot \sin o_{1b18} \cos O_{18} & 8949,989 \\y_{18} &= R \cdot \sin o_{1b18} \sin O_{18} & 1395,998 \\z_{18} &= R \cdot (1 - \cos o_{1b18}) & 5763,387\end{aligned}$$

$$O_{1C12O16} = 30 - O_{12} = 3,98441$$

$$O_{16C12O9} = \arcsin(\sin O_{1C12O16} \sin o_{1c12} / \sin c_{12o16}) = 22,48131$$

$$O_{16C15O1} = 180 - \arcsin(\sin O_{1516} \sin o_{1c15} / \sin o_{16c15}) = 116,1091$$

$$O_{16D20O1} = O_{16C15O1} + 2O_{16C12O9} = 161,0717$$

$$o_{1d20} = \arccos(\cos o_{1o16} \cos o_{16d20} + \sin o_{16} \sin o_{16d20} \cos O_{16D20O1}) = 55,82923$$

$$O_{20} = 30 - \arcsin(\sin O_{16D20O1} \sin o_{16d20} / \sin o_{1d20}) = 27,2339$$

20)

$$D_{20O1O25} = 2,766103$$

$$o_{1a21} = o_{1o26} - o_{26a21} =$$

$$x_{20} = R \cdot \sin o_{1d20} \cos O_{20} \quad 7356,5$$

$$x_{21} = R \cdot \sin o_{1a21} \cos O_{25}$$

$$y_{20} = R \cdot \sin o_{1d20} \sin O_{20} \quad 3786,231$$

$$y_{21} = 0$$

$$z_{20} = R \cdot (1 - \cos o_{1d20}) \quad 4383,386$$

$$z_{21} = R \cdot (1 - \cos o_{1a21})$$

$$A_{21A17B27} = A_{10O1O11} = A_{3O1O4} = 56,28036$$

$$o_{1o22} = \arccos(\cos o_{1a21} \cos o_{22a21} + \sin o_{1a21} \sin o_{22a21} \cos A_{21A17O22}) = 75,67615$$

$$O_{22} = \arcsin(\sin A_{21A17O22} \sin o_{22a21} / \sin o_{1o22}) =$$

$$x_{22} = R \cdot \sin o_{1o22} \cos O_{22} \quad 9595,913 \quad 7,954047$$

$$y_{22} = R \cdot \sin o_{1o22} \sin O_{22} \quad 1340,77$$

$$z_{22} = R \cdot (1 - \cos o_{1o22}) \quad 7525,976$$

$$O_{19O5O1} = 2 \arccos \sqrt{\frac{\sin((o_{5o19} + o_{1o5} + o_{1o19})/2 - o_{1o5}) \sin(o_{5o19} + o_{1o5} + o_{1o19})/2}{\sin B_{o5o19} \sin o_{1o19}}}$$

$$O_{19C23O1} = O_{19O5O1} + O_{9C12O1} = 179,5848$$

$$o_{1c23} = \arccos(\cos o_{19c23} \cos o_{1o19} + \sin o_{19c23} \sin o_{1o19} \cos O_{19C23O1}) =$$

$$O_{19C23} = \arcsin(\sin O_{19C23O1} \sin o_{19c23} / \sin o_{1c23}) = 0,07098$$

$$O_{23} = O_{19} - O_{19C23} = 18,50593$$

$$x_{23} = R \cdot \sin o_{1c23} \cos O_{23} \quad 8942,6$$

$$y_{23} = R \cdot \sin o_{1c23} \sin O_{23} \quad 2993,181$$

$$z_{23} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1c23}) \quad 6672,723$$

24)

$$\alpha_{1o25} = \arccos((\tan \alpha_{1o13} / \cos 30^\circ) = \quad 63,43495 \quad \alpha_{16aA7} = \sin \alpha_{16} \sin 30 =$$

$$x_{25} = R \cdot \sin \alpha_{1o25} \cos \alpha_{25} \quad 7745,967 \quad \alpha_{1a17} = \alpha_{1o13} + \alpha_{16aA7} =$$

$$y_{24} = R \cdot \sin \alpha_{1o25} \sin \alpha_{25} \quad 4472,136$$

$$z_{25} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1o25}) \quad 5527,864$$

$$\alpha_{1o29} = \arccos(\cos \alpha_{29a17} \cos \alpha_{1a17}) =$$

$$\alpha_{29} = \arccos(\tan \alpha_{1a17} / \tan \alpha_{1o29}) =$$

$$x_{29} = R \cdot \sin \alpha_{1o29} \cos \alpha_{29}$$

$$y_{29} = R \cdot \sin \alpha_{1o29} \sin \alpha_{29}$$

$$z_{29} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1o29})$$

$$\alpha_{29o501} = 2 \arccos \sqrt{\frac{\sin((\alpha_{5o29} + \alpha_{1o5} + \alpha_{1o29})/2 - \alpha_{1o5}) \sin(\alpha_{5o29} + \alpha_{1o5} + \alpha_{1o29})/2}{\sin \alpha_{5o29} \sin \alpha_{1o29}}}$$

$$\alpha_{16c1209} = \arcsin(\sin \alpha_{1216} \sin \alpha_{1c12^\circ} / \sin \alpha_{12o16}) =$$

$$\alpha_{29d24} = \alpha_{16c15} = \arccos(\cos \alpha_{1o16} \cos \alpha_{1c15} + \sin \alpha_{1o16} \sin \alpha_{1c15} \cos \alpha_{16o1c15}) = \quad 7,070335$$

$$\alpha_{20o1o25} =$$

$$\alpha_{25o20} = \arccos(\cos \alpha_{1d20} \cos \alpha_{1o25} + \sin \alpha_{1d20} \sin \alpha_{1o25} \cos \alpha_{20o1o25}) = \quad 7,970291$$

$$\alpha_{25o20o1} = \arcsin(\sin \alpha_{20o1o25} \sin \alpha_{1d20} / \sin \alpha_{20o25}) = \quad 16,73559$$

$$\alpha_{13o25} = \arcsin(\sin \alpha_{1o25} \sin 30^\circ) = \quad 26,56505$$

$$\alpha_{25o13o1} = \arccos(\tan \alpha_{13o25} / \tan \alpha_{25}) = \quad 75,52249$$

$$\alpha_{25o24o1} = 2 \alpha_{25o13o1} - \alpha_{25o20o1} = \quad 134,3094$$

$$\alpha_{1d24} = \arccos(\cos \alpha_{1o25} \cos \alpha_{24o1} + \sin \alpha_{1o25} \sin \alpha_{24o1} \cos \alpha_{25o24o1}) = \quad 69,12926$$

$$\alpha_{1d24o25} = \arcsin(\sin \alpha_{25o24o1} \sin \alpha_{1d24} / \sin \alpha_{1d24}) =$$

$$\alpha_{24} = \alpha_{25} - \alpha_{1d24o25} = \quad 23,90431 \quad 6,095689$$

$$x_{24} = R \cdot \sin \alpha_{1d24} \cos \alpha_{24} \quad 8542,381$$

$$y_{24} = R \cdot \sin \alpha_{1d24} \sin \alpha_{24} \quad 3786,231$$

$$z_{24} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1d24}) \quad 6437,391$$

$$\alpha_{1o26} = \quad 90$$

$$\alpha_{26o27} = \alpha_{26o32} = \alpha_{33d34} = \alpha_{26a21} \quad 9,276324$$

$$x_{26} = R \cdot \sin \alpha_{1026} \cos \alpha_{26} \quad 10000$$

$$y_{26} = 0$$

$$z_{26} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1026}) \quad 10000$$

$$\alpha_{1b27} = \arccos(\cos \alpha_{1026} \cos \alpha_{26b27} + \sin \alpha_{1026} \sin \alpha_{26b27} \cos 60^\circ) = 85,37706$$

$$\alpha_{27} = \arcsin(\sin 60^\circ \sin \alpha_{26b27} / \sin \alpha_{1b27}) = 8,051057$$

$$x_{27} = R \cdot \sin \alpha_{1b27} \cos \alpha_{27} \quad 9869,224$$

$$y_{27} = R \cdot \sin \alpha_{1b27} \sin \alpha_{27} \quad 1395,998$$

$$z_{27} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1b27}) \quad 9194,02$$

$$\alpha_{16a7} = \arcsin(\sin \alpha_{16} \sin 30^\circ) = 22,20765$$

$$\alpha_{29C28O16} = 2 \times \alpha_{16C12a7} = 2 \arccos(\tan \alpha_{16a7} / \tan \alpha_{16}) = 138,5904$$

$$\alpha_{29C28a17} = \alpha_{16C12a7} - \alpha_{16C12O9} = 46,81388$$

$$\alpha_{29C28O1} = \alpha_{29C28O16} - \alpha_{29D24O1} = 131,031$$

$$\alpha_{29c28} = \alpha_{16c15} = 0,123401$$

$$\alpha_{1c28} = \arccos(\cos \alpha_{29c28} \cos \alpha_{1029} + \sin \alpha_{29c28} \sin \alpha_{1029} \cos \alpha_{29C28O1}) = 80,8309$$

$$\alpha_{1029C28} = \arcsin(\sin \alpha_{29C28O1} \sin \alpha_{29c28} / \sin \alpha_{1c28}) = 5,396851$$

$$\alpha_{29} = 22,91134$$

$$\alpha_{28} = \alpha_{29} - \alpha_{2928} = 17,51449$$

$$x_{28} = R \cdot \sin \alpha_{1c28} \cos \alpha_{28} \quad 9414,556$$

$$y_{28} = R \cdot \sin \alpha_{1c28} \sin \alpha_{28} \quad 2971,015$$

$$z_{28} = R \cdot (1 - \cos \alpha_{1c28}) \quad 8406,512$$

$$\alpha_{1029O25} = 30 - \alpha_{29} = 7,088663$$

$$\alpha_{25o29} = \arccos(\cos \alpha_{1029} \cos \alpha_{1025} + \sin \alpha_{1029} \sin \alpha_{1025} \cos \alpha_{1029O25}) = 14,32834$$

$$\alpha_{25O1029} = 2 \arcsin(\sin \alpha_{1013} / \sin \alpha_{1025}) = 151,045$$

$$\alpha_{25f30} = \alpha_{25d24} = 7,970291 \quad \alpha_{29f30} = \alpha_{16c15} = 7,070335$$

$$\alpha_{25O29F30} = 2 \arccos \sqrt{\frac{\sin((\alpha_{29o25} + \alpha_{25e30} + \alpha_{29e30})/2 - \alpha_{29e30}) \sin((\alpha_{29o25} + \alpha_{25e30} + \alpha_{29e30})/2)}{\sin \alpha_{29o25} \sin \alpha_{25e30}}}$$

$$O25O1F30 = O25O1O29 + O25O29F30 = 167,7806$$

$$o1f30 = \arccos(\cos o1o25 \cos o25f30 + \sin o1o25 \sin o25f30 \cos O25O1F30) = 71,2353$$

$$O1O3O25 = \arcsin(\sin O25O1F30 \sin o25f30 / \sin o1f30) = 1,776206$$

$$O30 = 30 - O1O3O25 = 28,22379$$

$$x30 = R \cdot \sin o1f30 \cos O30 = 8342,742$$

$$y30 = R \cdot \sin o1f30 \sin O30 = 4477,801$$

$$z30 = R \cdot (1 - \cos o1f30) = 6783,176$$

$$O25O36F30 = 180 - O25O1E30 = 12,21943$$

$$o1o36 = o36 = \arctan(\tan o1fA17 / \cos 30) = 49,10661$$

$$o25o36 = o1o36 - o1o25 = -14,3283$$

$$o36f30 = \arccos(\cos o25o36 \cos o25e30 + \sin o25o36 \sin o25e30 \cos O25O36E30) = 22,18094$$

$$x36 = R \cdot \sin o1o36 \cos O36 = 6546,537$$

$$y36 = R \cdot \sin o1o36 \sin O36 = 3779,645$$

$$z36 = R \cdot (1 - \cos o1o36) = 3453,463$$

$$o1o26 = 3 \cdot o1o3 = 90$$

$$x31 = R \cdot \sin o1a31 \cos O31$$

$$o1a31 = o1o26 + o26a31 = 99,27632$$

$$y31 = 0$$

$$o1b32 = \arccos(\cos o1o26 \cos o26a31 + \sin o1o26 \sin o26a31 \cos 120^\circ) =$$

$$94,62294$$

$$O32 = \arcsin(\sin O26B32O1 \sin o26a31 / \sin o1b32) =$$

$$8,051057$$

$$x32 = R \cdot \sin o1b32 \cos O32$$

$$9869,224$$

$$y32 = R \cdot \sin o1b32 \sin O32$$

$$1395,998$$

$$z32 = R \cdot (1 - \cos o1b32)$$

$$10805,98$$

$$o26o33 = o5o9 = 16,10211$$

$$o1o33 = \arccos(\cos o1o26 / \cos o5o9) = 90$$

$$y33 = R \cdot \sin o1o33 \sin O33$$

$$O33 = \arcsin(\sin o26o33 / \sin o1o33) =$$

$$z33 = R \cdot (1 - \cos o1o33)$$

$$16,10211$$

$$O29D34O1 = O29C28O1 + 2O16C12O9 = 175,9936$$

$$o1d34 = \arccos(\cos o1o29 \cos o29d34 + \sin o1o29 \sin o29d34 \cos 120^\circ) =$$

$$79,74398$$

$$O1O29O34 = \arcsin(\sin o26o33 / \sin o1 o33) = 16,10211$$

$$O34 = O1O29 - O1O29O34 = 6,809223$$

$$x34 = R \cdot \sin o1d34 \cos O34 = 9770,811$$

$$y34 = R \cdot \sin o1d34 \sin O34 = 1166,694$$

$$z34 = R \cdot (1 - \cos o1d34) = 8219,531$$

$$aA17o36 = \arcsin(\sin o1o36 \sin 30) = 22,20765 \quad x35 = R \cdot \sin o1f35 \cos O35$$

$$O36 O29O1 = \arccos(tg aA17o36 / tgo1o36) = 69,29519 \quad y35 = R \cdot \sin o1f35 \sin O35$$

$$o25o36 = o1o36 - o1o25 = -14,3283 \quad z35 = R \cdot (1 - \cos o1f35)$$

$$o25 d24 = 7,970291 \quad O25E30O36 = O25O36E30$$

$$O36F30O1 = \arcsin(\sin O25E30O36 \sin o25 d24 / \sin o36e30) = 4,458487$$

$$O36O1F35 = -O36O29O1 - O36E30O1 = 134,1319$$

$$o35 = \arccos(\cos o1o36 \cos o36f35 + \sin o1o36 \sin o36f35 \cos O36O1f35^\circ) =$$

$$O3536 = \arcsin(\sin O36O1O35 \sin o1o36e35 / \sin o1f35) = 17,26084 \quad 65,95289$$

$$O35 = 30 - O3536 = 12,73916$$

$$O36 G42O1 = O36O1F35 + O36E30O1 = 138,5904$$

$$o1g42 = \arccos(\cos o1o36 \cos o1o36g 42 + \sin o1f36 \sin o1o36g 42 \cos O36 G42O1^\circ) =$$

$$O1G42O36 = \arcsin(\sin O36 g 42O1 \sin o1o36g 42 / \sin o1 g 42) = 15,75116 \quad 66,91067$$

$$O42 = 30 - O4236 =$$

$$14,24884$$

$$X42 = R \cdot \sin o1g42 \cos O4 = 8915,948$$

$$y42 = R \cdot \sin o1g42 \sin O42 = 2264,17$$

$$z42 = R \cdot (1 - \cos o1 g42) = 6078,342$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица 3.1

Уравнения регрессии прочности древесины при сжатии вдоль волокон
от длительности нахождения в условиях повышенной влажности

№ п/п	Тип древесины	Вид модели	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации R^2
1	Береза	Линейная	$y = 86,465 - 2,319x$	0,9893
		Логарифмическая	$y = 84,624 - 4,9792\ln(x)$	0,9890
		Полиномиальная	$y = 87,802 - 3,6565x + 0,2675x^2$	0,9999
		Степенная	$y = 84,659x^{-0,0614}$	0,9864
		Экспоненциальная	$y = 86,621e^{-0,0287x}$	0,9916
2	Сосна	Линейная	$y = 65,755 + 1,157x$	0,1711
		Логарифмическая	$y = 65,856 + 3,5073\ln(x)$	0,3409
		Полиномиальная	$y = 52,288 + 14,619x - 2,6925x^2$	0,9122
		Степенная	$y = 65,744x^{-0,053}$	0,3564
		Экспоненциальная	$y = 65,601e^{0,0177x}$	0,1835
3	Ель	Линейная	$y = 70,465 + 0,657x$	0,0394
		Логарифмическая	$y = 69,915 + 2,7596\ln(x)$	0,1507
		Полиномиальная	$y = 52,927 + 18,195x - 3,5075x^2$	0,9373
		Степенная	$y = 69,77x^{-0,0398}$	0,1616
		Экспоненциальная	$y = 70,265e^{0,0098x}$	0,0454
4	Ясень	Линейная	$y = 104,4 - 3,959x$	0,7197
		Логарифмическая	$y = 100,58 - 7,6538\ln(x)$	0,5832
		Полиномиальная	$y = 97,563 + 2,8785x - 1,3675x^2$	0,7883
		Степенная	$y = 100,69x^{-0,0818}$	0,5944
		Экспоненциальная	$y = 104,87e^{-0,0422x}$	0,7312
5	Дуб	Линейная	$y = 73,935 - 0,927x$	0,3143
		Логарифмическая	$y = 72,706 - 1,3696\ln(x)$	0,1488
		Полиномиальная	$y = 66,348 + 6,6605x - 1,5175x^2$	0,9880
		Степенная	$y = 72,713x^{-0,0195}$	0,1533
		Экспоненциальная	$y = 73,984e^{-0,0131x}$	0,3200

Таблица 3.2

Тарировочные данные проволоки

этапы нагружения		Отсчеты по прибору для образцов проволоки при перемещениях 5 мм: мм/МПа					Ср знач.	Среднее кв. отклонения	Коэф-нт вариации	Знач. с вероятностью 0,95
Усилие, кГ	Напряжение, МПа	1	2	2	4	4				
50	26	11,69	11,67	11,66	11,74	11,68	11,68	10,45	0,895	11,10
100	51	10,51	10,65	10,58	10,57	10,59	10,58	9,432	0,891	10,05
150	77	9,90	9,55	9,46	9,47	9,46	9,568	8,707	0,910	9,090
200	102	8,44	8,47	8,42	8,44	8,49	8,452	7,554	0,894	8,029
250	126	7,36	7,35	7,43	7,39	7,37	7,380	6,592	0,893	7,011
300	153	6,33	6,34	6,39	6,32	6,35	6,346	5,669	0,893	6,029
350	177	5,27	5,23	5,27	5,23	5,28	5,256	4,707	0,896	4,993
400	204	4,24	4,22	4,23	4,36	4,29	4,268	3,805	0,892	4,055

Таблица 3.3

Сроки снятия отсчетов по прибору для моделей в г. Саранске, температура/влажность воздуха

Вид опытных материалов		Уровень напряжений в затяжках, Н/мм ² А= 19 мм ²					
Модели	Затяжки, раскосы	июль 2014 24/58	октябрь 2014 11/55	июль 2015 21/56	октябрь 2015 11/69	июль 2016 27/58	октябрь 2016
1	1-2	148,9	119,8	98,6	87,3	83,1	79,9
	2-3	148,5	119,2	98,9	87,2	83,6	79,4
	3-4	148,4	118,8	98,9	86,7	83,8	79,1
	Ср. знач.	148,0	119,4	98,8	87,1	83,5	79,5
1	1	127,3	97,0	86,2	78,8	75,0	68,8
	2	128,2	97,5	86,7	78,0	75,3	68,8
	3	128,8	96,8	86,9	77,6	75,4	69,1
	Ср.знач.	128,1	97,1	86,6	78,1	75,2	68,9

Таблица 3.4

Сроки снятия отсчетов для моделей в г. Геленджике

Вид опытных материалов		Уровень напряжений в затяжках, Н/мм ² А= 19 мм ²					
Моде ли	Затяжки, раскосы	июль 2014 29/78	октябрь 2014 14/59	июль 2015 27/68	октябрь 2015 22/68	июль 2016 28/67	октябрь 2016 22/68
2	7-8	170,1	136,2	119,7	106,4	77,8	68,7
	8-9	169,9	136,7	119,1	106,4	77,5	68,8
	9-10	169,8	136,3	119,1	106,8	77,4	69,3
	Ср. знач.	169,7	136,3	119,3	106,5	77,6	68,9
2	7	160,2	132,5	113,9	95,1	66,7	59,9
	8	160,4	132,9	113,0	95,6	67,1	59,5
	9	160,9	132,6	113,1	95,8	67,5	59,6
	Ср. знач.	160,5	132,7	113,3	95,5	67,1	59,7
3	13-14	139,8	119,7	97,7	86,5	60,9	53,4
	14-15	140,5	119,4	97,3	86,2	60,6	53,7
	15-16	141,7	119,0	97,0	86,0	60,1	52,9
	Ср. знач.	140,7	119,3	97,3	86,2	60,5	53,3
3	13	128,9	86,9	70,7	64,7	48,4	42,5
	14	128,4	86,7	70,3	65,2	48,2	42,6
	15	128,2	86,7	70,1	64,8	47,8	42,9
	Ср. знач.	128,5	86,8	70,4	64,9	48,1	42,7