**Дериглазов Олег Юрьевич**

**Разработка, конструирование и исследование деревянного ребристо-кольцевого купола с блоками жесткости и сборно-разборными узлами**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск-2007

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,

**Инжутов Иван Семенович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,

**Картопольцев Владимир Михайлович**

кандидат технических наук, доцент,

**Пуртов Вячеслав Васильевич.**

Ведущая организация **ОАО** «**ЦНИИПромзданий»**

Защита состоится «02» ноября 2007 г. в 1400 часов на заседании диссертационного совета Д 212.265.01 при ГОУ ВПО Томском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 634003 г. Томск, пл. Соляная, 2, 307/5.

Факс: (3822) 65-03-17, e-mail: tsuab@sibmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Автореферат разослан «28» сентября 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Скрипникова Н.К.

**Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** Общеизвестно, что пространственные конструкции на основе древесины более эффективны по сравнению с плоскостными. Они конкурентоспособны и по сравнению с аналогичными конструкциями одного класса из других традиционных материалов. Легкость конструкций из дерева дает возможность (при равенстве суммарного веса) перевезти их в пятнадцать раз больше по сравнению с металлическими, а, следовательно, в пятнадцать раз сократить расходы на эти цели.

Одними из наиболее распространенных пространственных конструкций с применением древесины являются ребристо-кольцевые купола. Купольные покрытия из сборных деревянных элементов удачно сочетают в себе архитектурную выразительность и эффективность пространственных конструкций с технологичностью арочных. Между тем, широкое внедрение куполов сдерживается отсутствием или недостаточной проработкой в нормативной, научно-технической и справочной литературе указаний и рекомендаций по конструированию и расчету таких конструкций. Также не имеется обстоятельных исследований куполов с учетом изменения физико-механических свойств древесины в процессе эксплуатации, обусловленных существенной податливостью в узловых соединениях конструкций, изменчивостью прочности и деформативности древесины в зависимости от длительности действия нагрузки, физической нелинейностью древесины.

Задачи повышения надежности, прочности и долговечности конструкций и сооружений, эффективного их использования, снижения материалоемкости и стоимости во все времена остаются важнейшей целью строительной отрасли.

Поэтому разработка, исследование и совершенствование купольных конструкций на основе древесины не только актуальны, но и определяют новизну.

**Объект исследования:** деревянный ребристо-кольцевой купол с блоками жесткости.

**Предмет исследования:** конструкторские особенности и напряженно-деформированное состояние деревянного ребристо-кольцевого купола.

**Цель работы:** разработка, конструирование и исследование деревянного ребристо-кольцевого купола с блоками жесткости и сборно-разборными узлами, отвечающими требованиям быстрого монтажа и демонтажа, оценка влияния податливости узлового соединения, длительности действия нагрузки и физической нелинейности древесины.

**Задачи исследования:**

* обобщить и проанализировать опыт конструкторских разработок в направлении предпринятых автором исследований;
* разработать новую конструктивную форму ребристо-кольцевого купола с блоками жесткости;
* разработать новые технические решения узлов для полученной конструктивной формы купола, обладающие надежностью, экономичностью, отвечающие требованиям быстрого монтажа и демонтажа;
* провести численный эксперимент для исследования напряженно-деформируемого состояния ребристо-кольцевого купола с использованием программных комплексов «SCAD» и «ЛИРА»;
* провести физический эксперимент по исследованию пролетного узла ребристо-кольцевого купола, выполненного в натуральную величину, с целью изучения характера его работы и проверки достоверности численного эксперимента;
* разработать рекомендации по расчету, конструированию и изготовлению деревянных ребристо-кольцевых куполов с блоками жесткости и сборно-разборными узлами;
* осуществить внедрение результатов исследований в практику проектирования и строительства.

**Методология работы.**

Физический эксперимент выполнялся с использованием современного аттестованного измерительно-вычислительного оборудования в лаборатории деревянных конструкций при Томском государственном архитектурно-строительном университете и в лаборатории испытания строительных конструкций Института архитектуры и строительства Сибирского федерального университета, что обеспечило необходимую достоверность полученных результатов.

**Научная новизна работы:**

* обоснована и исследована новая конструктивная форма ребристо-кольцевого купола с блоками жесткости (новизна подтверждена патентом РФ на изобретение №2298618);
* предложены и исследованы новые варианты узловых соединений купола;
* разработана расчетная модель конструкции ребристо-кольцевого купола с блоками жесткости;
* оценены влияния податливости узлового соединения, длительности действия нагрузки и физической нелинейности древесины на напряженно-деформированное состояние ребристо-кольцевого купола с блоками жесткости.

**Практическая значимость работы:** разработаны до стадии альбомов рабочих чертежей конструкции ребристо-кольцевых куполов с блоками жесткости, выполненных из цельной древесины для пролетов от 9 до 36 м, обладающие прочностью, надежностью и долговечностью, а также мобильностью и малой массой, применяемые для быстровозводимых зданий. Предложены рекомендации по формообразованию, конструированию, расчету, изготовлению, сборке и монтажу ребристо-кольцевых куполов, позволяющие снизить материалоёмкость, трудоёмкость изготовления и стоимость «в деле» по сравнению с известными типовыми решениями.

**Достоверность** теоретических положений, расчетных и физических моделей, обоснованность выводов обеспечивается корректностью поставленных задач и использованием общепринятых в механике твердого деформированного тела и строительной механике гипотез и допущений. Сравнение результатов численного эксперимента, выполненного посредством ВК «ЛИРА, лицензия №521821425» и «SCAD, лицензия №2E2DDBFB», подтверждаются хорошим согласованием с данными, полученными в ходе физического эксперимента.

**Реализация результатов диссертационной работы:**

Результаты исследований использованы при проектировании реальных конструкций разработанного ребристо-кольцевого купола в Красноярском «Гражданпроекте», ОАО «Томскводпроекте», ООО СП «Рекон» (г. Томск), ООО «Сибирской строительной компании – ТМ» (г. Томск).

**Личный вклад диссертанта** состоит:

* в разработке конструктивной формы ребристо-кольцевого купола с блоками жесткости;
* в разработке технических решений сборно-разборных узлов купола;
* в разработке методики и проведении численного эксперимента ребристо-кольцевого купола с блоками жесткости;
* в разработке методики и проведении численного и физического экспериментов пролетного узла ребристо-кольцевого купола.

**На защиту выносятся:**

* Разработанное автором конструктивное решение ребристо-кольце-вого купола с блоками жесткости и сборно-разборными узлами;
* методика и результаты численных экспериментов по исследованию НДС разработанного купола с учетом влияния податливости узлового соединения, длительности действия нагрузки и физической нелинейности древесины;
* результаты натурного испытания пролетного узла ребристо-кольце-вого купола пролетом 12 м;
* рекомендации по проектированию, изготовлению, сборке и монтажу деревянных ребристо-кольцевых куполов с блоками жесткости.

**Апробация работы.**

Материалы диссертации были доложены, обсуждены и получили положительную оценку: на научно-технических конференциях НГАСУ (Новосибирск, 2005-2006 гг.), на региональных научно-технических конференциях «Проблемы строительства и архитектуры» (Красноярск, 2005-2007 гг.), на Международном симпозиуме «Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс» (Одесса, 2006 г.), на Международной научно-технической конференции молодых ученых (аспирантов, докторантов) «Актуальные проблемы современного строительства» (Санкт-Петербург, 2007 г.).

**Публикации.**

По материалам диссертационных исследований получен 1 патент РФ на изобретение, опубликованы 1 авторская (3 стр.) и 1 соавторская (8 стр.) статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Всего по теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

**Объем и структура диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, рекомендаций, общих выводов, списка литературы из 171 наименования, в том числе 25 наименований на иностранных языках. Общий объем работы 183 страницы, 84 рисунка, 9 таблиц.

**Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность проводимых исследований, дана краткая характеристика состояния вопроса, сформулирована цель работы, раскрыта её научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

Отмечается, что проблемами совершенствования конструкторских решений, расчетами и исследованиями различных видов соединений элементов посвящены работы многих ученых: В.А. Большакова, П.А. Дмитриева, А.А. Журавлева, Е.М. Знаменского, Г.Н. Зубарева, В.Ф. Иванова, И.С. Инжутова, Г.Г. Карлсена, М.Е. Когана, В.Г. Котлова, В.М. Коченова, Л.Р. Куправа, Б.В. Лабудина, Б.К. Михайлова, В.А. Освенского, В.В. Пуртова, К.П. Пятикрестовского, Ю.В. Слицкоухова, В.В. Стоянова, А.В. Туркова и др. Вопросы изучения изменения физико-механических свойств древесины в процессе эксплуатации и длительности действия нагрузки рассмотрены в трудах В.В. Быкова, С.М. Ванина, Е.Н. Квасникова, Р.Б. Орловича, Е.М. Панюжева, Л.М. Перелыгина, А.В. Прыгункова, Е.Н. Серова, В.А. Цепаева, В.В. Фурсова и др.

**В первой главе** приведен краткий исторический обзор развития купольных конструкций в мировой и отечественной практике. Автором отмечается какие величайшие купольные конструкции были построены. Из них выделяется купол Пантеона, это самый большой купол в мире XIX века, его диаметр 43,5 м. Среди сооружений новейшего времени, особенно замечательными по своей величине, искусной конструкции и изяществу являются купола московского храма Христа Спасителя и петербургского Исаакиевского собора.

Анализ современных конструктивных решений купольных покрытий с применением древесины показывает, что наиболее широкое распространение в гражданском и промышленном строительстве получили ребристо-кольцевые купола. Конструктивные решения таких куполов можно представить следующими примерами. Спортивный зал с деревянным куполом в Монтана (США), пролет которого 91,5 м, высота 15,3, основными несущими элементами которого являются меридиональные арки – ребра. Уникальное здание Олимпийского тренировочного комплекса в Такома (США) с деревянным куполом диаметром 256 м является самым крупным в мире по размеру пролета из клееной древесины.

Также в первой главе приводятся области рационального применения сборных деревянных куполов, и дается обзор методов расчета ребристо-кольцевых куполов.

**Во второй главе** приведен анализ формообразования, приведен пример реализации положений в разработке ребристо-кольцевого купола пролетом 12 м с различными конструктивными решениями узловых сопряжений.

При разработке опытной конструкции автор исходил из целесообразности, необходимости и возможности: использовать рациональную конструктивную форму; эффективно использовать свойства применяемых в конструкциях материалов; руководствоваться принципом упрощения конструктивной формы при одновременном уменьшении общей массы конструкции; создать сборно-разборную конструкцию с отсутствием врубок, подтесок и т.п.; конструировать узлы с учетом требований скоростного монтажа и демонтажа, многократного использования, транспортабельности конструкций, мобильности; наделить конструкцию высокими эстетическими качествами; простотой устройства проемов – ворот, дверей, окон; выполнения конструкции и из других современных материалов и изделий; обеспечения пространственной работы купольной конструкции постановкой системы связей.

Обоснованию выбора геометрической схемы купола автор уделил особое внимание, поскольку именно от этого зависят число типоразмеров элементов, конструкция узлов сопряжения, способы изготовления и монтажа элементов и, в конечном итоге, эффективность и надежность конструкции.

Предложенная новая (патент РФ на изобретение №2298618) конструктивная форма купола, которая базируется на синтезе наилучших свойств двух систем разрезки: меридионально-кольцевой и звездчатой.

Суть меридионально-кольцевой системы разрезки заключается в членении поверхности вращения меридиональными и параллельными плоскостями на треугольные (у полюса) и трапециевидные элементы (рис. 1).

а)

б)

|  |  |
| --- | --- |
|   |  |

Рис. 1. Меридионально-кольцевая разрезка (а) и разрезка сферы двумя пучками меридиональных плоскостей с взаимно перпендикулярными осями (б)

К достоинствам этой системы, по мнению автора, следует отнести простоту формы и исполнения узловых сопряжений элементов. К очевидным недостаткам можно отнести неэффективность работы при воздействии несимметричных нагрузок, что может быть устранено в многосвязной системе, например, в системе звездчатого типа.

При выполнении звездчатой системы разрезки (рис. 2) на сферический сегмент наносится сеть меридианов. Каждый полученный участок делится четырехугольными ячейками таким образом, чтобы два противоположных узла ячейки располагались на одном меридиане, а два других – на одной параллели.

б)

а)

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Рис. 2. Звездчатая система: а – на основе сети Чебышева; б – на основе сети локсодромий

К недостаткам звездчатой системы можно отнести достаточно большое количество стержней, сходящихся в узле, что приводит к существенному усложнению конструкции узловых элементов.

Предложенная автором шахматная система разрезки (рис. 3) устраняет основной недостаток звездчатой системы – сгущения сетки, и в тоже время, обладает прочностью и жесткостью при действии несимметричных нагрузках. Жесткость конструкции придают раскосы, образующие ромб (блок жесткости), который располагается в плоскости трапециевидных секций купола и раскрепляет их своими вершинами середины длин, тем самым разгружая сходимость элементов в узле и уменьшая расчетную длину меридиональных и кольцевых стержней.

Рис. 3. Шахматная система разрезки

Использование адресной установки блоков жесткости позволяет, в первую очередь, исключить из общей работы большое количество малонагруженных связей, достичь экономии материала на изготовление купола, а также снизить его массу, что является весьма актуальным, в частности, для сейсмоопасных районов. Помимо этого значительно снижается трудоемкость, т.к. чем меньше связей, тем проще возвести купол.

В качестве примера реализации шахматной системы разрезки купола автором был разработан до стадии альбома рабочих чертежей деревянный ребристо-кольцевой купол с блоками жесткости, расставленными в шахматном порядке (рис. 4).

Рис. 4. Деревянный ребристо-кольцевой купол с блоками жесткости, расставленными в шахматном порядке

Ребристо-кольцевой купол имеет вид сегмента, вписанного в сферу радиусом 12 м и высотой 4 м. Отношение стрелы подъема к пролету купола составляет 1:3. Площадь купола составляет 113 м2. Объем внутреннего пространства составляет 235 м3. Купол образован двенадцатью меридиональными ребрами (каждое ребро образовано тремя панелями), тремя кольцами прогонов, сорока восьмью раскосами. В целях унификации панели всех меридиональных ребер имеют длину в осях 2,5 м. Меридиональные ребра располагаются на сфере с углом поворота 30O.

Соединение меридиональных ребер в верхней точки купола происходит при помощи верхнего опорного кольца (рис. 5, а). Верхнее опорное кольцо принято металлическим, состоящим из трубы и усилено приваренным листом железа. Диаметр верхнего опорного кольца принимался конструктивно минимальным, равным 450 мм.

|  |  |
| --- | --- |
| б)а) |  |

Рис. 5. Опорные элементы: а – верхнее опорное кольцо; б – нижний опорный элемент

Опирание нижнего опорного кольца и меридиональных ребер на нижележащие конструкции происходит с использованием нижнего опорного элемента (рис. 5, б), который в рассматриваемом случае состоит из опорной металлической площадки, на которую опирается отрезок трубы.

Покрытие купола предусмотрено из сборных утепленных панелей с креплением в узлах каркаса купола.

С точки зрения автора, одной из основных технических задач при конструировании узловых сопряжений куполов является создание наконечников, которые бы обеспечивали простоту соединения деревянных стержней с узловыми элементами и были бы способны воспринимать усилия сжатия и растяжения, возникающие от внешних нагрузок. Так как задачей является создание сборно-разборных конструкций, то в качестве наконечников деревянных стержней рационально использовать изделия из металла.

Анализ научно-технической литературы свидетельствует о том, что до настоящего времени проблема поиска эффективных решений сопряжения стержней многоугольных ребристо-кольцевых куполов остается актуальной.

Ниже изображено одно из ряда разработанных автором решений наконечника стержней, представляющее наибольший технический интерес. Данный наконечник (РКК-12-СРД3) служит для образования сборно-разборных узлов деревянного ребристо-кольцевого купола пролетом 12 м (рис. 6).

Рис. 6. Техническое решение наконечника РКК-12-СРД3: 1 – узловой элемент; 2 – шаровая опора; 3 – деревянный стержень; 4 – болт; 5 – упорное кольцо; 6 – Г-образная пластина; 7 – шпилька; 8 – хомут

В представленном техническом решении наконечника РКК-12-СРД3 обеспечена возможность регулировки длины элемента в осях при сборке и в период эксплуатации, вкручивая или выкручивая болт (4). Так же данное решение наконечника позволяет исключить возможность возникновения изгибающих моментов UX, UY, UZ в стержне за счет использования шаровых опор (2), что для пространственных стержневых конструкций является весьма важным.

Предлагаемая конструкция ребристо-кольцевого купола применяется в зданиях различного назначения, в том числе в сельской местности - в культурно-бытовых, производственных, складских одноэтажных зданиях и сооружениях. В гражданском строительстве целесообразно применение разработанного деревянного ребристо-кольцевого купола в покрытии залов, общественных зданий, выставочных павильонов, рынков, зданий физкультурно-оздоровительных комплексов, в малоэтажном домостроении. В промышленном строительстве деревянные ребристо-кольцевые купола могут применяться в одноэтажных отапливаемых и неотапливаемых зданиях

Таблица 1. Показатели расхода основных материалов ребристо-кольцевых куполов с различными конструктивными решениями меридиональных арок

|  |  |
| --- | --- |
| Схема и тип купола | Расход материалов на купол / на 1 м2 |
| Древесина, м3 | Сталь, кг |
|  | Многоугольный из цельных брусьевРКК-12-СРД1 РКК-12-CРД2 РКК-12-СРД3 | 1,960,017 | 10809,59708,69528,4 |
|   |  Конический из прямолинейных клееных балок | 2,610,023 | 8817,8 |
|  | Сферический из гнутоклееных балок | 2,520,022 | 8817,8 |

В табл. 1 приведены данные по расходу основных материалов разработанного купола пролетом 12 м с тремя различными видами наконечников, а также в качестве сравнительного примера представлен расход древесины и стали ребристо-кольцевых куполов с традиционными конструктивными решениями меридиональных арок на 1 м2 плана (для IV снегового района). Из данных табл. 1 следует, что в куполах с многоугольными ребрами расход древесины меньше на 28-33% при перерасходе металла на 8%. Однако, следует иметь в виду, что стоимость прямолинейных клееных элементов в 5-6 раз дороже неклееной древесины, а стоимость криволинейных клееных элементов на 30% выше, чем прямолинейных клееных.

**В третьей главе** приведены результаты численного эксперимента и оценка напряжённо-деформированного состояния разработанного ребристо-кольцевого купола с блоками жесткости с учетом влияния податливости узлового соединения, длительности действия нагрузки и физической нелинейности древесины.

Задачи численного эксперимента являлись следующее: изучить с использованием вычислительных комплексов «SCAD» и «Лира» НДС деревянный ребристо-кольцевой купол с блоками жесткости с учетом влияния податливости узлового соединения; исследовать влияние схемы расстановки блоков жесткости на НДС куполов с контрастными схемами; выявить зависимость деформаций и усилий исследуемого купола при длительных нагрузках; выявить зависимость деформаций и усилий исследуемого купола с учетом физической нелинейности древесины.

Объектом численного эксперимента являлся деревянный ребристо-кольцевой купол с блоками жесткости, расставленными в шахматном порядке пролетом 24,0 и высотой 6,0 м, образованный шестнадцатью меридиональными ребрами, пятью кольцами прогонов, тридцатью двумя раскосами. Панели меридиональных ребер имели длину 2,73 м. Сечения всех элементов равны d = 120 мм.

Элементы расчетной схемы моделировались для признака схемы № 5 (шесть степеней свободы в узле). В качестве конечного элемента был выбран универсальный пространственный стержень КЭ-10, имеющий возможность располагаться в плоскости произвольно. Узлы ребристо-кольцевого купола в расчетной схеме принимались шарнирными.

Напряженно-деформированное состояние ребристо-кольцевого купола изучалось по пространственной схеме от действия сосредоточенных сил, приложенных в узлы сходимости меридиональных и кольцевых элементов. Расчет выполнялся для двух схем загружения:

- полная нагрузка (снеговая для IV района и постоянная) приложена симметрично к куполу;

- постоянная нагрузка приложена симметрично по всей поверхности купола, а снеговая – несимметрично.

Заметим, что наибольшие значения несимметричных снеговых нагрузок прикладывались в четверти пролета купола.

Расчет узловых соединений конструкций на основе древесины проводили по деформируемой схеме с использованием условного модуля деформативности Еy.

Условный модуль деформативности вычислялся в соответствии с методикой, разработанной И.С. Инжутовым, А.Ф. Рожковым по формуле

|  |  |
| --- | --- |
| , | (1) |

где Е – исходный модуль упругости; δ – расчетное предельное значение деформаций податливости, принимаемое в зависимости от предельной деформации узлового соединения (на лобовых врубках и торец в торец - 1,5 мм; на нагелях всех видов - 2,0 мм; в примыканиях поперек волокон - 3,0 мм); l – длина стержня, м; kкр – коэффициент учитывающий кратковременность действия нагрузки, при кратковременной нагрузке kкр = 0,5, при длительной - kкр = 1; Rсм - расчетное сопротивление древесины местному смятию.

Заметим, что в этом методе условный модуль деформативности стержня не зависит от величины продольного усилия и площади поперечного сечения элемента.

Длительный модуль упругости, зависящий от влажности древесины и длительности эксплуатации конструкций с учетом развития деформаций последействия, рассчитывался в соответствии с методикой, разработанной В.А. Цепаевым по формуле

|  |  |
| --- | --- |
| , | (2) |

где - кратковременный модуль упругости, определяемый для древесины хвойных пород с влажностью ω (%); - коэффициент длительной деформативности при действии неизменной нагрузки в течение всего срока службы конструкций.

Учет в расчетах неупругих деформаций древесины позволяет выявить дополнительные резервы несущей способности конструкции. В основу современных расчетов строительных конструкций положены диаграммы деформирования конструкционных материалов.

Автором были проведены экспериментальные исследования стандартных образцов древесины сосны при растяжении и сжатии. Всего испытано по 10 образцов для каждого вида напряженного состояния. Эксперименты проведены в разрывной машине Р-5 на действие статической нагрузки. Деформации образцов измерялись посредством тензометрических преобразователей. Измерения проведены в реальном масштабе времени расчетно-измерительным комплексом.

Результаты экспериментов представлены в виде диаграмм растяжения и сжатия на рис. 7.

Рис. 7. Диаграмма σ–ε для стандартных образцов древесины сосны при растяжении и сжатии вдоль волокон

Предел пропорциональности при сжатии составил βDP = 15 МПа. Соответствующие деформации εс = 15∙10-4. Сжатые образцы разрушены напряжением σс.max = 32,3 МПа. При растяжении упругие деформации не превысили εр = 35∙10-4.

Полученные диаграммы работы образцов были аппроксимированы и представлены в виде уравнений.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| сжатие  |  | (3) |
| растяжение |  | (4) |

Неизвестными х1 и х2 приняты значения точек аппроксимации, расположенных по оси абсцисс, εс и εр – соответствующие им полученные деформации для сжатия и растяжения.

Физическую нелинейность учитывали предложенным автором коэффициентом относительных напряжений *k*, отражающим запас несущей способности конструкции при возможном увеличении временной нагрузки или при уменьшении расчетного сечения стержней

|  |  |
| --- | --- |
| , | (5) |

где σi – значения сжимающих напряжений, для сжатых и растянутых стержней; Rн – нормативное значение расчетного сопротивления.

Физически нелинейный модуль упругости Еф, определяемый для области неупругих деформаций вследствие учета коэффициента относительных напряжений *k*, определялся по формулам

|  |  |
| --- | --- |
|  - сжатие , | (6) |
|  - растяжение , | (7) |

где σс,i, σр,i – значения сжимающего напряжения в i-точке кривой диаграммы σ–ε для сжатых и растянутых стержней соответственно; εс,i, εр,i –деформации для i-точки кривой диаграммы σ–ε для сжатых и растянутых стержней соответственно; Ni – возникающее в стержнях купола продольное усилие; ϕ коэффициент продольного изгиба; F площадь поперечного сечения элемента с учетом его ослабления.

Результаты исследования показали, что при действии симметричной статической нагрузки напряженно-деформированное состояние панелей меридиональных ребер не зависит от количества и месторасположения блоков жесткости.

При исходном модуле упругости и несимметричном статическом нагружении купола наибольшие расчетные значения перемещений узлов составили 1/900 диаметра купола.

Учет податливости узловых соединений приводит к увеличению расчетных значений перемещений узлов до 1/760 диаметра купола.

Учет длительности действия нагрузки приводит к дальнейшему увеличению расчетных значений перемещений узлов до 1/580 диаметра купола.

Учет коэффициента относительных напряжений, который в нашем случае принимался равный k=2,15, и физически нелинейного модуля упругости позволяют увеличивать расчетные значения перемещения узлов до 1/330 диаметра купола.

Сопоставляя картину деформирования куполов с контрастными схемами расстановки блоков жесткости (блоки жесткости отсутствуют РК-1; блоки жесткости расположены в шахматном порядке по поверхности полусферы РК-2; блоки жесткости расположены по всей поверхности полусферы РК-3), установлено, что разница значений нормальных усилий для всех трех схем куполов находится в пределах 13%. При установке блоков жесткости во все ярусы и секции купола (схема РК-3) расчетные значения перемещений узлов достигают 1/2600 диаметра; при схеме РК-2 – 1/760 диаметра; при схеме РК-1 – 1/40 диаметра купола.

**В четвертой главе** приведена методика численного и физического экспериментов по исследованию НДС пролетного узла ребристо-кольцевого купола, выполненного в натуральную величину, с техническим решением наконечника РКК-12-СРД3.

Для проведения физического эксперимента была разработана и использована установка, предназначенная для испытания пролетного узла ребристо-кольцевого купола в лабораторных условиях на усилия сжатия и растяжения (рис. 8).

Рис. 8. Схема обозначения основных элементов испытательной установки: 1 – силовой пол; 2 – швеллер №1; 3 – швеллер №2; 4 – панель меридионального элемента; 5 – панель кольцевого элемента; 6 – домкрат; 7 – силоизмерительный датчик (динамометр); 8 – опорный башмак (для сжатых элементов); 9 – опорный башмак (для растянутых элементов); 10 – узловой элемент

Конструкция была подвергнута испытаниям статической нагрузкой. Интенсивность нормативной нагрузки, сосредоточенно приложенной вдоль оси стержней меридиональных элементов, составляет 20 кН. Нагрузку создавали при помощи механических 5 т домкратов и контролировали ее силоизмерительными датчиками (рис. 9, а).

Перед основным испытанием конструкции проводилось пробное загружение, принимаемое 10% от нормативной нагрузки, которое позволяло проверить правильность установки приборов и их способность измерять деформации, удобство осуществления загрузки конструкции, согласованность работы членов испытательной бригады.

В ходе эксперимента величину испытательной нагрузки делили на десять частей. Величину ступени нагрузки принимали равной 10% или 2 кН от нормативной. После приложения каждой ступени нагружения конструкция выдерживалась под нагрузкой 10 мин, время контролировалось секундомером.

В ходе эксперимента измеряли:

* вертикальные перемещения узла при помощи датчика перемещений с тензорезистивной схемой измерения (рис. 9, б);
* горизонтальные перемещения узла при помощи отвеса и жестко закрепленных на основании стенда миллиметровых линеек по направлению Х и Y;
* напряжения в элементах с помощью проволочных тензорезисторов типа КФ с базой 20 мм и 10 мм (для деревянных и стальных элементов соответственно). В качестве регистрирующего устройства использовали измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) MIC-400, заводской № 40104, который имеет сертификат об утверждении типа средств измерений RU.С.34.010.А № 9569 ГОССТАНДАРТа России.

б)

а)

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Рис. 9. Измерительные датчики: а) силоизмерительный; б) перемещений

Силоизмерительные датчики и датчики перемещений разработаны в лаборатории автоматизации эксперимента при кафедре ЖБиКК ТГАСУ.

Всего в испытании узла было использовано: тензорезисторов – 20, датчиков вертикальных перемещений – 1, отвесов – 5, силоизмерительных датчиков – 2.

Для построения расчетной модели с действительными упругими механическими характеристиками цельной древесины были произведены испытания стандартных образцов. В результате эксперимента были определены значения модулей упругости, которые составили: вдоль волокон – 9820 МПа; поперек волокон – 385 МПа.

Численный эксперимент по определению НДС пролетного узла ребристо-кольцевого купола выполнялся с учетом полученных действительных механических характеристик древесины и податливости соединений посредством вычислительных комплексов «SCAD» и «Лира».

В численном эксперименте автор счел необходимым учесть возможные неблагоприятные факторы, которые могут возникать вследствие технологических допусков. Неблагоприятные факторы (эксцентриситеты, возникающие в результате расцентровки осей стержней в узле) моделировались в расчетной схеме жесткими вставками. Величина жесткой вставки принималась равной 4 мм по ГОСТ 21779-82 для 6 класса точности.

Жесткостные характеристики для древесины в расчетной схеме были приняты следующие: условный модуль деформативности, полученный по формуле (1), значение которого составило Еy = 5557 МПа, коэффициент Пуассона принимался μ = 0,5, плотность древесины ρ = 5,5 кН/м3.

**В пятой главе** изложен анализ результатов численного и физического экспериментов. Дана оценка технологичности изготовления натурной конструкции. Выполнена оценка несущей способности и деформативности разработанного пролетного узла ребристо-кольцевого для купола пролетом 12 м с учетом неблагоприятных факторов.

Изготовление, сборка и монтаж пролетного узла купола выполненного в натуральную величину подтвердили технологичность принятого конструктивного решения и соответствие конструкции скоростному монтажу и демонтажу.

Выполненный численный эксперимент пролетного узла ребристо-кольцевого купола позволил выявить, что начальные эксцентриситеты влияют на значения расчетных перемещений не более 1-2%. Наибольший выгиб узла составил 1/478 диаметра купола, наибольшее усилие в стержнях – 20 кН.

Физический эксперимент показал, что опытная конструкция характеризуется малой деформативностью: при нормативной нагрузке наибольший выгиб узла составил 1/438 диметра купола.

Разработанная конструкция пролетного узла купола обладает достаточной прочностью, жесткостью и надежностью с коэффициентом безопасности 1,2, и может быть рекомендована для использования ее в составе купольного покрытия, а разработанная конструктивная форма ребристо-кольцевого купола - к применению в строительстве.

В конце диссертации приводятся **рекомендации** по конструированию, расчету и изготовлению деревянных ребристо-кольцевых куполов с блоками жесткости. Указана технология изготовления, сборка и монтаж разработанной конструкции, а также представлена огне-биозащита древесины и металла.

Произведена сравнительная оценка экономической эффективности ребристо-кольцевых куполов с контрастными конструктивными схемами (рис. 10).

Рис. 10. Изменение приведенных затрат

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю – доктору технических наук, профессору Ивану Семеновичу Инжутову; доктору технических наук, профессору Петру Андреевичу Дмитриеву за ценные консультации во время работы над диссертацией, а также коллективам кафедр «МиДК» ТГАСУ и «СК» ИАС СФУ за внимание, помощь и критические замечания, сделанные в процессе подготовки диссертационной работы.

**Основные результаты и выводы**

1. Сформулированы принципы формообразования и конструирования ребристо-кольцевого купола со связями с применением калиброванного, в том числе тонкомерного бревна, для зданий различного функционального назначения. Предложена новая конструктивная форма ребристо-кольцевого купола, техническая новизна которой подтверждена патентом РФ на изобретение.
2. Проведен конструкторский поиск рациональных узловых сопряжений деревянного ребристо-кольцевого купола. Разработано три варианта технических решений узлов сопряжения элементов купола. Установлено, что наименее металлоемким является узел, основанный на наконечнике РКК-12-CРД3.
3. В результате численного эксперимента установлено, что: учет податливости узловых соединений приводит к увеличению расчетных значений перемещений узлов до 1/760 диаметра купола; учет длительности действия нагрузки приводит к дальнейшему увеличению расчетных значений перемещений узлов до 1/580 диаметра купола; учет коэффициента относительных напряжений k = 2,15 и физически нелинейного модуля упругости увеличивает расчетные значения перемещения узлов до 1/330 диаметра купола.
4. Анализ результатов численного и физического экспериментов пролетного узла ребристо-кольцевого купола позволил установить, что: опытная конструкция характеризуется малой деформативностью, технологичностью принятого конструктивного решения и высокой скоростью монтажу и демонтажу. Показано, что начальные эксцентриситеты узловых сопряжений стержней влияют на значения перемещений узла не более чем на 2%.
5. Значения перемещения пролетного узла купола составили 1/478 диаметра купола при численном эксперименте и 1/438 диаметра купола при физическом эксперименте.
6. Разработанная конструкция пролетного узла купола обладает достаточной прочностью, жесткостью и надежностью с коэффициентом безопасности по нагрузке 1,2.
7. Сравнительная оценка экономической эффективности ребристо-кольце-вых куполов с различными конструктивными схемами показывает, что предлагаемая конструкция является конкурентоспособной.

**Публикации по теме диссертации**

**Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК**

1. Инжутов, И.С. Ребристо-кольцевой купол со сборно-разборными узлами / И.С. Инжутов, П.А. Дмитриев, **О.Ю. Дериглазов** // Изв. вузов. Строительство. 2007. – № 4. (доля автора 50%).
2. **Дериглазов, О.Ю.** Экспериментальное обоснование модуля упругости в численных расчетах конструкций из древесины сосны / О.Ю. Дериглазов // Вестник ТГАСУ. 2007. – № 3 (доля автора 80%).

**Статьи в других печатных изданиях**

1. **Дериглазов, О.Ю.** Ребристо-кольцевой купол с расставленными в шахматном порядке раскосами / О.Ю. Дериглазов, Д.Г. Копаница, И.С. Инжутов, П.А. Дмитриев // Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. науч. тр. – Одесса: ОГАСА, ВАК Украины. 2006. – С. 58-62. (доля автора 50%).
2. **Дериглазов, О.Ю.** Информационный листок «Пространственно-стерж-невой купол диаметром 12 м» опубликован в БД «Промышленные инновации» Томского ЦНТИ под № 72-060-05, 2005. – 2 с. (доля автора 80%).
3. **Дериглазов, О.Ю.** Деревянные купольные здания базы отдыха «Даурское» КрасГАСА / О.Ю. Дериглазов, Д.А. Куклина, В.А. Колесников // Проблемы строительства и архитектуры: сб. материалов XXIV регион. научно-технич. конф. – Красноярск: КрасГАСА. 2006. – С. 56-58. (доля автора 50%).
4. **Дериглазов, О.Ю.** Опыт изготовления деревянного геодезического купола диаметром 9 м / О.Ю. Дериглазов, А.В. Баранов, С.А. Чибирьков, М.И. Хасанов // Проблемы строительства и архитектуры: сб. материалов XXV регион. научно – технич. конф. – Красноярск: ИАС СФУ, 2007. – С. 34-36. (доля автора 50%).
5. **Дериглазов, О.Ю.** Опытно-конструкторская разработка ребристо-кольцевого купола / О.Ю. Дериглазов // Актуальные проблемы современного строительства: сб. материалов 60-й междунар. научно – технич. конф. – СПб: СПбГАСУ, 2007. (доля автора 80%).

**Патент**

1. Пат. 2298618 Российская Федерация, МПК7 Е 04 В 7/08, E 04 В 1/32. Ребристый купол / И.С. Инжутов, П.А. Дмитриев, В.И. Жаданов, **О.Ю. Дериглазов**; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ТГАСУ» – № 2005132118 заявл. 17.10.2005; опубл. 10.05.2007. – 7 с. (доля автора 25%).