ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ЯО ВЭЙ

РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕСУЩИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ БАМБУКА

Специальность 05.23.01 - Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент А. Б. Шмидт

Санкт-Петербург
2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……4

ГЛАВА 1. ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ БАМБУКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ……..16

1.1 Современное состояние строительных материалов в Китае.....16

1.2 Преимущество бамбука перед другими строительными материалами.....20

1.3 Природа и структура бамбука…….…..24

1.4 Современное состояние использования бамбуковых растений в строительных материалах и конструктивных элементах зданий и сооружений……...33

1.5 Типы существующих соединений бамбуковых конструкций……...44

1.6 Проблемы использования бамбука в строительстве…….….51

ГЛАВА 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СОЕДИНЕНИЯ……52

2.1 Соединение основных элементов конструкции в технологии современного строительства из бамбука…….52

2.2 Принципы современного проектирования узловых соединений из бамбука……..53

2.3 Предлагаемый вариант соединения бамбуковых конструкций новой модели…….55

2.4 Расчет нового соединения элементов……..60

2.5 Численный анализ нового соединения в комплексе ANSYS…….69

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ БАМБУКА……87

3.1 Выбор бамбукового материала…….87

3.2 Экспериментальные исследования механических свойств бамбука Мосо..87

3.3 Анализ резки бамбука Мосо для сборки предлагаемого узла……...95

3.4 Экспериментальный анализ материала внешнего конуса…….97

3.5 Экспериментальный анализ внутренних компонентов……102

3.6 Экспериментальный анализ использования металла в новом узле……108

3.7 Испытание нового узла на разрушение при растяжении…….118

ГЛАВА 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ……...126

4.1 Оценка податливости разработанного узлового соединения……..…126

4.2 Методические рекомендации по конструированию узлового соединения…….130

ЗАКЛЮЧЕНИЕ……..139

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....143

ПРИЛОЖЕНИЕ.....161

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы

Древесина среди традиционных строительных материалов (сталь, бетон, древесина, камень, кирпич) занимает особое положение как возобновляемый и экологически чистый материал. В строительной же индустрии Китая, являющейся основной отраслью промышленности и занимающей важнейшее положение в экономике, с 50-х годов из-за повальной вырубки ощущается острая нехватка лесных ресурсов и древесины. При этом Китай является 2-ой в мире страной, в которой в больших количествах произрастает бамбук. В связи с этим, а также благодаря тому, что он в качестве конструкционного строительного материала обладает преимуществами и оригинальными свойствами, в современной строительной сфере бамбук начинает набирать популярность. Тем не менее, автор полагает, что строительству из бамбука уделяется все же мало внимания в силу недостаточности научно-обоснованных эффективных конструктивных решений. Речь идет о каркасных сооружениях различного назначения: навесах, ангарах, вышках, структурных покрытиях, выставочных павильонах и др.

В отличие от традиционной строительной древесины, обладающей хорошими и теплотехническими, и конструкционными свойствами, бамбук особенно ценен своими конструкционными свойствами. В силу природного строения (в виде трубчатого стержня диаметром до 200 мм) основным конструктивным элементом бамбуковых строений становятся узловые соединения в каркасе сооружения. Таким образом, автор сосредоточил свои экспериментально-теоретические исследования на узловых соединениях из бамбука.

В ходе анализа существующих узловых соединений из бамбука выявлен ряд недостатков, не обеспечивающих приемлемую надежность, долговечность, несущую способность, ремонтопригодность и др. при применении этих соединений для современных условий. Это, с одной стороны, сдерживает более широкое использование конструкций из бамбука, а с другой - является стимулом к творческому интересу инженера-исследователя, разрабатывающего новые конструктивные решения, лишённые недостатков известных вариантов.

Степень разработанности темы исследования

В первой главе диссертации приводится обзор свойств бамбука, как строительного материала, а также примеров его использования для соединений конструкций из бамбука в современном строительстве.

Исследованиям в области свойств бамбука посвящены работы многих исследователей. В их числе находятся: Ф.И. Шимкин, Цзян Зухуэй, Ван СиньЮ, Ли Хуэй, Чжан Юйкун, Цзян Цзяньсинь, Ян Чжункай, Чжу Ливэй, Ши Лимин, Янь Лицзе, Сянь Синцзюань, Сун Нин, Чжан Лишань, Хуан Шэнся, Ван Кай, Ван Чжэн, Го Вэньцзин, Се Хао, Клито Афонсо, Армандо Оливейра, Амада Шигеясу, Нагасе Юкито и другие. Среди архитекторов и исследователей, занимавшихся соединениями конструкций из бамбука, можно отметить Д.Е. Долидзе, З.В. Цагарели, Чжан Нань, М. Генрих Крайс, Р. Хайджунс, Во Тронг Нгхя. Разработкам конструктивных решений бамбуковых узлов посвящены монографии таких авторов, как Маркус Хейнсдорф и Симон Велез, Шоэй Ё, Марсело Виллегас, Сяо Ян. В настоящей работе использовались конструктивные идеи и принципы проектирования деревянных конструкций и их соединений таких российских авторов,

как: Г.Г. Карлсен, Е.Н. Серов, П.А. Дмитриев, Г.Г. Никитин, А.Я. Найчук, И.С. Инжутов, В.А. Фурсов, А.Г. Черных, Б.В. Лабудин, В.И. Жаданов, В.Г. Миронов, А.А. Погорельцев, С.Б. Турковский, А.В. Крицин, С.В. Деордиев, А.Б. Шмидт, В.Н. Шведов, В.Г. Котлов и других.

Существующие в мире сооружения из бамбука по конструкции соединений бамбуковых элементов в узлах можно условно разделить на следующие 6 групп:

1. Соединения, перевязанные жгутами (веревками);
2. Прямые соединения бамбуковых элементов нагелями и болтами;
3. Соединения «выпиловкой» по методу «Цюань Доу»;
4. Узлы, усиленные цементным раствором;
5. Узлы с металлическими элементами;
6. Узлы с металлическими накладками и прокладками.

Для всех указанных выше соединений отмечены недостатки**:**

Соединения, перевязанные жгутами (веревками):

- непрочный перевязочный материал;
- большая податливость и высокая деформативность;
- подверженность внешним воздействиям и неремонтопригодность.

Прямое соединение бамбуковых элементов нагелями и болтами:

- ненадежность крепления нагелей и болтов;
- возможность появления трещин зазоров в соединениях;
- неремонтопригодность.

Соединения «выпиловкой» по методу «Цюань Доу»:

- высокая трудоемкость и многодельность;

- малая жесткость и большая деформативность;

- сложность в сборке и неремонтопригодность.

Узлы, усиленные цементным раствором:

- наличие мокрых процессов при бетонировании;

- сложность и длительность изготовления в полевых условиях;

- не ремонтопригодность.

Узлы с металлическими элементами:

- наличие мокрых процессов при бетонировании;

- сложность сборки и высокая себестоимость;

- не ремонтопригодность.

Узлы с металлическими накладками и прокладками:

- сложность серийного производства;

- высокая трудоемкость сборки;

- невысокая несущая способность;

- высокая себестоимость.

Указанные выше недостатки бамбуковых соединений обусловливают малое применение бамбука в строительстве, не соответствующее его природным превосходным и уникальным конструкционным свойствам.

Таким образом, **целью исследования** явилась разработка новой конструкции узла соединения бамбуковых стержней для плоских и пространственных стержневых строительных конструкций, лишенного недостатков вышеуказанных узлов и удовлетворяющего следующим требованиям:

- иметь несущую способность и деформативность узла адекватной и равно-

сильной элементу из бамбука;

- обладать простотой сборки-разборки и ремонтопригодностью;

- не иметь при сборке мокрых процессов (типа бетон, клей, и т.д.);

Для достижения указанной цели в работе сформулированы следующие **задачи исследования:**

- провести анализ существующих вариантов соединения стеблей бамбука;

- обосновать выбор вида (породы) бамбука из произрастающих в Китае, наиболее пригодного для применения в строительных конструкциях;

- провести испытания для определения прочностных показателей исследуемого вида бамбука;

- разработать узел (или его несколько вариантов) сопряжения элементов бамбука в соединениях стержней пространственной структурной конструкции;

- составить алгоритм расчета несущей способности разработанного узла;

- провести численный анализ разработанного узла с использованием МКЭ в современных программных комплексах;

- изготовить предлагаемый узел, произвести его испытания, сравнив результаты опыта с расчетными данными;

- разработать методику инженерного расчета структуры с новыми узлами.

Поставленные задачи удалось решить в ходе проведённого исследования.

Объект исследования – несущие строительные конструкции плоского и пространственного решетчатого типа – «Структуры».

Предмет исследования – узел соединения стержневых бамбуковых элементов в решетчатой пространственной несущей строительной конструкции.

Научная новизна исследования:

1. Разработано новое узловое соединение бамбуковых элементов несущей конструкции, в котором концевая часть бамбука в форме конуса, полученного из лепестков наподобие «цанги» за счет треугольных пропилов, зажата между наружным и внутренним стальными конусами с помощью стяжного болта, который с одной стороны стягивает их гайкой, а с другой – ввинчивается в шар-коннектор известной «системы МАРХИ».

2. Разработаны математическая модель и алгоритм расчета нового узлового соединения для анализа напряженно-деформированного состояния узла под нагрузкой в численном эксперименте с помощью программы ANSYS 15.0 и получения аналитических зависимостей с использованием безмоментной теории оболочек и критерия прочности Мизеса.

3. Впервые разработаны и проведены экспериментальные исследования нового узла соединения бамбука для выполнения сравнительного анализа с теоретическими исследованиями модели узлового соединения бамбука. Получены экспериментальные данные механических испытаний для проведения корректных расчетов при проектировании узлов соединения.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что в результате выполненных исследований, в основе которых лежат математические модели и физические закономерности механики твердых тел и методы статистической обработки опытных данных, получена возможность без проведения дорогостоящих натурных испытаний создавать строительные несущие конструкции из бамбука с прогнозируемой несущей способностью, надежностью и высокой эффективно-

стью в районах, богатых бамбуковыми лесами.

Разработанный узел может быть непосредственно применен в строительстве для широкого диапазона габаритов бамбуковых стеблей, что определяет **практическую значимость** работы. В отличие от других конструкций узлов разработанный узел обладает «ремонтопригодностью» и усилением в условиях «без разгрузки». В 2015 году подана заявка на регистрацию патента «полезной модели» на разработанное узловое соединение.

Методология и методы исследования. В работе использовались известные и хорошо апробированные методы исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) строительных конструкций, как составных твердых тел с различными физико-механическими характеристиками.

В основе методологии этих исследований лежит принцип «подтверждения теории практикой».

Среди теоретических методов применялись: механика твердых деформируемых тел, математическое моделирование НДС с помощью современных методов МКЭ и численных экспериментов, методы прогнозируемой надежности, зафиксированные в отечественных и зарубежных нормах проектирования.

В части опытных и экспериментальных исследований применялись проверенные мировым инженерным опытом методы испытаний конструкций и материалов с применением современных методов прогнозирования надежности, в основе которых лежат математическая статистика и современное оборудование для проведения механических испытаний.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследования и анализа существующих конкурентных аналогов строительных конструкций из бамбука и их достоинств и недостатков;

- результаты научного и инженерного поиска нового конструктивного решения с учетом опыта конкурентных аналогов;

- критический анализ личного опыта по изготовлению и сборке конструктивных вариантов нового узла;

- результаты построения теоретических моделей, алгоритмов и описаний работы новой конструкции узлового соединения с использованием на первом этапе безмоментной теории оболочек и критерия прочности Мизеса, и на втором этапе - построение трехмерной конечно-элементной модели с заложением в нее механических характеристик реальных конструктивных материалов узла и проведение численных расчетов с моделированием эксплуатационных нагрузок и специфики взаимодействия разнородных деталей (из металла и бамбука) под этими нагрузками;

- результаты проведения экспериментальных исследований (и испытаний) несущей способности и деформативности бамбукового стержня с металлическими деталями узлового соединения на продольное растяжение и сжатие;

- результаты сравнительного анализа теоретических и экспериментальных исследований;

- методика подбора конструктивных параметров деталей узла для расчета и проектирования нового узлового соединения в составе стержневой пространственной конструкции.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности шифр 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» и 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».

Степень достоверности и апробация результатов базируются на использовании обоснованных исследований современных российских и зарубежных ученых, на анализе статистических данных о работе конструкций под нагрузкой с помощью современных методов математического анализа с применением передового программного обеспечения и проверке их результатов практикой натурного эксперимента.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы представлены и доложены на:

1. 68-й Научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета СПбГАСУ (Санкт-Петербург, декабрь 2011 г.);

2. Актуальные проблемы современного строительства и пути их эффективного решения часть I: материалы международной научно-практической конференции 10-12 октября 2012 г. (Санкт-Петербург, 2012 г.);

3. Актуальные проблемы строительства: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. СПбГАСУ (Санкт-Петербург, 2013 г.);

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 7 научных работах, общим объемом 2,2 п.л., лично автором – 1,13 п.л., в том числе 4 работы, общим объемом 1,32 п.л., лично автором – 0,88 п.л. в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

Имеется акт о внедрении разработанного узла в конструкциях, построенных в Китае в 2014-15 гг.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, общих выводов. Диссертация содержит 163 страницы машинописного текста, 23 таблицы, 89 рисунков. Список использованной литературы из 119 наименований работ отечественных, в том числе 71 – на иностранных языках.

Во введении сформулирована проблема и обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе «Эффективное применение бамбука в строительстве» выполнен анализ современного состояния строительных материалов в Китае, кратко описаны свойства бамбука, как строительного материала, приведен обзор использования бамбуковых стеблей в строительных конструкциях зданий и сооружений. В результате анализа существующих типов соединений бамбуковых конструкций сформулированы их основные недостатки.

Во второй главе «Проектирование и расчет современных методов соединения» предложено несколько новых конструктивных решений для узлов соединения бамбуковых стволов, отвечающих современным требованиям. Вариант с металлическими внутренним и внешним конусами признан наиболее рациональным. Для узлового соединения нового типа с использованием двух металлических конических элементов выполнены аналитический расчет и численный эксперимент с помощью программного комплекса ANSYS.

В третьей главе «Экспериментальное исследование нового соединения элементов из бамбука» приведены описание и результаты выполненных в ходе исследований механических испытаний разработанных узлов и материалов натуральной величины. В частности, описаны выполненные автором диссертации опытные исследования механических свойств бамбука в «суставе» и вне «сустава, анализ вариантов способов выполнения пропилов и их числа в бамбуке для сборки предлагаемого узла. Экспериментально исследованы различные материалы, из которых планировалось изготавливать элементы нового узла, а также проведены испытания его готовой конструкции.

Четвертая глава «Рекомендации по проектированию и практическому применению узловых соединений» посвящена распространению результатов исследования на актуальный интервал диаметров стволов бамбука, условно разбитых на три диапазона:(100-114 мм); (115-129 мм) и (130-150 мм), что является важным для практического применения. Для каждого из этих трех диапазонов составлены три набора типоразмеров, соответствующих унифицированным металлоизделиям. Это позволяет наладить поточное производство запчастей и соответ-

ствует цели диссертации – добиться сборно-разборности узла и его ремонтопригодности.

В заключении приводятся основные итоги и результаты диссертационной работы, свидетельствующие о том, что в диссертации изложены новые научно обоснованные технические и технологические разработки узловых соединений бамбуковых элементов в строительных конструкциях пространственного решетчатого типа, имеющие существенное значение для страны.

В опубликованных ранее статьях описаны отдельные идеи и задачи, являющиеся заделом настоящей работы.

ГЛАВА 1. ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ БАМБУКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

1.1 Современное состояние строительных материалов в Китае

Строительная индустрия является основной отраслью промышленности в Китае и занимает чрезвычайно важное положение в экономике. Вслед за непрерывным и стремительным развитием экономики Китая и существенным повышением уровня жизни населения, потребность в строительстве также возросла и продолжает расти. В ходе работ ежегодно две трети стоимости строительства приходится на стоимость применяемых материалов, таких как сталь, древесина, цемент, стекло, песок, необожженный кирпич и другие металлические и химические материалы, основная часть которых относится к не возобновляемым материальным ресурсам [29]. В Китае производство строительных материалов потребляет сотни миллионов тонн минерального сырья, создавая серьезную нехватку ресурсов и причиняя ущерб окружающей среде.

Производство строительных материалов оказывает непосредственное влияние на окружающую среду: ей наносится огромный вред, который проявляется в следующем:

Большое потребление энергии. Промышленное производство строительных материалов в Китае расходует примерно 9% от общего потребления энергии по стране, при том, что потребление энергии в промышленности составляет 15,8%. Огромное потребление энергии является отличительной особенностью традиционной индустрии строительных материалов и делится на две категории: высокое потребление энергии при производстве и высокое потребление энергии при ис-

пользовании. Так как потребление энергии при использовании длится весь эксплуатационный срок службы постройки, то величина потребления во много раз превышает потребление энергии при производстве, примерно в 7–16 раз [42].

Уничтожение земельных ресурсов. В настоящее время в Китае в производстве строительных материалов используются такие сырьевые материалы, как глина, известняк, песчаник, которые серьезно обедняют земельные ресурсы [65].

Загрязнение окружающей среды в ходе производства. При выработке глины, известняка и традиционных материалов для стен ежегодные выбросы CO_2 (углекислого газа) составляют 660 млн. тонн, т.е. 40% от общего количества промышленных выбросов по стране [66].

Загрязнение окружающей среды строительными материалами. Некоторые природные сырьевые материалы имеют радиоактивный фон, из-за чего часть готовых строительных материалов также обладает долей радиации. К тому же значительная часть таких материалов проникает на рынок и при дальнейшей эксплуатации влечет за собой снижение иммунитета человека и приводит к различным заболеваниям [5].

Среди традиционных строительных материалов (сталь, цемент, древесина, пластик, камень) древесина является наиболее экологически чистым материалом, независимо от того находится ли она в периоде до строительного производства, в ходе эксплуатации или в процессе переработки обветшалых сооружений. Однако после 50-х годов двадцатого века из-за чрезмерной вырубки лесов и уничтожения огромных лесных площадей в Китае появились проблемы с нехваткой лесных ресурсов и древесины. К 80-м годам ввиду истощения лесозаготовок заботой управ-

ления лесного хозяйства китайского правительства стал импорт древесины. Использование древесины было ограничено, так же, как и развитие строительства из древесных материалов [67].

В настоящее время коэффициент лесонасаждений Китая составляет 2/3 от среднего мирового уровня, и это 139 место в мире. Площадь лесов на душу населения составляет 0,145 га, т.е. менее чем 1/4 мирового пользования на душу населения; лесных запасов на душу населения приходится 10,151 $м^3$, т.е. всего 1/7 от мирового пользования на душу населения. В Китае общее годовое потребление древесины уже превысило 400 млн. $м^3$, а зависимость от импорта древесины составила более, чем 50%. Согласно расчетам, за последние 10 лет в Китае среднегодовой прирост коэффициента потребления древесины составил 3,71%, и ожидается, что к 2020 году потребление древесины приблизится к 700 млн. $м^3$. Для удовлетворения потребностей внутреннего рынка древесных материалов китайское правительство ежегодно вынуждено вкладывать огромные средства в лесопосадки, охрану естественных лесов и других крупных проектов лесного хозяйства. За последние годы в результате экологической сознательности, повышающейся экологической культуры многие страны начали ограничивать экспорт древесины или повышать тарифы, что привело к неуклонному росту цен на ввоз древесины в Китай (рисунок 1.1) [43]. Из-за больших объемов импорта древесины и пристального внимания международных экологических организаций развитие деревообрабатывающей промышленности Китая оказалось под огромным давлением. Нехватка древесины и других традиционных строительных материалов и соответственное повышение цен заставляют искать такие виды строительных мате-

риалов, которые будут доступны по цене и будут соответствовать требованиям строительства [103].

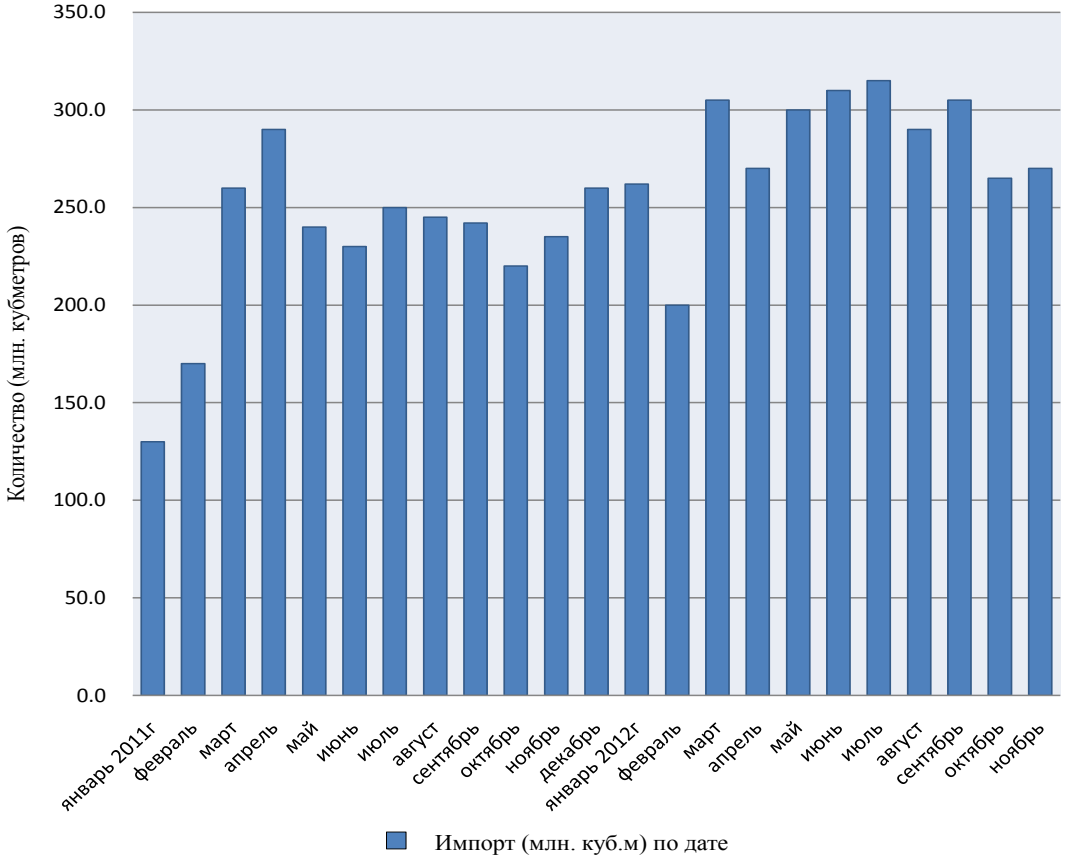


Рисунок 1.1 – Объем ввоза древесины в Китай за период с января 2011 по ноябрь 2012 гг.

Являясь страной с относительно малой площадью лесов и нехваткой лесных ресурсов, Китай очень богат бамбуком и относится к одной из немногих стран, изобилующей этим природным ресурсом, поэтому бамбуковые рощи в Китае называются «вторым лесом». По площади бамбуковых лесов Китай занимает второе место в мире (рисунок 1.2), а по объему производства бамбука – первое место в мире [104]. С другой стороны, при коротком цикле роста, как одно из самых быстрорастущих растений в мире, простой в посадке, легкий и крепкий, с отличными физико-механическими свойствами бамбук является исключительным возоб-

новляемым ресурсом. В условиях возрастающей нехватки древесных ресурсов, замена древесины на бамбук является актуальной для Китая как с точки зрения экологии, так и в экономическом аспекте.

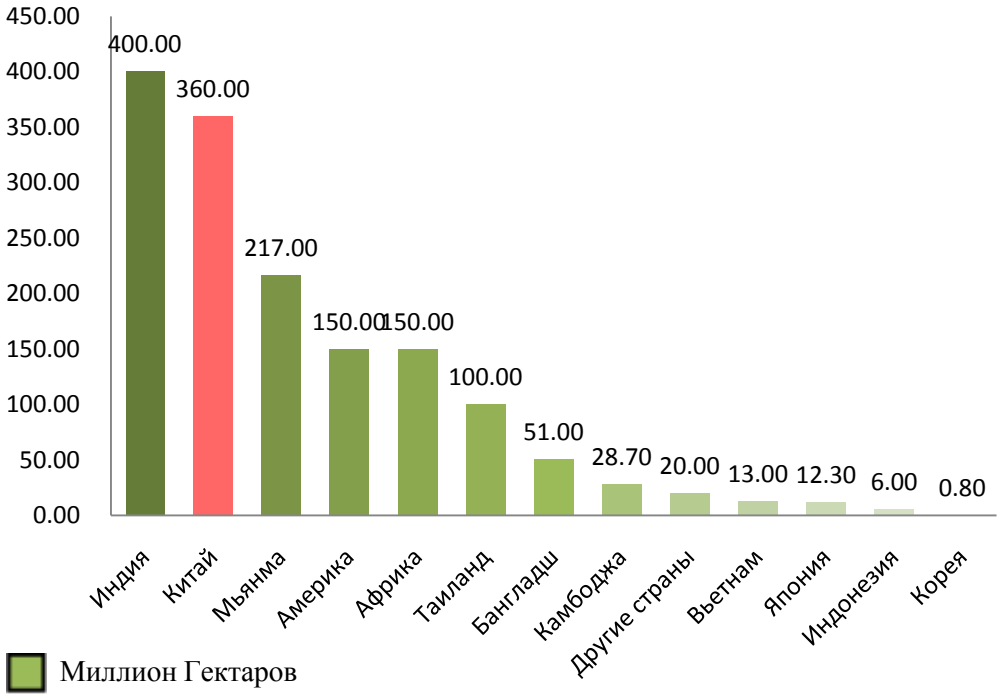


Рисунок 1.2 – Распределение бамбука в различных странах

1.2 Преимущество бамбука перед другими строительными материалами

Бамбук – один из видов природного быстрорастущего сырья, обладающего сходством с древесиной. У бамбука мягкая окраска, отчетливая текстура, он упругий и гладкий на ощупь, бамбук дает хорошие визуальные, обонятельные и осязательные ощущения. Он обладает легким весом, хорошей эластичностью и высокой прочностью. В то же время бамбук является экологически чистым зеленым строительным материалом, с поглощением CO_2 (углекислого газа) в четыре раза больше, чем у обычных деревьев. После использования материал может быть полностью переработан и вторично использован. В конечном счете бамбук энер-

гетически не затратный строительный материал: так, при одинаковой площади застройки соотношение потребления энергии бамбука и бетона равняется 1:8, а соотношение потребления энергии со стальными материалами 1:50 [105].

С другой стороны, не может быть оставлено без внимания то, что бамбук обладает особым культурным значением. С ходом быстрого развития современной индустриализации люди, живущие в железобетонных сооружениях, стремятся вернуться к домам из природных материалов. Строительство из бамбука при его разном природном цвете, форме и текстуре дает психологическое ощущение возвращения к природе. Поэтому он занимает важное место в ландшафтной архитектуре и отделке интерьеров.

Характерные особенности строительных материалов из бамбука. При значительном влиянии мирового переориентирования на зеленую экологию, бамбук как современный строительный материал приобретает все большее значение. Китай, обладая богатыми ресурсами бамбука, заложил прочную материальную основу для развития строительства из бамбуковых материалов. В практическом применении в строительстве бамбук имеет следующие преимущества:

1. По сравнению с другими строительными материалами, такими, как камень, кирпич, бетон, сталь и другими минеральными ресурсами, бамбук является возобновляемым ресурсом. Срок, за который вырастает растение, готовое для использования, составляет 3-5 лет. Для этого необходимы всего лишь рациональная разработка и посадка, и тогда возможно его повторное использование. С развитием промышленной разработки множество быстрорастущих видов бамбука также могут быть использованы в строительных конструкциях, что значительно сокра-

тит период воспроизводства [68].

2. В ходе производственного процесса традиционных строительных материалов ежегодно расходуется около десяти миллиардов тонн минеральных ресурсов, а также 15% от общего потребления энергии по стране. В результате создается серьезная нехватка ресурсов и загрязнение окружающей среды. С использованием бамбука в качестве строительного материала в процессе строительства происходит гораздо меньшее потребление энергии и загрязнения окружающей среды, чем при строительстве кирпичных, каменных и бетонных зданий, т.е. он является экологическим материалом. На рисунке 1.3 показана диаграмма выбросов углекислого газа (кг/м^2) при строительстве помещений с применением различных материалов, где можно видеть, что по аспектам потребления энергии, загрязнения воздуха и воды у бамбука меньшее воздействие на окружающую среду [39].

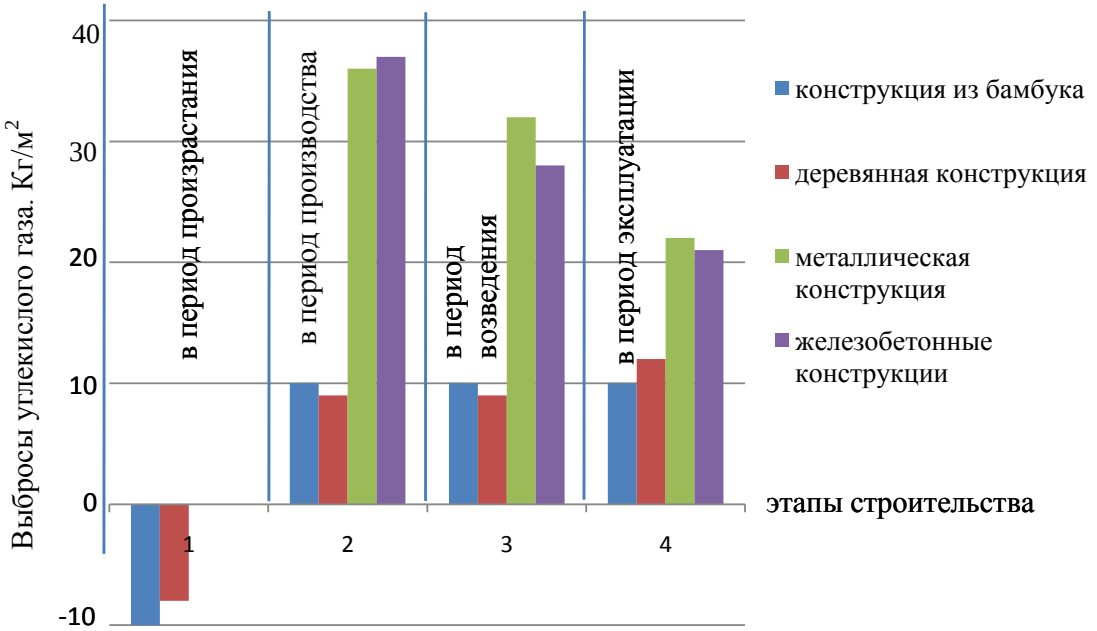


Рисунок 1.3 – Диаграмма выбросов углекислого газа в кг на 1 м^2 помещения при различных этапах строительства

3. Высокая прочность бамбука и малый вес конструкции из него повышают сопротивляемость здания сейсмическому воздействию. Даже при сильном землетрясении с деформацией общего каркаса конструкции, он не потеряет устойчивость и не обрушится. С помощью определенных мероприятий срок эксплуатации бамбука в качестве строительного материала может быть увеличен. Это достигается в том случае, когда бамбук тщательно отбирается, проходит через антикоррозийную обработку (при этом используется вспомогательный материал), а устаревшие или поврежденные части периодически заменяются [68].

4. Бамбук является теплоизоляционным материалом. Коэффициент теплопроводности составляет примерно 0,30 Вт/(м*К). Для достижения одинакового эффекта теплоизоляции необходимая толщина бамбука должно составлять 1/15 от бетона и 1/400 от стали. Кроме того, среднегодовое изменение влажности построек из бамбука колеблется в пределах 60-80%, что является самым близким к лучшим показателям влажности для жилой среды, составляющим около 60% [105].

5. Постройки и детали комплектов из бамбуковых структур легки для типизации и стандартизации: заводское изготовление деталей, сборка и строительство, сокращение использования воды на строительной площадке, высокая скорость строительства способны значительно повысить эффективность капиталовложений.

Ввиду того что бамбук в качестве строительного материала обладает многими преимуществами, продолжение развития исследований стройматериалов из бамбука, раскрытие широкого применения этих материалов в сфере строительных конструкций имеет особенно важное практическое значение [39].

1.3 Природа и структура бамбука

Распределение бамбука

В книге «Бамбук и ротанг в мире» под редакцией профессора Цзян Цзэхуэй указано, что в мире насчитывается 70 родов и 1600 видов бамбука, общая площадь бамбуковых рощ – 22 млн. га, ежегодно из него производится 1500-2000 млн. тонн различных материалов [44].

Основные территории распространения бамбука – в Азии, Африке, Северной и Южной Америке (рисунок 1.4). Европа не имеет собственных естественных видов бамбука, в Северной Америке бамбук распространен мало. За последние сто лет некоторые европейские страны, США, Канада, а также некоторые из азиатских, африканских стран вывели большое количество видов бамбука. Например, США распространили 35 видов бамбука, растущего в Китае. Азия является крупнейшим в мире регионом произрастания бамбука. Здесь растет 50 родов и 900 видов этого растения. Причем, более чем 100 видов бамбука имеют экономическую ценность. Основные «бамбуковые» страны – это Китай, Индия, Мьянма, Таиланд, Бангладеш, Камбоджа, Вьетнам, Япония, Индонезия, Малайзия и Филиппины [106].

Рисунок 1.4 – Распределение ресурсов бамбука в мире

В Китае имеется 40 родов бамбука и более 400 его видов. Китайский бамбук, главным образом, распределяется к югу реки Цинтлин Ханган, которая протекает через 16 провинций: Хунань, Фуцзянь, Цзянси, Чжэцзян, Аньхой, Гуандун, Гуанси, Хубэй, Гуйчжоу, Цзянсу, Сычуань, Чунцин, Тайвань, Хэнань, Юньнань. Хайнань (рисунок 1.4). Общая площадь, занимаемая бамбуком, 379,1 млн. гектаров, что составляет 27,1% от всей площади в мире. На бамбук Мосо приходится более 2/3 общей площади. Он является крупнейшим и наиболее распространенным видом бамбука в Китае [45].

Строение бамбука

В качестве строительного материала наибольшее значение имеют стебли (стволы) бамбука. Ствол бамбука полый, состоит из нескольких десятков замкнутых цилиндрических отсеков, которые разграничены межузловыми диафрагмами, расположенными в местах наружных утолщений в виде колец – «суставов» (рисунок 1.5). Межузловая длина увеличивается от корня к вершине и меняется в пределах от 20 см до 40 см. Толщина стенок ствола пропорциональна наружному диаметру и составляет в среднем 0,1 от внешнего диаметра. Размеры стволов бамбука колеблются по диаметру от 8 см до 20 см и по длине 6 – 7 метров [107].

Рисунок 1.5 – Бамбуковый сустав в разрезе

Макроструктура бамбука имеет три части: внешний слой бамбука, основные ткани и внутренний слой. Строение бамбука имеет вид, показанный на рисунке 1.6.

Рисунок 1.6 – Макроструктура бамбука

Внешний слой бамбука имеет плотные сосудистые пучки, с высоким содержанием волокон. Эту часть бамбука можно охарактеризовать такими свойствами, как плотность, твердость, прочность и высокий модуль упругости, т.е. его механические свойства схожи со стеклопластиком [69].

Бамбуковый внутренний слой имеет небольшое количество сосудистых пучков, более тонкостенные клетки. За исключением небольшого количества сосудистых пучков они обеспечивают более высокую прочность, другие же свойства бамбука похожи на дерево. Но у него есть явные преимущества, а именно: стабильность размеров тонкостенных клеток, поэтому в результате получается прочный и водоустойчивый продукт [92].

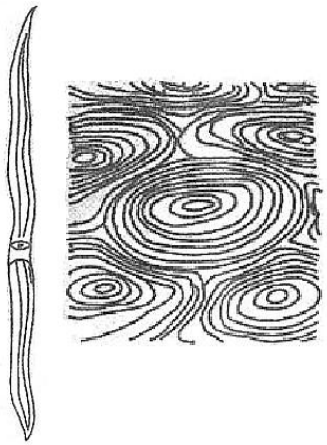


Рисунок 1.7 – Морфология бамбуковых волокон

Бамбуковые клетки волокна похожи на толстостенные клетки древесины, их диаметр 10-30 мкм, а длина 1000-3000 мкм [46]. Молодой бамбук имеет тон-

кие стенки и меньше слоев, чем старый (рисунок 1.7).

Особенности стеблей бамбука и его суставов проявляются в следующем: клетки строго выровнены вертикально по оси, а не как у древесины, поперечно, сосудистые пучки, проходя через суставы, имеют разную степень изгиба [47].

Физико-механические свойства бамбука

В настоящее время среди исследований бамбуковых материалов существует множество работ, касающихся физических свойств, основное внимание в этих работах направлено на плотность, влагосодержание, воздушную усадку при сушке и другие аспекты.

Плотность бамбуковых материалов является основной физической величиной, подходящей для оценки качества бамбуковых материалов и позволяющей определить прочие физико-механические свойства материала. Поэтому плотность и другие свойства бамбуковых материалов тесно взаимосвязаны.

Соответствие величины плотности и химический состав бамбуковых материалов также основываются на видовых, возрастных показателях, месте произрастания и структурных различиях бамбука.

1. Взаимосвязь плотности и возраста бамбука

С возрастом бамбук становится более грубым, плотность его повышается. На стадии старения плотность наоборот снижается (рисунок 1.8) [108].

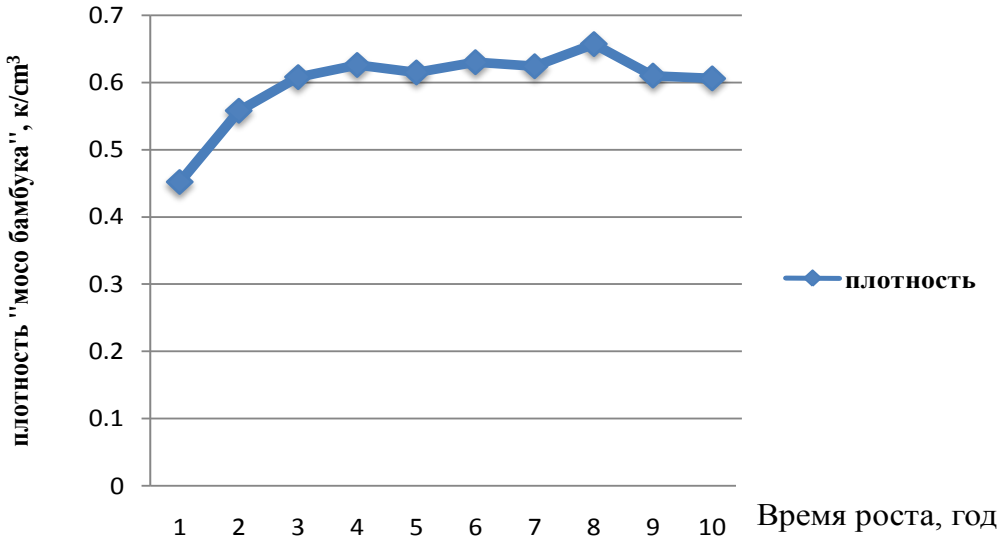


Рисунок 1.8 – Диаграма изменения плотности бамбука Мосо в течение 10 лет его роста

2. Взаимосвязь плотности и среды произрастания бамбука

Одинаковые виды бамбука в благоприятных условиях мягкого, влажного климата, плодородной почвы растут быстрее. Ствол, как правило, имеет больший диаметр, однако, его структура неплотная и рыхлая, и соответственно, плотность сравнительно мала. В противоположных условиях плотность, наоборот, относительно высока [108].

3. Взаимосвязь плотности и частей ствола бамбука

Для бамбука одного и того же вида от нижней части ствола и до верхушки выявляется тенденция постепенного повышения плотности. Это происходит из-за того, что диаметр и толщина стенок ствола от нижней части к верхней постепенно уменьшается в размере, при этом количество внутренних сосудисто-волокнистых пучков не уменьшается, и за счет соответственного увеличения густоты этих сосудисто-волокнистых пучков увеличивается и плотность самого материала. В

бамбуковых стенках плотность волокна уменьшается от внешней стороны: с внешней стороны более высокая, плотность внутренней части стенки меньше [108].

Влагосодержание определяется количеством содержащейся влаги. Влагосодержание имеет два показателя: один - абсолютное влагосодержание, другой – относительное влагосодержание. И вычисляются по следующим формулам:

$$W = \frac{(m1-m0)}{m0} * 100 \ , \qquad (1.1)$$

$$W1 = \frac{(m1-m0)}{m1} * 100\% \ , \qquad (1.2)$$

Где: W— абсолютное влагосодержание, W1— относительное влагосодержание, m1— масса испытываемого на влагосодержание образца, m0— абсолютно сухая масса образца.

В ходе строительства и производства обычно прибегают к абсолютному влагосодержанию. Влагосодержание свежих бамбуковых материалов и возраст, части бамбука и сезон, в который была произведена вырубка, тесно взаимосвязаны между собой. Обычно с увеличением возраста бамбука его влагосодержание уменьшается. Влагосодержание в нижней части ствола выше, чем в верхней (рисунок 1.9) [76]. В стенках бамбука от внешней стороны к внутренней части бамбука влагосодержание постепенно повышается. Например, у стенки свежего бамбука съедобного (листоколосник съедобный или съедобный бамбук Phyllostachys edulis Houzeau de Lehaie) влагосодержание внешней стороны, средней части и внутренней стороны соответственно различаются: 36.7%, 102.83% и 105.35% [108].

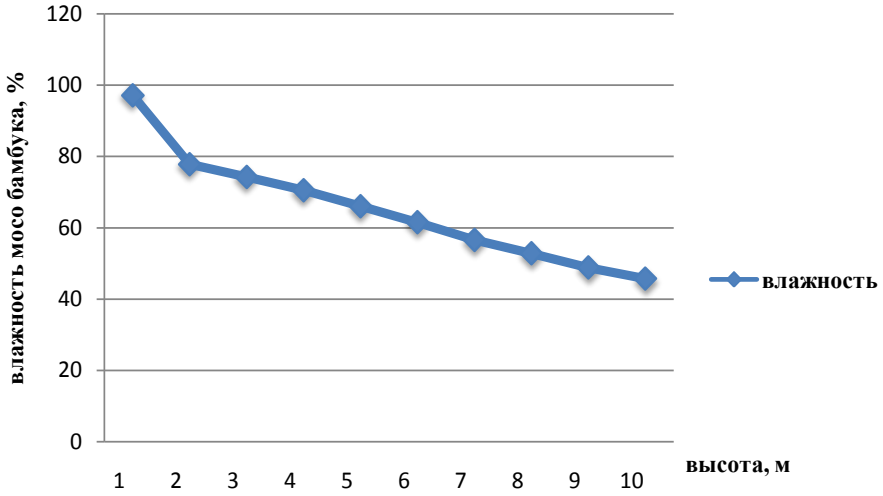


Рисунок 1.9 – Влагосодержание в свежих бамбуковых стеблях "Мосо бамбука"

Усадка при сушке. Для бамбуковых материалов так же, как и древесных с высоким влагосодержанием, на воздухе или в условиях принудительной сушки характерно непрерывное испарение влаги, содержащейся во внутренней части бамбука, что приводит к уменьшению размеров материала и что называется усадкой при сушке. Интенсивность испарения влаги на разных видах сильно различается. Усадка при сушке бамбуковых материалов обычно меньше, чем древесных [108].

Механические свойства бамбука

В механических свойствах бамбука отразилась способность бамбука противодействовать внешним механическим силам. Для применения бамбука в строительстве в первую очередь важны прочность на разрыв или растяжение, сопротивление сжатию, прочность на изгиб, прочность на срез.

Механическая прочность бамбука вслед за повышением влагосодержания уменьшается, однако в чрезвычайно сухих условиях природные свойства бамбука

также изменяются, он становится хрупким, и его прочность, наоборот, падает. Механическая прочность верхней части бамбукового ствола выше, чем нижней, а внешней стороны стенок выше, чем внутренней. Например, прочность на растяжение бамбукового коленца (сустава) съедобного бамбука (листоколосник съедобный или съедобный бамбук (Phyllostachys edulis Houzeau de Lehaie)) ниже в 1/4, чем промежуточной между коленцами (суставами) части, однако другие механические характеристики у коленца значительно выше. Причина заключается в неровном изогнутом распределении бамбукового волокна, легко рвущимся при растяжении [38]. Механическая прочность бамбука обычно повышается с увеличением его возраста, однако старение приводит к тому, что бамбуковый ствол становится хрупким и это снижает механическую прочность. Чем лучше условия произрастания бамбука, тем ниже его механическая прочность. Чем меньше диаметр бамбукового ствола, тем выше его механическая прочность. Сопротивляемость сжатию и растяжению выше у коленчатых видов бамбука. После расщепления несущая способность бамбука по сравнению с целым значительно снижается. Прочность на разрыв или растяжение, сопротивление сжатию, модуль упругости и модуль раскола сухого бамбукового материала выше, чем свежего. Модуль раскола внешней стороны стенки бамбука относительно высок, а модуль упругости не меняется [48].

В настоящее время в существующих научных источниках почти отсутствуют полная информация экспериментально-теоретических исследований по изучению физико-механических свойств бамбука, где должны быть более доступно описаны все условия проведения этих исследований, а если есть, то лишь приво-

дятся косвенные или табличные значения этих полученных данных [75].

Анализ существующих экспериментальных источников показывают, что прочностные и физико–механические свойства бамбука показывают не постоянный характер полученных результатов и очевидно, связано это с разностью принятых схем, условий и методик испытаний.

Так в 1954 году проведенные исследования Тбилисского института инженеров дорожного транспорта показали, что бамбук имеет более высокие механические показатели по сравнению с сосной и значение допускаемых напряжений на растяжение составляет 30 МПа, а на сжатие вдоль волокон 20 МПа [34].

В 2002 году китайскими ученными были проведены исследования по изучению свойств бамбука в зависимости от возраста и геометрических характеристик, в ходе которых были получены следующие их средние значения (таблица. 1.1) [49]:

Таблица 1.1

Механические характеристики	**Участок бамбука**	
	В суставе	**Между суставами**
Прочность при растяжении, МПа	212,8	263,4
Прочность на сжатие, МПа	58,6	62,6
Прочность при изгибе, МПа	131,3	134,8
Прочность при сдвиге, МПа	12,2	13,1
Ударная вязкость, МПа	77,5	89,6
Плотность, кг/м^3	664	670

Источник: разработано автором

И в это же время в 2005 году американскими исследователями в результате испытаний бамбука были получены следующие механические характеристики:

- прочность при растяжении 35 – 300 МПа;
- прочность на сжатие 64 – 110 МПа;
- модуль упругости E = 20000 МПа;
- плотность 600 – 800 кг/м^3.

По данным материалов сети Интернет, предел прочности на разрыв у бамбука колеблется в пределах 300 – 400 МПа, плотность некоторых сортов бамбука достигает 630 кг/м^3 [49].

Согласно экспериментальным данным, полученным в лаборатории кафедры конструкций из дерева и пластмасс СПбГАСУ, прочность бамбука на разрыв составляет – 115,081 МПа, а на сжатие – 73.931 МПа, при этом плотность составляет 600-800 кг/м^3 [41].

1.4. Современное состояние использования бамбуковых растений в строительных материалах и конструктивных элементах зданий и сооружений

Известно, что в тех странах, где произрастает бамбук, использование его как строительного материала для жилых строений началось еще издавна. Такие экологически чистые дома относительно дешевы, быстро изготавливаются и просты в монтаже.

Однако широкое распространение бамбука в мире пока ограничивается не только областью его произрастания, но и тем, что изменение свойств бамбука при применении его в качестве строительного материала в холодных климатических

условиях находится пока в стадии изучения. При этом сегодня современные технологии и инновационные разработки позволяют строить многое, включая строительство пригородных домов для круглосуточного проживания даже в странах с холодными климатическими условиями и обладающих гораздо более высоким энергосбережением по сравнению с традиционными [74].

Учитывая уникальные прочностные свойства бамбука, Европейский союз уже субсидировал два проекта под названием «Непрерывное производство и улучшение качества бамбука» и «План распространения бамбука в Европе», реализуемые Германией, Францией, Италией и некоторыми странами [81].

В настоящее время очень популярны паркетные доски и настилы, сделанные из бамбука, и они уже нашли свое широкое распространение в Германии, США, Корее, Японии, Новой Зеландии, Австралии, затем начался массовый заказ подобных материалов и в России. Больше архитекторов и инженеров стали отдавать предпочтение применению бамбуковых материалов при проектировании и строительстве стадионов и других общественных зданий [115].

В Испании в международном аэропорту Мадрида для потолочных навесов в залах прибытия пассажиров использованы материалы из бамбука (рисунок 1.10), привезенных из Китая [50].

В африканских, американских и азиатских странах, где идет массовое производство необработанного бамбукового сырья, уделяется большое внимание широкомасштабному развитию материалов из бамбука и благодаря их экономичности и прочности идет попытка решения проблем строительства жилых зданий для местного населения.

Рисунок 1.10 – Аэропорт в Мадриде

В источнике приводится известное строительное произведение колумбийского архитектора Симона Велеза под названием «Большой павильон Велез Зери» (рисунок 1.11), где удивительным образом выполнены не только сопряжения конструктивных элементов из бамбука, но и прекрасно видна его архитектурная выразительность. Так же великолепен проект бамбукового моста Симона Велеза с названием «Водные перекрестия» (рисунок 1.12) [91]. Это арочный мост, пролегающий через горную долину с длиной 25 м и грузоподъемностью 350 кг/м^2. При этом он использовал в полостях бамбука цементный раствор с применением металлических болтов, а длина бамбуковых стволов варьируются в пределах от 1 м до 20 м [82].

Рисунок 1.11 – Большой павильон Велез Зери (Ганновер)

Рисунок 1.12 – Бамбуковый мост Симона Велеза «Водные перекрестия»

В Мексике канадскими архитектором и художником Грегори Колбертом был создан крупнейший в мире музей кочевого скотоводства из бамбука, который впечатляет не только архитектурной красотой, но и своей площадью, которая составляет 5130 м^2 (рисунок 1.13) [83].

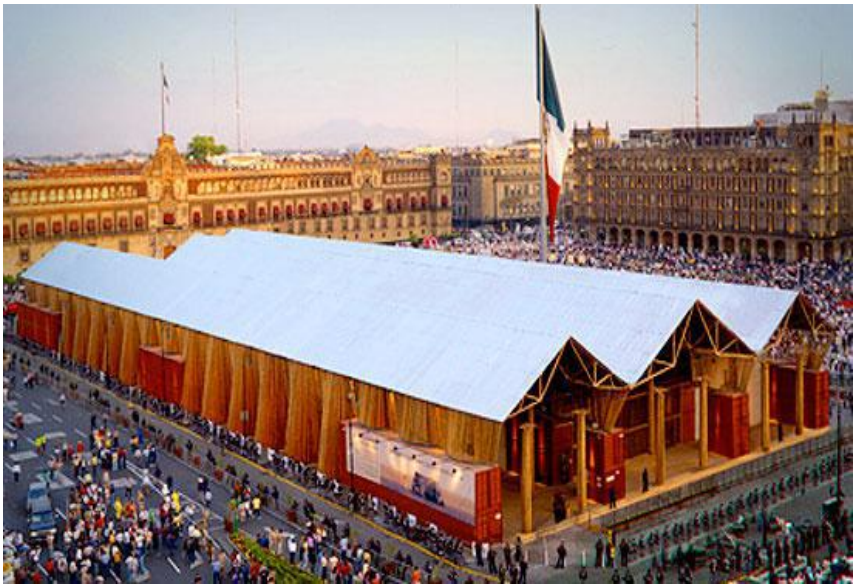


Рисунок 1.13 – Музей кочевого скотоводства из бамбука

Зеленная школа на Бали (Индонезия), разработанная канадским архитектором Джоном Харди (рисунок 1.14) в комбинации бамбука с глиной поражает необычным конструктивным решением. Конструкция здания имеет спиральную форму, и основная конструкция стен состоит из бамбука и глины [51].

Рисунок 1.14 – Зеленная школа на Бали

Заслуживает внимания и хижина из бамбука (рисунок 1.15), построенная архитектором Де Лянь в штате Индиана США. По структуре она представляет собой сетку из необработанных бамбуковых стволов с использованием оцинкованных стальных проволок в местах сопряжений линейных элементов [109]. Практически здесь все конструктивные элементы хижины выполнены из бамбуковых материалов.

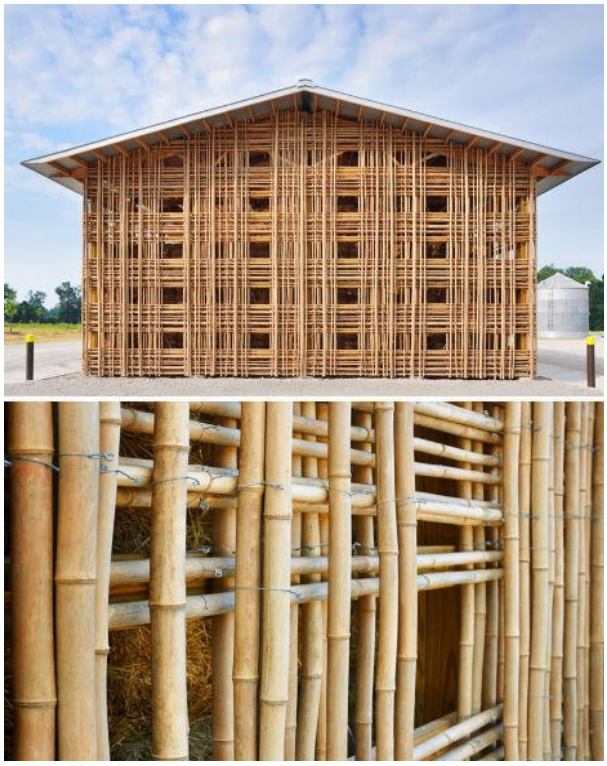


Рисунок 1.15 – Хижина из бамбука в штате Индиана США

Известны серьезные исследования, проводившееся Энди Ли в американском университете Клемсона, посвященные механическим свойствам древесностружечных плит (ДСП), усиленных бамбуковым материалом, где подтверждают повышенные прочностные свойства исследуемого материала [84]. Аналогичные результаты получены в результате исследований бамбука, проведенных научными коллективами ряда стран в частности Коста-Рики, Эквадор и других. Эти страны в

последнее время серьезно взялись за исследования в области прочности материалов из бамбука, особенно в том, что касается поведения бамбуковых материалов при землетрясениях. Так случившееся в 1991 году в Коста-Рике 7,7 - бальное землетрясение показало, что в эпицентре практически все постройки из кирпича и бетона разрушились полностью, а здания из необработанного бамбука остались в целости и сохранности, имея лишь незначительные повреждения [85].

В настоящее время существуют Европейские исследования и технологии в сфере проектирования и строительства объектов из бамбука, которые имеют богатый практический опыт. Так немецкий архитектор Маркус Хейнсдорф является одним из активистов в этой сфере. В 2008 году немецко-китайская компания, которую возглавлял Маркус Хейнсдорф, запроектировала 21 павильон из бамбука в Гуанчжоу. Один из уникальных павильонов Маркуса Хейнсдорфа был построен в Шанхае. В нем была использована рамочная конструкция из бамбука, а в узловых сопряжениях были применены комбинация стальных элементов, листовых рессор и цементный раствор (рисунок 1.16) [64].

Рисунок 1.16 – Павильон из бамбука в Шанхае 2010 г

В источнике отмечается, что в Итальянской Венеции всего за неделю несколько архитекторов вручную возвели бамбуковую башню высотой 15 м, напоминающую птичье гнездо с вращающимся пандусом вверху [109].

Вероятно, нужно вкратце привести еще практический опыт Вьетнама, Индонезии и Японии, поскольку эти страны обладают большой историей строительства из бамбука. Отметим, что существует индонезийская академия наук, занимающаяся изучением необработанного бамбука. Там более плотно занялись изучением комбинированной фанеры из бамбука и древесины, бамбуковых древесностружечных плит и других бамбуковых материалов [52].

Строительная компания Во Тронг Нгхя спроектировала и построила в Ханое (Вьетнам) сооружение из бамбука [109], предназначенное для театра, в форме птицы с крыльями, при этом в сопряжениях использованы только веревки, а других крепежных приспособлений отсутствовало (рисунок 1.17).

Рисунок 1.17 – Театр из бамбука в Ханое

Индонезийские архитекторы смогли спроектировать открытый ресторан в виде зонтика, одновременно служащего водосборником. При этом в узловых участках использованы волокна кокосового дерева (рисунок 1.18) [109].

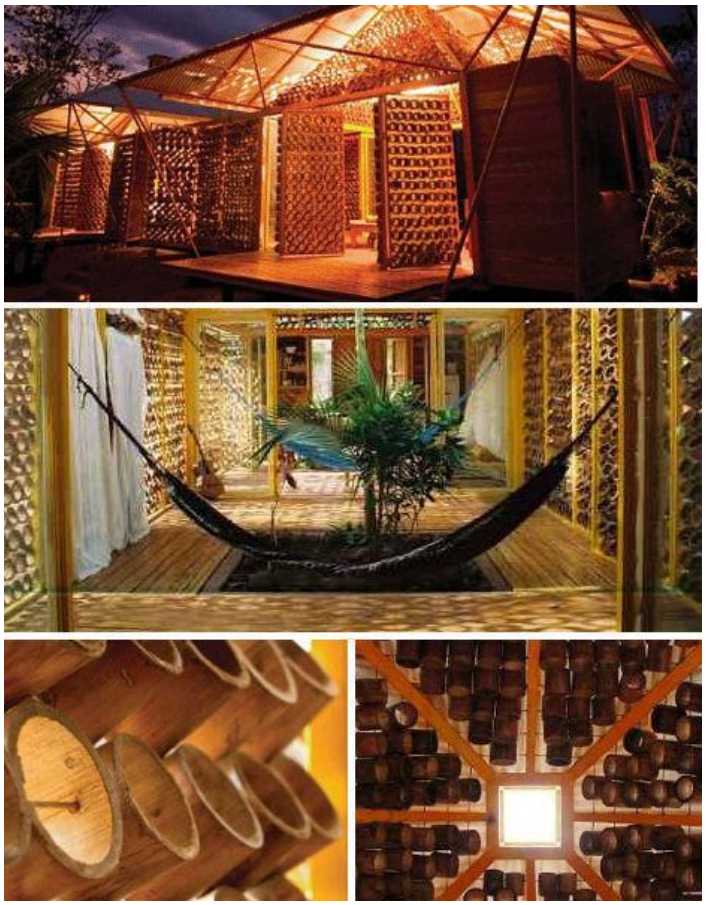


Рисунок 1.18 – Ресторан-зонтик из бамбука в Джакарте (Индонезия)

Известно, что Япония — это одна из развитых стран с высокотехнологическим потенциалом. Так в Японии существуют множество университетов, исследовательских институтов и научно-исследовательских организаций, проводящие всесторонние исследования механики и структурного строения бамбука и древесины как основного сырья для создания фанеры, ДСП и других материалов [86]. Одним из их изобретений является сложносоставной древесно-бамбуковый строительный материал, внешне похожий на необработанный бамбук. Суть заключается в следующем: в полости бамбукового ствола забиваются предвари-

тельно обработанные круглые деревянные стержни, заполняющие сердцевину бамбука, при этом для прочной фиксации используется склеивающее вещество.

Китай является страной с наиболее долгой историей применения бамбука в качестве строительного материала. Еще в древнем Китае, в районе Юньнань, народность Дай применяла бамбук в качестве материала для строительства традиционных национальных бамбуковых сооружений – бамбуковых домов (рисунок 1.19) [117]. Дайский традиционный бамбуковый дом имеет историческую и высокую исследовательскую ценность. В бамбуковых домах применялась форма традиционной китайской архитектуры. Для соединения узлов использовалась пеньковая веревка, и, возможно, гвозди. В процессе эксплуатации под влиянием природных и климатических факторов зачастую обнаруживалось ослабление узловых соединений конструкций, к тому же гвозди не давали полную гарантию надежности крепления узлов и зачастую приводили к разрушению бамбуковых элементов, поэтому подобный традиционный способ узлового соединения в современном строительстве уже не может быть применен [53].

Рисунок 1.19 – Дом из бамбука в южном Китае

В 2009 году профессор Хунаньского университета Сяо Ян по своей технологии создал особый вид бамбуковой фанеры и из нее построил облегченное малоэтажное сооружение, используемое в качестве жилого дома (рисунок 1.20). Профессор Сяо Ян в своем проекте в сопряжениях конструкций непосредственно использует болтовые соединения. Такое решение обеспечивает скорость и удобство возведения [54].

Рисунок 1.20 – Дом из бамбуковой фанеры

В настоящее время существует «Международная ассоциация Бамбука и Ротанга (INBAR)», которая является первой международной межправительственной некоммерческой организацией в данной вопросе. Учреждена эта организация в Китае. Эта организация была создана по совместной инициативе 6 ноября 1997 года Канады, Китая, Бангладеш, Индонезии, Мьянмы, Непала, Филиппин, Перу, Танзании и других стран [93]. Целью организации является исследования в сфере строительства зданий и сооружений из бамбука, а также стандартизация и каталогизация в исследуемой сфере [113]. Например, для инженеров, использующих в своих проектах бамбук выпущена литература по этой теме, которая называется

«Технические отчеты проектов строительства из бамбука» (Gutierrez 2000, Janssen 2000, Jayanettiand Follett 1998) [114].

1.5 Типы существующих соединений бамбуковых конструкций

Существующие в мире сооружения из необработанного бамбука по системе соединений точек в узлах можно условно разделить на следующие 6 типов: соединения; перевязанные жгутами; прямое соединение бамбуковых узлов нагелями и болтами; узловые соединения «выпиловкой» по методу «Цюань Доу»; узлы, усиленные цементным раствором, узлы с металлическими элементами и узлы с металлическими накладками и прокладками.

Соединения, перевязанные жгутами

Такие соединения применяются для простых конструкций. Подобный узел воспринимает только растягивающее усилие, не воспринимая сжимающее усилие, поперечную силу и момент. Относительным преимуществом является то, что нет необходимости учитывать собственный вес жгута-веревки. Иногда жгуты для большей прочности перед использованием пропитывают маслом (рисунок 1.21).

В процессе использования из-за природных факторов, а также изменения температуры и влажности часто появляются признаки ослабления, разрывов и гниения узла. Несущая способность подобных узлов определяется используемым жгутом и, следовательно, не значительна. Вместе с тем расчет несущей способности затруднен из-за неравномерно распределенной нагрузки в самом узле [87].

Рисунок 1.21 – Соединения, перевязанные веревками

Прямое соединение бамбуковых элементов нагелями и болтами

Узловые соединения этого типа не надежны из-за легко появляющихся признаков расщепления в относительно тонких стенках необработанного бамбука и негарантированной устойчивости крепления гвоздей или болтов, а также из-за часто появляющихся изгибов или проломов при забивании гвоздей. В процессе эксплуатации сооружений в местах соединения элементов гвоздями и болтами из-за появляющихся зазоров может возникнуть ослабление конструкции. Условия повышенной влажности могут стать причиной коррозии и порчи нагелей и болтов и повлиять на надежность конструкции. Таким образом, узлы подобного типа не подходят для использования в современных соединениях сооружений из бамбука (рисунок 1.22) [88].

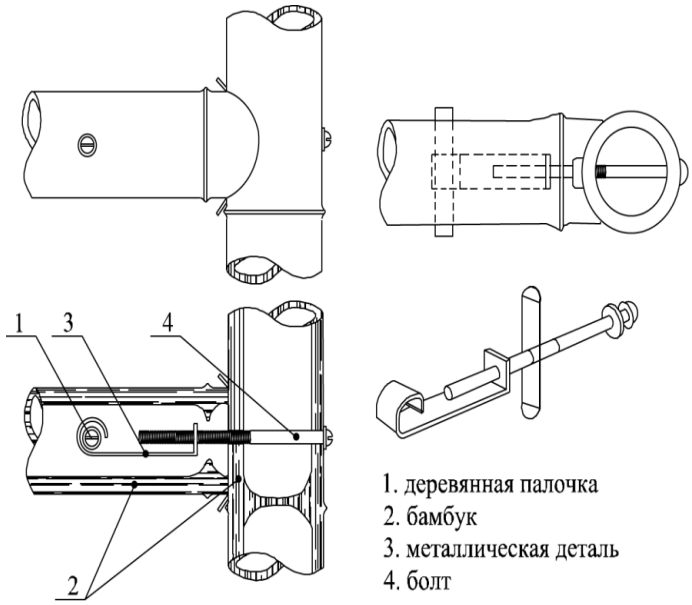


Рисунок 1.22 – Прямое соединение бамбуковых узлов гвоздями и болтами

Соединения «выпиловкой» по методу «Цюань Доу»

Конструкции «Цюань Доу» являются одним из типов деревянных каркасов древней архитектуры Китая. Каркас формируется следующим образом: бамбуковые вертикальные стойки принизываются горизонтальными деревянными балками, для чего в стойках выполняются сквозные гнезда (рисунок 1.23).

Конструкции, выполненные по методу «Цюань Доу», совмещающему бамбуковые и древесные материалы, обладают сравнительно неплохой несущей способностью. Однако при случавшихся землетрясениях были выявлены некоторые недостатки такой конструкции. Сравнительно небольшая продольная жесткость зданий с каркасами на основе «Цюань Доу» приводит к тому, что при колебаниях во время землетрясений возникает ощутимый крен конструкции, опасность разъединения шипов и гнезд, влекущие за собой обрушение постройки. Кроме того, из-за устройства гнезда в бамбуке несущая способность в данном месте сильно

снижается. Преимущества бамбукового ствола, как готового строительного элемента, таким образом, не используются [55].

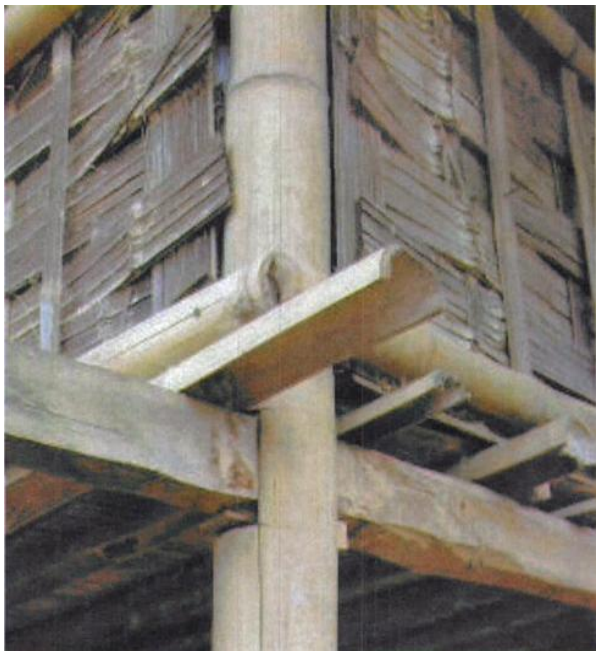


Рисунок 1.23 – Соединения по методу «Цюань Доу»

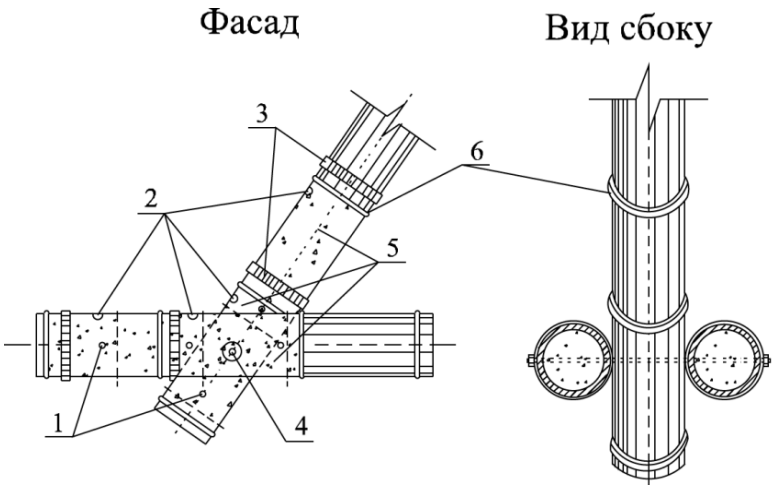
Узлы, усиленные цементным раствором

Для устранения недостатков прямого соединения бамбуковых элементов болтами (тип 3) было предложено усиливать бамбуковые стволы в месте установки болта цементным раствором (рисунок 1.24). Полость бамбукового ствола между естественными диафрагмами через специально просверленные отверстия диаметром 20–30мм заполняется цементным раствором. Такое решение позволяет избежать расщепления бамбука в зоне установки болта. Однако, появляется ряд других недостатков, связанных с технологическим процессом [34].

1. Отверстия, необходимые для заполнения бамбука цементным раствором, влияют на жесткость самого бамбукового элемента. Из-за этого их размер стараются минимизировать. В свою очередь это усложняет подачу через них раствора.

2. Ввиду непроницаемости бамбука и разности в диаметре стволов, трудно контролировать плотность заполнения и количество цементно-песочного раствора. Часто в бамбуке остаются полости, незаполненные растровом.

3. Существенным недостатком также является низкая скорость монтажа в виду того, что каждый узел приходится отдельно заполнять раствором непосредственно на строительной площадке.



1 – металлические шпильки; 2 – отверстия для заливки раствора на расширяющемся цементе; 3 – несущий болт; 4 – хомуты из полосовой стали; 5 – отсеки, заполняемые раствором; 6 – сустав бамбука.

Рисунок 1.24 – Узлы, усиленные цементным раствором

Узлы с металлическими элементами

Под узлами с использованием металлических элементов понимаются соединения сборного типа с использованием болтов, стержней арматуры, сцепок, зажимов, ободков и других деталей (рисунок 1.25).

Для обеспечения жесткости и устойчивости соединений пустоты, существующие в необработанном бамбуке в местах соединений, обычно заполняют цементным раствором. Соединения узлов сборного типа с металлическими элементами отличаются надежностью, относительной простотой сборки, возможностью

многократного использования отдельных элементов, водостойкостью. Внутренние полости бамбука при этом защищены от биологических вредителей, а стенки ствола бамбука от расщепления [89]. Тем не менее сохраняется ряд недостатков, связанных с использованием цементного раствора в качестве заполнителя пустот, о которых сказано выше.

Рисунок 1.25 – Узлы с металлическими элементами

Узлы с металлическими накладками и прокладками

Этот тип соединения отличается тем, что не предполагает использования цементного раствора. Вместо этого бамбуковые стволы прорезаются центральной стальной пластиной, которая затем при помощи высокопрочных болтов, хомутов и т. п. скрепляется с бамбуком (рисунок 1.26). В случае соединения в узле нескольких бамбуковых стержней требуется специальный элемент, собранный из пластин, жестко соединенных под необходимыми углами. Может быть предусмотрена возможность изменения углов взаимного расположения бамбуковых стержней. Такие

узлы достаточно легки в демонтаже, пригодны для соединения сравнительно сложных узлов [56].

Соединения с металлическими листовыми элементами вместе с указанными преимуществами обладают рядом недостатков. Во-первых, из-за неодинаковой формы и размеров бамбуковых стволов серийное изготовление стальных соединяющих элементов затруднено. Во-вторых, требуется сложная предварительная подготовка бамбука. В-третьих, стоимость подобных соединений относительно высока. Эти же недостатки можно отнести и к узлам с использованием металлических элементов (тип 5).

Рисунок 1.26 – Узлы с металлическими листовыми элементами

Ни один из приведенных типов соединения бамбуковых элементов не отвечает требованиям современного этапа строительства из бамбука. Основываясь на приведенном кратком обзоре, можно выделить основные задачи, которые следует решать при разработке современных конструкций узлов соединения бамбуковых элементов. Они заключаются в повышении скорости монтажа, уменьшении стои-

мости строительства, усилении надежности конструкции, максимально эффективном использовании положительных свойств бамбука. Чтобы решить эти вопросы, необходима модернизация способов соединения бамбука, разработка лучших способов соединения, развитие более рационального применения бамбуковых материалов.

1.6 Проблемы использования бамбука в строительстве

Несмотря на существенные преимущества бамбука, перечисленные в пункте 1.2 текущей главы, бамбук имеет и ряд следующих недостатков, которые выявлены, в том числе, в процессе строительства из него (пункт 1.4 текущей главы).

1) Полая структура бамбука с пустым пространством внутри и сильной конусностью непроста в обработке и сложна при противопожарной обработке.

2) Волокна бамбука имеют лишь продольное направление, поэтому при вертикальной нагрузке в нем образуются продольные трещины.

3) По сравнению с древесиной, бамбуковые материалы имеют большое содержание сахарида, крахмала, протеинов, которые создают некоторые проблемы при антисептической обработке.

4) В местах соединения стеблей бамбука возможны ослабления. Именно соединение бамбука является слабым местом конструкций из него. Поэтому разработка оптимального варианта соединения стержней из бамбука имеет важное практическое значение.

ГЛАВА 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СОЕДИНЕНИЯ

2.1 Соединения основных элементов конструкции в технологии современного строительства из бамбука

К ключевым узловым соединениям в современной бамбуковой архитектуре относятся элементы, работающие на растяжение и сжатие. По месторасположению ключевые конструктивные узловые соединения в современной бамбуковой архитектуре подразделяются на: узлы кровли, узлы опорных конструкций кровли и узлы фундамента.

Прочность, жесткость и устойчивость любой конструкции зависит в числе прочего и от того, насколько прочны соединения между конструктивными элементами в каждой отдельной части. Развитие конструктивных технологий и техники соединения определяет внешний вид, размер и качество узлов. Технологии соединения в современной бамбуковой архитектуре являются особенно важными, так как вопрос конструктивных соединений является главным ограничивающим фактором в современной бамбуковой архитектуре [56]. Поэтому архитекторы и инженеры во всем мире прилагают усилия в поиске способа конструктивного соединения, которое позволило бы создавать принципиально новые конструкции из бамбука. Кроме этого, бамбук является природным материалом, имеющим ограничения по длине, площадь его поперечного сечения невелика, несущая способность ограничена, к тому же материал подвержен расщеплению. Эти факторы также следует учитывать при разработке узловых соединений. На основе обзора существующих типов узловых соединений бамбука, приведенного в главе 1, мож-

но выделить следующие основные принципы, которыми следует руководствоваться при разработке узлового соединения бамбуковых элементов нового типа.

2.2 Принципы современного проектирования узловых соединений из бамбука

Механическое соединение элементов

Соединение современных конструкций из бамбука должно осуществляться за счет механического крепления элементов друг к другу (без использования клея или других вяжущих материалов). При этом соединение узлов должно в полной мере использовать механические свойства бамбука. В конструкции узла следует минимизировать работу бамбука на сдвиг и смятие поперек волокон. Принцип механического соединения элементов отвечает тенденциям развития производства и монтажа узловых соединений [70].

Отсутствие передачи момента силы

Наиболее рациональным использованием бамбука в конструкциях является применение его в стержневых элементах, работающих на растяжение или сжатие. В связи с этим узлы соединения бамбуковых элементов должны быть шарнирными, то есть не допускающими передачу изгибающего момента [70].

Технологичность

Благодаря своей естественной форме, бамбук часто используется для шарнирно-стержневых конструкций в бамбуковой архитектуре. Количество соединений отдельных стержней в таких конструкциях велико. Поэтому простота монтажа каждого соединения оказывается важной и существенно сказывается на скорости строительства. Для соединения бамбуковых стволов рационально использо-

вать металлические соединительные элементы. Такие соединения выполняются в краткие сроки и отличаются высокой эффективностью. С другой стороны, они позволяют использовать принцип унификации, что приводит к упрощению конструктивных элементов в бамбуковой архитектуре [71].

Прочность и жесткость

Положение стержней при стыковке и соединении элементов конструкции из бамбука является основой, гарантирующей безопасность и надежность постройки, поэтому узловые точки одновременно с обеспечением надежной передачи усилия, также должны выдерживать собственную и внешнюю нагрузку. Значит, в местах соединения узловых точек необходимо должным образом обеспечивать жесткость и прочность [72].

Художественная выразительность

Узловые соединения играют важную роль в процессе формирования архитектурного облика строения. Поэтому в ходе проектирования необходимо учитывать производимый визуальный эффект, наряду с использованием прогрессивной техники соединения конструкций и ясным представлением логики устройства, выразить художественную красоту современных узловых соединений.

В современной архитектуре часто применяются открытые конструкции, то есть несущие конструкции здания одновременно выполняют и художественную функцию. Применительно к бамбуковой архитектуре важным приемом становится создание акцентов именно на узловых соединениях. При этом требуется, чтобы элементы конструкции при соединении выглядели рационально. Так, например, в настоящее время соединение стволов бамбука происходит за счет использования

стальных элементов. Однако, требованию аккуратности внешнего вида соединения уделяется недостаточное внимание. При разработке узла соединения следует стремиться, чтобы в сочетании с бамбуковыми конструкциями такие соединения выглядели контрастно, наделяя архитектуру более оживленным характером [73].

2.3 Предлагаемый вариант соединения бамбуковых конструкций новой модели

Идеи проектирования узлов нового типа

В настоящее время предпринимаются попытки разработки нового типа узлов соединения бамбуковых элементов. Проекты новых форм узлового соединения, главным образом, основаны на типе соединения с использованием стального соединительного шара, усовершенствованном В.К. Файбишенко и другими конструкторами. Данный тип узлового соединения относится к «системам МАРХИ» (рисунок 2.1) [4]. Благодаря изучению механических свойств бамбука, стало возможным выполнять бамбуковые конструктивные соединения по аналогии с проектами стальных узловых соединений, так как цилиндрические стволы бамбука близки к стальным трубам и по внешнему виду, и по механическим свойствам. Идея конструктивного решения узла состоит в том, что бамбуковые стволы крепятся к общему соединительному элементу (стальному

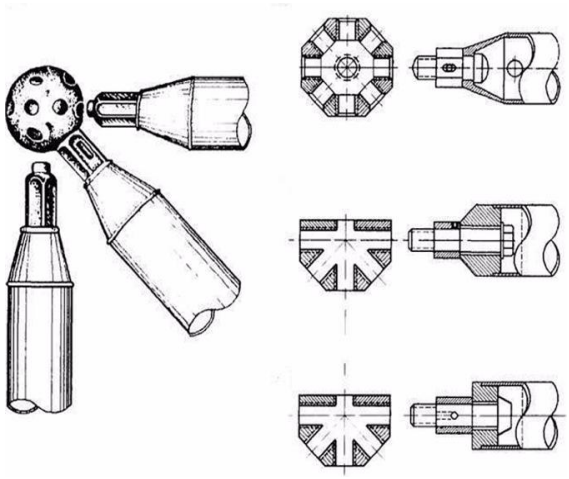


Рисунок 2.1 – Узловое соединение «система МАРХИ»

шару) по отдельности, что способствует всестороннему проявлению механических свойств бамбука, а также упрощает монтаж и демонтаж конструкции. При этом болтовое соединение с использованием стального соединительного шара, используемое для стальных конструкций, в настоящее время имеет уже танную технологию с четко определенными стандартами выполнения тельного шара и самого болтового соединения. Таким образом, задача разработки нового узла сводится к разработке конструктивного решения присоединения отдельного бамбукового стержня к стальному соединительному шару [20].

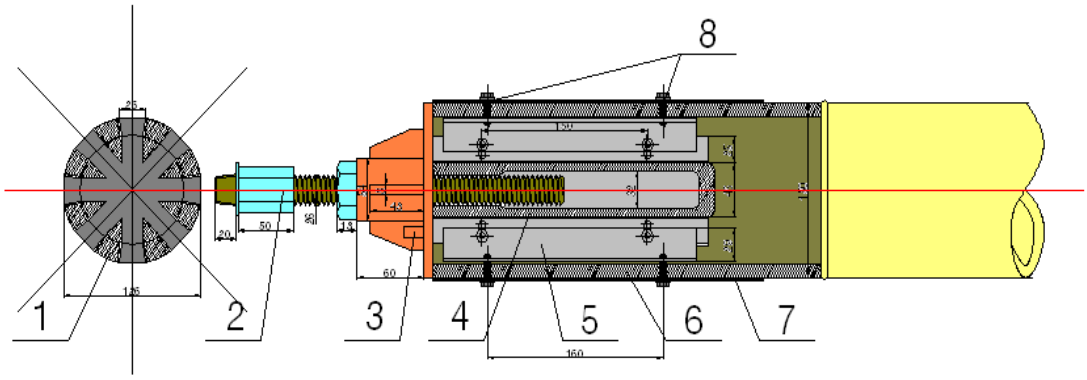
Разработка варианта соединения конструкций

(1) Первый вариант

Этот вариант исполнения узла являлся некоторой доработкой узла, немецкого архитектора Маркуса Хайнсдорфа（Markus Heinsdorff）для павильона «Немецко-Китайского дома» на всемирной выставке в Шанхае в 2010 году (рисунок 2.2) [90], где в узле использовался цементный раствор.

В нашем варианте металлические соединительные элементы, вмонтированные в бамбук, залиты эпоксидным клеем (рисунок 2.3). Принимая во внимание не идеально круглую форму бамбука в поперечном сечении, в соединительных элементах были установлены регулируемые металлические пластины, которые с помощью винтов крепились к не круглому изнутри поперечному сечению бамбука. С внешней стороны установлены хомуты, для исключения растрескивания концов бамбука на участках соединения с металлическими внутренними элементами.

Рисунок 2.2 – Узел соединения павильона «Немецко-Китайский дом»



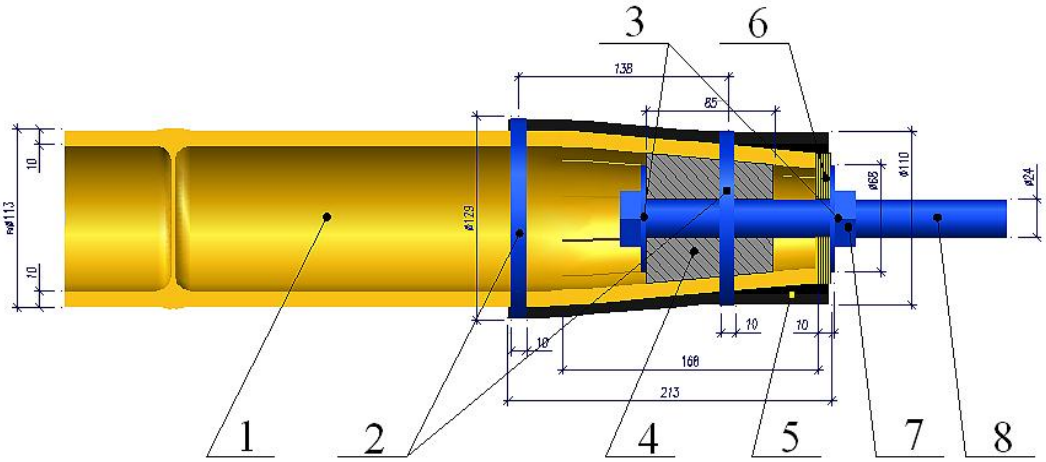
1 – шар-коннектор «система МАРХИ»; 2 – регулируемый винт; 3 – эпоксидная заливка; 4 – металлическое крепление; 5 – регулирующее крепление; 6 – бамбук; 7 – труба со стенкой из углеродных волокон; 8 – крепежные винты.

Рисунок 2.3 – Первый вариант

(2) Второй вариант

Второй вариант применим, главным образом, к узловым соединениям на механической основе. В данном случае устраняется необходимость эпоксидных материалов и сложных металлических внутренних связей. Конец ствола бамбука разделен на несколько пластин (зубцов), напоминает форму цветка с распущен-

ными лепестками. После термической обработки «зубцы» концевой части бамбука затягиваются с внутренним конусом под определенным углом. С внутренней части бамбука, как правило, в таком случае устанавливается конус с болтами, снаружи устанавливается полипропиленовая труба, которая крепится двумя хомутами на бамбук (рисунок 2.4).



1 – бамбук; 2 – хомуты стяжные; 3 – шайба; 4 – конус из стали (или бетона);
5 – полипропиленовая труба; 6 – крышка-шайба упорная ; 7 – гайка; 8 – болт.

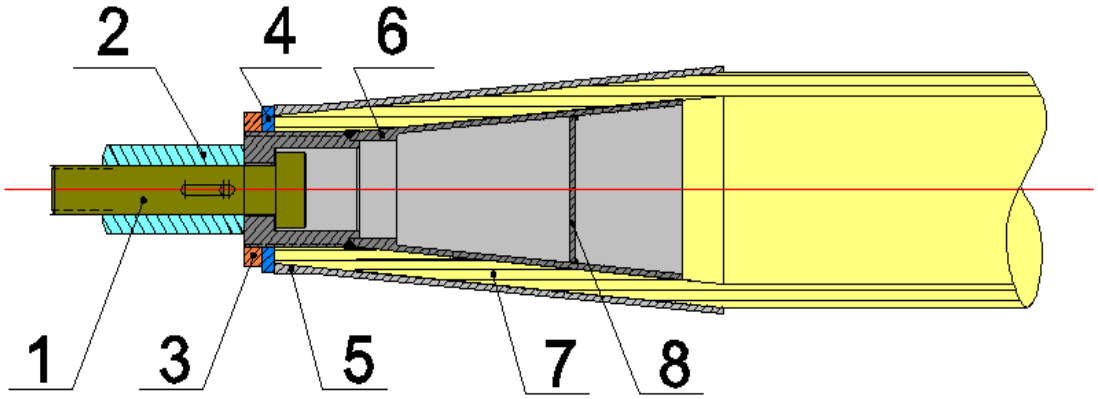
Рисунок 2.4 – Второй вариант

Принцип работы конструкции: благодаря определенному углу, при растяжении, внутренний конус, бамбук и внешняя полипропиленовая трубка оказываются в состоянии взаимного сдерживания, в результате чего происходит «самоблокировка». Нагрузка передается через болты на конус внутренней части, а затем через конус – на ствол бамбука. Нагрузка с внешних полипропиленовых труб напрямую передается на ствол бамбука.

(3) Третий вариант («Узел СПбГАСУ»)

Третий вариант является усовершенствованием второго. На концах бамбука присутствуют аналогичные разделения на зубцы в форме цветочных лепестков.

Внутри бамбука установлен металлический конус с резьбой, высокопрочные болты устанавливаются на конус. После термической обработки «лепестки» концевой части бамбука аналогично с предыдущим вариантом затягиваются с внутренним конусом под определенным углом. Снаружи, как правило, используется металлический конус. Гайка ввинчивается на резьбу внутреннего конуса, внутренний и внешний конусы затягиваются с помощью гаек. На все болты сверху устанавливаются шестигранные гайки, помогающие резьбе болтов входить в обод (рисунок 2.5).



1 – болт; 2 – шестигранная гайка; 3 – гайка упорная; 4 – шайба упорная; 5 – внешний стальной конус; 6 – внутренний стальной конус; 7 – бамбук; 8 – круглая стальная перепонка.

Рисунок 2.5 – Третий вариант

Принцип работы конструкции: с помощью внутреннего и внешнего конусов можно увеличивать прочность и контактную поверхность бамбука. При нагрузке на соединение, нагрузка с болтов передается на внутренний конус, и, благодаря внешнему конусу, бамбуку и внешнему конусу, возникает эффект «самоблокировки», поэтому нагрузка еще более эффективно передается на ствол бамбука. Проекты третьего варианта могут увеличить прочность соединения бамбука и метал-

лических узлов, устранить множество проблем, связанных с неодинаковыми размерами стволов бамбука.

2.4 Расчет нового соединения элементов

Анализ работы нового узла соединения

Как уже было отмечено, в проекте узлового соединения нового типа используется идея о применении в качестве соединительного элемента для бамбуковых стержней стального шара–коннектора из «систем МАРХИ» [4]. Другая идея, составляющая ценность данной работы состоит в том, что, были разработаны новые проекты по соединению металлических и бамбуковых деталей, согласно которым соединение металлических и бамбуковых деталей осуществляется механическим способом. Особенностью соединений, описанных в пункте 2.3.2, является разница в работе при восприятии сжимающей и растягивающей нагрузок. Ниже приводятся соответствующие описания.

Анализ работы при растяжении

Растягивающая нагрузка в рассматриваемом узле от шара–коннектора передается на болт, а с болта – на внутреннюю металлическую деталь (внутренний конус). На конце ствола бамбука имеются разрезы в виде «лепестков», после обработки они образуют такой же угол, как внутренний металлический конус. Поэтому при восприятии усилия, между внутренним конусом и внешней частью из-за трения образуется эффект «самоблокировки». Внутренний конус вплотную соединяется с бамбуковым стволом, и нагрузка равномерно распределяется на бамбуковый ствол (рисунок 2.6). Внешний конус в течение всего процесса вос-

приятии усилия выполняет функцию контроля и ограничения выхода концов ствола бамбука за пределы соединения, обеспечивая эффективное соединение в результате «самоблокировки» внутреннего конуса и концов ствола бамбука.

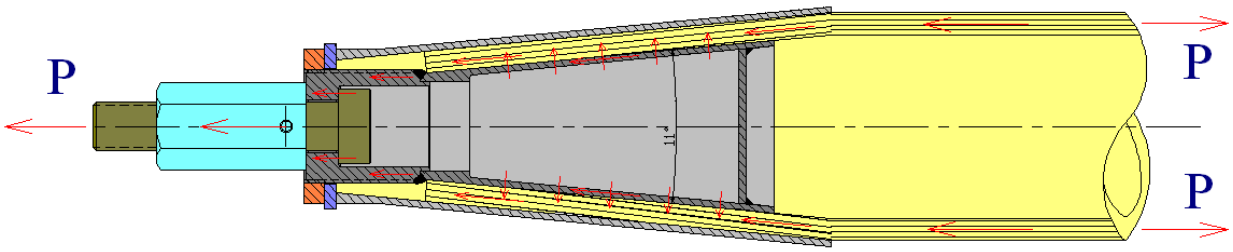


Рисунок 2.6 – Анализ нового узла соединения при работе на растяжение

Анализ работы на сжатие

Работа узла на сжатие отличается от работы на растяжение. При восприятии предлагаемым соединениям сжимающего усилия, нагрузка через шар-коннектор передается на шестигранные болтовые гайки, а не на болты. Сжатие с шестигранных болтовых гаек передается через резьбу внутреннего конуса на гайку, соединяющую внутренний и внешний конусы. Затем нагрузка передается на внешний конус, и, в заключении, через внешний конус– на весь бамбуковый ствол (рисунок 2.7). В течение всего процесса восприятия усилия в болте и внутреннем конусе напряжения не возникают. Главным является то, что усилие от нагрузки посредством металлических деталей равномерно распределяется на бамбуковый ствол.

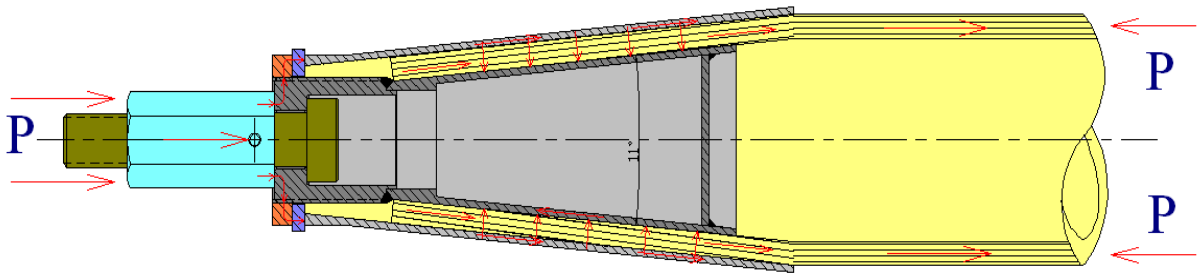


Рисунок 2.7 – Анализ нового узла соединения при работе на сжатие

Аналитический расчет узла

В первом приближении расчет ведется для каждого элемента в отдельности. Узел состоит из следующих расчетных элементов (рисунок 2.9): болта, внутреннего конуса, внешнего конуса, бамбукового «конуса», собственно бамбукового ствола. Расчет ведется в упругой стадии. Для расчета конических элементов используется безмоментная теория оболочек, суть которой описана, например, в книге С.П. Тимошенко и С. Войновского-Кригера [31]. Мембранные усилия (нормальные силы на единицу длины срединной поверхности оболочки) связаны уравнением Лапласа:

$$\frac{N_t}{\rho_t} + \frac{N_m}{\rho_m} = p \quad , \tag{2.1}$$

Где N_t, N_m – мембранные усилия, ρ_t, ρ_m – радиусы кривизны оболочки в соответствующих направлениях, p – нормальное давление по поверхности оболочки.

С учетом того, что для конуса $\rho_m = \infty$,

$$N_t = p \cdot \rho_t \quad , \tag{2.2}$$

Расчет на действие растягивающей нагрузки

Расчетная схема ***внутреннего конуса*** представлена на рисунке 2.8. Нагрузка, приложенная к торцевой окружности, составляет $P = N/(2\pi\rho_0)$, где N – приложенная к узлу нагрузка. Давление по боковой поверхности составляет [30].

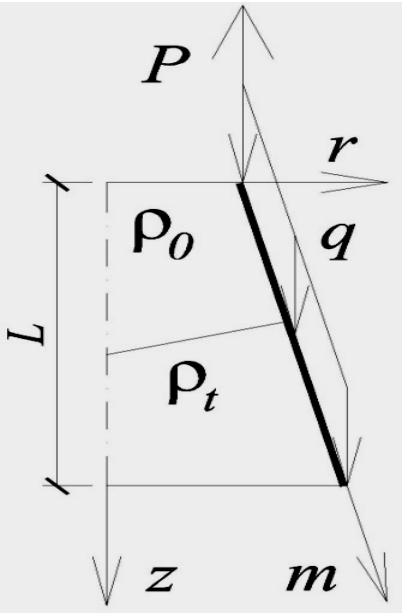


Рисунок 2.8. Расчетная схема внутреннего конуса

$$q = \frac{N\cos\alpha}{\pi(2\rho_0 + L\mathrm{tg}\alpha)L} \quad , \tag{2.3}$$

Радиус кривизны в произвольном месте записывается следующим образом:

$$\rho_t = (\rho_0 + z\mathrm{tg}\alpha)/\cos\alpha \quad , \tag{2.4}$$

После подстановки (2.3) и (2.4) в (2.2) и необходимых преобразований можно получить выражение для мембранного усилия в тангенциальном направлении

$$N_t = \frac{\sin\alpha(\rho_0 + z\mathrm{tg}\alpha)}{\pi(2\rho_0 + L\mathrm{tg}\alpha)L}N \quad , \tag{2.5}$$

Усилие N_m вычисляется из условия равновесия отсеченной части конической оболочки и после преобразований имеет вид

$$N_m = \frac{(2\rho_0 + L\mathrm{tg}\alpha)L - (2\rho_0 + z\mathrm{tg}\alpha)z}{2\pi(2\rho_0 + L\mathrm{tg}\alpha)(\rho_0 + z\mathrm{tg}\alpha)L\cos\alpha} N \quad , \qquad (2.6)$$

Для оценки прочности в случае двухосного напряженного состояния принимается критерий Мизеса, который для рассматриваемого случая с учетом перехода от усилий к напряжениям имеет вид [30]:

$$\sqrt{N_t^2 - N_t N_m + N_m^2} / t = R \quad , \qquad (2.7)$$

Где t – толщина оболочки, а R – предел прочности материала при осевом растяжении.

Внешний конус не воспринимает нагрузки в направлении продольной оси; на него передается только радиальное давление (вдоль оси r на рисунке 2.8). Поэтому в нем возникает только одно мембранное усилие N_t, которое вычисляет по формуле (2.5), но будет иметь противоположный знак.

Бамбук оказывается зажат между двумя конусами и испытывает сжатие поперек волокон под углом α. Напряжения в нем составляют

$$\sigma_{bam} = q = \frac{\cos\alpha}{\pi(2\rho_0 + L\mathrm{tg}\alpha)L} N \quad , \qquad (2.8)$$

Из формул (2.5), (2.6), (2.7) и (2.8) для каждого из элементов можно получить разрушающую нагрузку [N]. Вычисления проведены с использованием программного комплекса MathCAD при исходных данных из таблицы 2.1(эти данные соответствуют опытам, описываемым далее в главе 3) [22]. Схема обозначений приведена на рисунке 2.9. Результаты расчета сведены в таблицу 2.2.

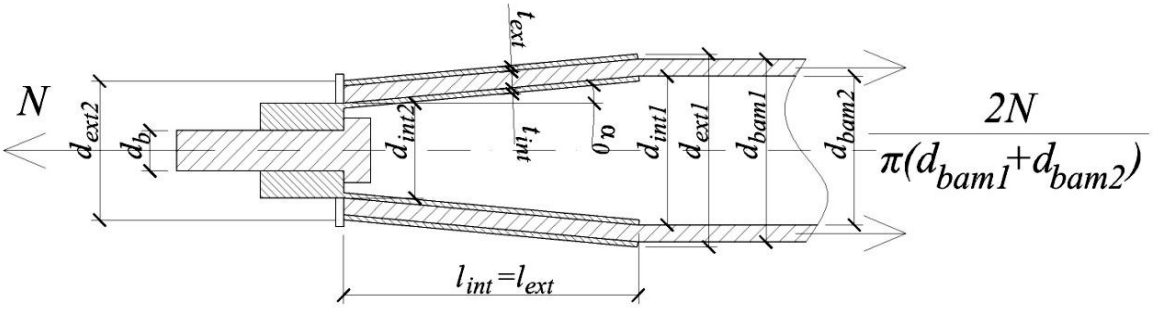


Рисунок 2.9 – Схема обозначений параметров узла

Таблица 2.1 – Исходные данные для аналитического расчета

Наименование	**Обозначение**	**Ед. изменения**	**Значение**
Предел прочности бамбука на растяжение вдоль волокон	R_{bamt}	МПа	115,1
Предел прочности бамбука на сжатие вдоль волокон	R_{bamc}	МПа	73,9
Предел прочности бамбука на сжатие поперек волокон	R_{bamc90}	МПа	28,2
Нормативное сопротивление стали болта (табл. Г8 СП16.13330)	R_{byn}	МПа	1078
Предел текучести стали (С235 табл. В5 СП16.13330)	R_{yn}	МПа	235
Площадь болта нетто (М24)	A_{bn}	см^2	3,52
Диаметр бамбукового стержня внешний	d_{bam1}	см	10,8
Диаметр бамбукового стержня внутренний	d_{bam2}	см	8,8
Толщина стенки внутреннего конуса	t_{int}	см	0,3
Диаметр внутреннего конуса малый	d_{int2}	см	5,62
Диаметр внутреннего конуса большой	d_{int1}	см	8,8
Длина внутреннего конуса	l_{int}	см	17,55
Толщина стенки внешнего конуса	t_{ext}	см	0,3
Диаметр внешнего конуса малый	d_{ext2}	см	8,22
Диаметр внешнего конуса большой	d_{ext1}	см	11,4
Длина внешнего конуса	l_{ext}	см	17,55
Угол наклона боковой поверхности конуса	α_0	град.	5,17

Источник: разработано автором

Расчет на действие сжимающей нагрузки

Расчет на действие сжимающей нагрузки выполняется аналогично расчету на растяжение с использованием формул (2.5), (2.6), (2.7), (2.8). Отличие заключается в работе внутреннего и внешнего конусов. ***Внешний конус*** испытывает действие усилий N_m и N_t, а на ***внутренний конус*** передается только радиальное давление, и, следовательно, в нем будет возникать только усилие N_t [32]. Результаты расчета представлены в таблице 2.2.

Следует отметить, что описанный расчет носит приближенный характер. Он не учитывает совместность работы деталей узла, физическую и геометрическую нелинейности, неравномерность передачи усилий от элемента к элементу, силы трения, объемное распределение напряжений (для расчета использована безмоментная теория оболочек) и другие факторы. Тем не менее, простота формул и возможность использования программного комплекса MathCAD позволяют на первом этапе быстро подобрать требуемые параметры узла [21].

Таблица 2.2 – Предельная нагрузка, полученная из аналитического расчета

Условие	**Значение нагрузки [*N*], кН**
Расчет на действие растягивающей нагрузки	
Сохранение прочности бамбукового стержня	354,3
Сохранение прочности бамбука в узле	2947,0
Сохранение прочности внутреннего конуса	**118,1**
Сохранение прочности внешнего конуса	7456,0
Сохранение прочности болта	379,5
Расчет на действие сжимающей нагрузки	
Сохранение прочности бамбукового стержня	227,5
Сохранение прочности бамбука в узле	2947,0
Сохранение прочности внутреннего конуса	7015,0
Сохранение прочности внешнего конуса	**189,7**
Сохранение прочности болта	379,5

Источник: разработано автором

Преимущество аналитического метода расчета состоит еще и в том, что он позволяет получить аналитические выражения для необходимых параметров узла при определенных исходных данных (например, нагрузке). Наиболее рациональным выглядит подход, наглядно изложенный в таблице 2.3. Для определения неизвестных в задаче есть условия, которые для наглядности сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.3 – Параметры узла

Обозначение	**Наименование величины**	**Условие, в которое входит величина (таб.2.4)**
	Известные величины	
R_{bamc90}	Предел прочности бамбука на сжатие поперек волокон	III
R_{byn}	Нормативное сопротивление стали болта	VI
R_{int}	Предел прочности материала внутреннего конуса	I
R_{ext}	Предел прочности материала внешнего конуса	II
E_{int}	Модуль упругости материала внутреннего конуса	IV
E_{ext}	Модуль упругости материала внешнего конуса	V
μ_{int}	Коэффициент Пуассона материала внутреннего конуса	IV
μ_{ext}	Коэффициент Пуассона материала внешнего конуса	V
D	Диаметр конуса большой (диаметр бамбука)	I, II, III, IV, V
	Определяемые величины	
L	длина конуса	I, II, III, IV, V
α	угол наклона образующей поверхности конуса	I, II, III, IV, V
t_{int}	толщина стенки внутреннего конуса	I, IV
t_{ext}	толщина стенки внешнего конуса	II, V
d_b	диаметр болта	VI

Источник: разработано автором

Таблица 2.4 – Условия работоспособности узла

Номер условия	**Условие**	**Величины, входящие в условие**	
		Заданные	Определяемые
I	Условие прочности внутреннего конуса	R_{int}, D,	L, α, t_{int}
II	Условие прочности внешнего конуса	R_{ext}, D,	L, α, t_{ext}
III	Условие прочности бамбукового «конуса»	R_{bamc90}, D,	L, α
IV	При деформации внутреннего конуса отношение малого диаметра к большому не должно превысить заданное значение (конус не должен деформироваться до состояния близкого к цилиндру)	E_{int}, μ_{int}, D	L, α, t_{int}
V	При деформации внешнего конуса отношение малого диаметра к большому не должно превысить заданное значение	E_{ext}, μ_{ext}, D	L, α, t_{ext}
VI	Условие прочности болта	R_{byn}	d_b

Источник: разработано автором

Условие VI можно не рассматривать, так как размеры болта (до понятных пределов) не связаны с размерами остальных элементов. Из условия VI можно сразу же определить необходимый диаметр болта.

Следует отметить, что, несмотря на то, что диаметры и длины внешнего, внутреннего и бамбукового конусов не совпадают, они связаны через толщину стенки бамбука, которая известна. Поэтому они могут считаться фактически заданными. Таким образом, задача сводится к определению четырех неизвестных из пяти уравнений. Наиболее рациональным выглядит следующий порядок действий:

1. из условий I, III, IV определить L, α, t_{int};

2. зная L, α, t_{int}, из условия II определить t_{ext};

3. зная L, α, t_{int}, из условия V определить t_{ext};

4. принять наибольшее значение t_{ext} из пунктов 2 и 3.

Задача существенно упрощается, если принять угол α за известную величину. Поскольку этот угол определяется гибкостью стенок бамбука и конструктивными особенностями узла, он не варьируется в широких пределах и может быть принят равным 5 – 7 градусам. В этом случае параметры узла можно установить только из условий прочности (условия I, II, III таблицы 2.4). Однако, анализ показал, что подбор длины *L* не имеет смысла, так как она несущественно влияет на прочность элементов узла, кроме бамбукового «конуса», но и она оказывается обеспечена при достаточно небольших значениях *L*. Длина конических элементов, как показали опыты (глава 3), должна назначаться из конструктивных соображений с целью минимизации возможных локальных концентраций напряжений. Решающее значение для прочности элементов узла имеют их толщины.

Для точной оценки работы узла представленный аналитический расчет не подходит. В этой связи был проведен расчет с использованием средств программного комплекса ANSYS.

2.5 Численный анализ нового соединения в комплексе ANSYS

Построение расчетной модели узла соединения

Итерационный решатель: Программа ANSYS предлагает большое количество итерационных решателей в качестве альтернативы прямых решателей (sparse solver). Эти итерационные методы во многих случаях приводят к снижению общего времени счета и увеличению размеры модели работы. Однако, в целом, итерационные методы не так надежны, как прямые [2].

Первые три итерационных метода основаны на методе сопряженных градиентов (CG). Первый из них - это «Jacobi Conjugate Gradient» (JCG-решатель) [118], который подходит для хорошо обусловленных задач. JCG-решатель доступен для действительных и комплексных, симметричных и несимметричных матриц. Второй - «Preliminarily Conjugate Gradient» (PCG-решатель) является эффективным и надежным для всех типов анализа. Третий - «Incomplete Cholesky Conjugate Gradient» (ICCG-решатель) является более надежным, чем PCG-решатель для обработки плохо обусловленных матриц. ICCG-решатель доступен для действительных и комплексных, симметричных и несимметричных матриц.

Типичная система уравнений, которые будут решены итеративно задается как: $[K]\{u\} = \{F\}$

Где: [K] = матрица жесткости системы;

{u}= вектор неизвестных перемещений;

{F}= вектор узловых сил;

в CG – методе решение находим в виде:

$$\{u\} = \alpha_1\{p_1\} + \alpha_2\{p_2\} + \cdots + \alpha_m\{p_m\}$$

$\{u_0\}=\{0\}$;

$\{R_0\}=\{F\}$;

$\{Z_0\}=[Q]^{-1}\{F\}$;

Do i=1, n;

If (Norm(R)$\leq\varepsilon^2$) then;

set $\{u\}=\{u_{i-1}\}$;

quit loop.

Else

If (i=1) then;

$\beta_1=0$;

$\{p_1\}=\{R_0\}$;

$$\alpha_1 = \frac{\{Z_0\}^T\{R_0\}}{\{P_1\}^T[K]\{P_1\}};$$

$\{R_1\} = \{R0\}-\alpha_1[K]\{P_1\}$.

Else

Applying preconditioning : $\{Z_{i-1}\}=[Q^{-1}]\{R_{i-1}\}$;

$$\beta_i = \frac{\{Z_{i-1}\}^T\{R_{i-1}\}}{\{Z_{i-2}\}^T\{R_{i-2}\}};$$

$\{P_i\}=\{Z_{i-1}\}+\beta_i\{P_{i-1}\}$;

$$\alpha_i = \frac{\{Z_{i-1}\}^T\{R_{i-1}\}}{\{P_i\}^T[K]\{P_i\}};$$

$\{R_i\}=\{R_{i-1}\}+\alpha_i[K]\{P_i\}$;

Endif

Endif

End loop

Модель трения: в базовой модели кулоновского трения две контактирующие поверхности могут нести напряжения сдвига. Когда эквивалентное напряжение сдвига меньше предельного касательного напряжения трения ($\tau_{\lim}$), тогда движение не происходит между поверхностями. Это состояние называется прилипанием (**sticking**). Модель кулоновского трения определяется как:

$$\tau_{lim} = \mu P + B$$

$$\|\tau\| \leq \tau_{\lim} \tag{2.9}$$

Где: $\tau_{\lim}$ – предельное касательное напряжение от трения;

$$\|\tau\| = \begin{cases} |\tau| & \text{эквиваленое напряжение для 2D контакта} \\ \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} & \text{эквивалентное напряжение для 3D контакта} \end{cases};$$

M– коэффициент трения для изотропного трения;

P – нормальное контактное давление;

B – контактная сплоченность.

После того, как эквивалентное напряжение трения превысит предельное касательное напряжение от трения $\tau_{\lim}$, контактные поверхности будут скользить друг относительно друга. Это состояние называния скольжением (**sliding**). Таким образом, состояния «прилипания \ скольжения» определяются расчетом, когда неравенство (2.9) переходит точку 0 (ноль) - из минуса (−) в плюс (+), то есть от прилипания к скольжению или наоборот (рисунок 2.10). Контакт (сплоченность) обеспечивает сопротивление скольжению даже при нулевом давлении.

Предоставляется возможность для определения максимального эквивалентного напряжения трения τ_{max} (вход в TAUMAX по команде RMORE), так что, независимо от величины контактного давления, скольжение будет иметь место, даже если величина эквивалентного напряжения трения достигает значения τ_{max} [119].

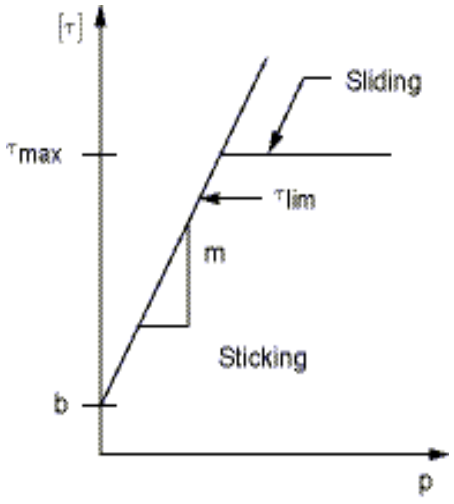


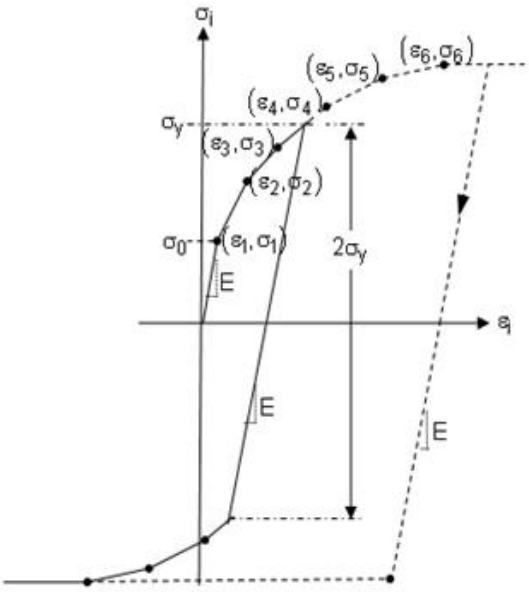
Рисунок 2.10 – Схема модели трения

Контактные элементы предлагают две модели трения Кулона: изотропного трения и ортотропного трения.

Изотропное трение: изотропная модель трения использует единый коэффициент трения μ_{iso} основан на предположении равномерного распределения «сплоченности» во всех направлениях. Он доступен со всеми 2-D и 3-D контактных элементов.

Нелинейная модель материалы с упрочнением (Multilinear Isotropic Hardening). Поведение модели похоже на билинейную изотропную модель с кривым участком в пластической зоне.

Поведение нелинейной модели описывается кусочно-непрерывной функцией (рисунок 2.11).



σ_i – интенсивность напряжений;

ε_i – интенсивность деформаций.

Рис 2.11 – Поведение нелинейной модели с осями

Первая точка на рисунке 2.11 соответствует пределу текучести. Последующие точки определяют упруго - пластические деформации [119].

Основные требования к моделированию

В проектах нового типа узлов, главным образом, используются три материала: бамбук, сталь 5 и сталь 45. С помощью программы для конечно-элементного анализа ANSYS было произведено моделирование предлагаемого узла. Модель должна отвечать четырем главным требованиям:

1 размеры модели должны соответствовать реальным;

2 характеристики материалов и параметры модели должны вводиться в соответствии с реальными свойствами;

3 расчетная схема – пространственная с объемными конечными элементами;

4 силы растяжения и сжатия должны соответствовать реальным условиям работы.

Определение физико–механических характеристик материала

Физико–механические характеристики материалов при моделировании предлагаемых узлов включают: модули упругости и коэффициенты Пуассона бамбука, модуль упругости и коэффициент Пуассона стали 5, модуль упругости и коэффициент Пуассона стали 45, коэффициент трения бамбука и металла, а также диаграмму σ_i- ε_i для учета пластических деформаций в стальных деталях. Модуль упругости бамбука Мосо вдоль волокон составляет 12222,3 МПа, модуль упругости поперек волокон составляет 1489МПа. Коэффициент Пуассона вдоль волокон составляет 0,325, коэффициент Пуассона поперек волокон 0,039 [57]. Модуль упругости стали 5 составляет 206000 МПа, коэффициент Пуассона 0,30 [58]. Модуль упругости стали 45 составляет 210000 МПа, коэффициент Пуассона 0,26 [110]. Коэффициент трения между бамбуком и металлом составляет 0,538 [59] (таблица 2.5).

Таблица 2.5

№	Название	Сталь 5 (Внешний и внутренний конус)	Сталь 45 (болт)	Бамбука (Мосо бамбука)
1	Плотность	7,858 г/см^3	7,85 г/см^3	0,81 г/см^3
2	Модуль упругости	206000 МПа	2010000 МПа	12222,3 МПа (вдоль волокон)
				1489 МПа (поперек волокон)
3	Прочность при растяжении	460 МПа	600 МПа	115,081 МПа
4	Предел текучести	235 МПа	355 МПа	_
5	Коэффициент Пуассона	0,25～0,30	0,269	0,325 (вдоль волокон)
				0,039 (поперек волокон)
6	Коэффициент трения (бамбук и сталь)	_	_	0,538 (вдоль волокон)
				0,478 (поперек волокон)

Источник: доработано автором

В вычислительном эксперименте были использованы механические свойства сталей-заменителей из российского сортамента (сталь 5, сталь 45). Диаграммы для сталей σ_i- ε_i при растяжении металлического образца были предоставлены лабораторией кафедры Е4 Балтийского Государственного Технического Университета им. Д.Ф. Устинова «Военмех».

Создание конечно-элементной модели

Модель исследуемого узла состоит из бамбуковой трубки, внешних и внутренних деталей, болтов и гаек. В анализе была использована сборочная конструкция с деталями, которая полностью соответствует конструкции, использованной при испытании на растяжение и сжатие. Проектирование было выполнено в 3D программе AutoCAD (рисунок 2.12) [26]. Затем модель была сохранена в промежуточном формате и импортирована в ANSYS. Далее модель была разбита на

объемные конечные элементы [63].

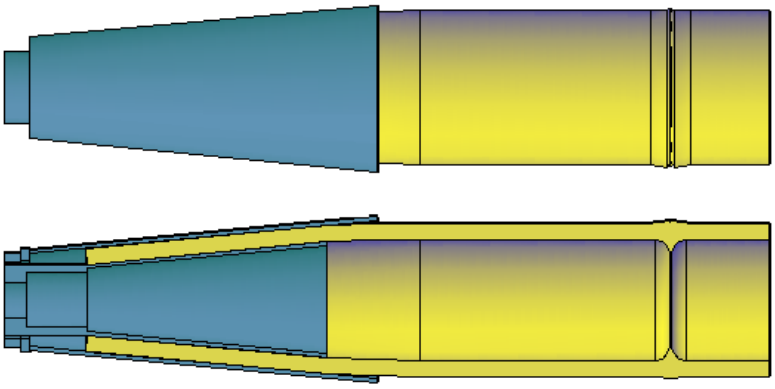


Рисунок 2.12 – 3D модели в программе AutoCAD

Упрощение модели узлов нового типа

В процессе проведения конечно-элементного анализа установлено, что качество конечно-элементной сетки имеет определенное влияние на результаты расчетов модели узла нового типа. Расчетная модель оказалась достаточно сложной для расчета в силу не малого количества деталей, присутствия различных материалов, необходимости разбивки на большое число конечных элементов, разной работы на растягивающую и сжимающую нагрузки. Для уменьшения шага разбиения сетки конечных элементов и, следовательно, повышения точности расчета при одновременном уменьшении самой расчетной модели было принято решение проводить расчеты для 1/4 модели (рисунок 2.13). Такое упрощение можно ввести в силу осевой симметрии узла [16].

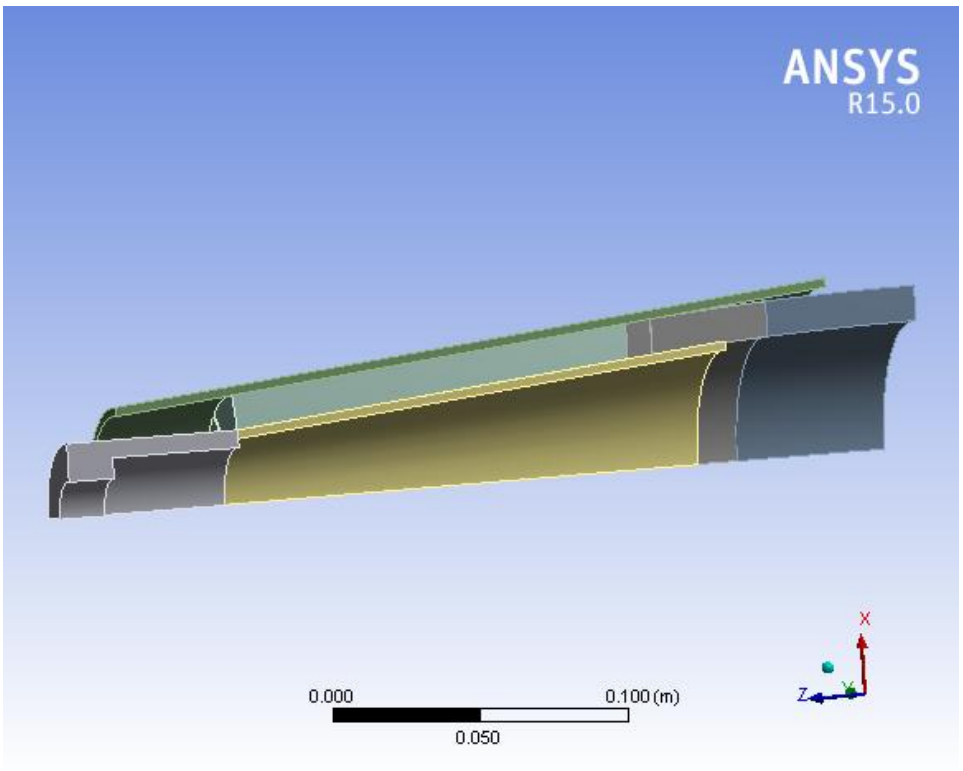


Рисунок 2.13 – Схема упрощенной модели в программе ANSYS

Нагрузка и условия закрепления

Значения прикладываемых нагрузок соответствуют значениям, полученным при экспериментальных исследованиях узла. Для учета геометрической нелинейности максимальное значение нагрузки разбито на 10 равных ступеней, прикладываемых последовательно. Работа программного комплекса подразумевает также дополнительную разбивку каждой ступени нагрузки. Условия закрепления отвечают реальной работе конструкции. Конечные элементы ориентированы по осям Z и X (рисунок 2.14). Условия закрепления, следующие: допускается перемещение стальных элементов узла вдоль осевой линии (Z), перемещение свободного торца бамбука при этом запрещено; запрещены перемещения в тангенциальном направлении по граням сектора узла (на одной грани – ось X, на другой – Y) [77].

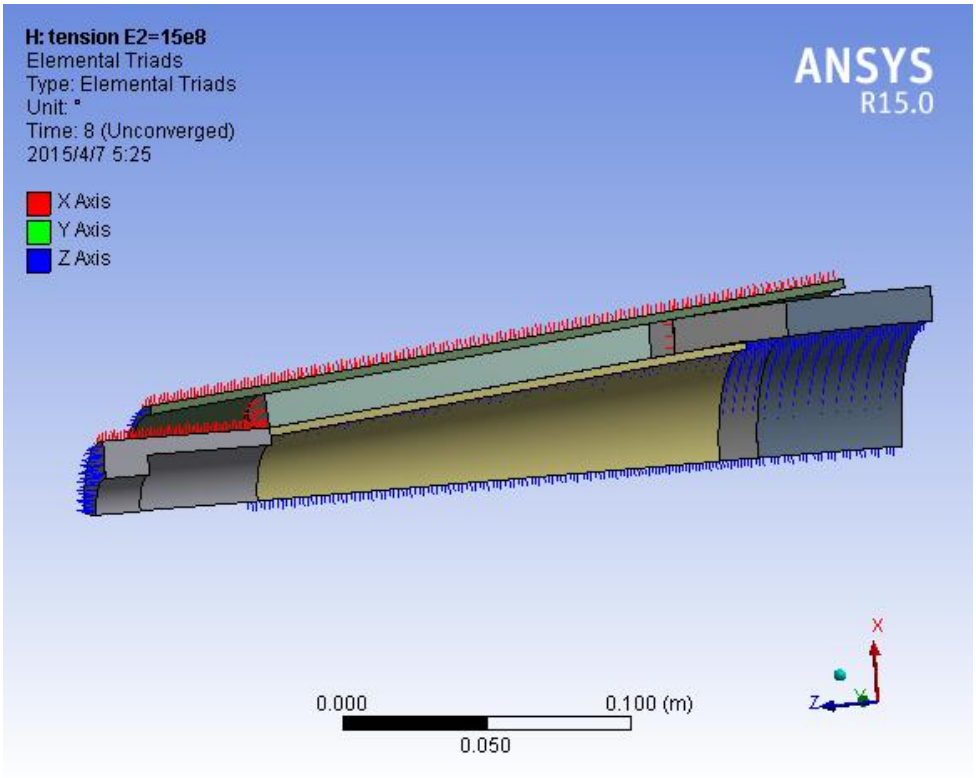
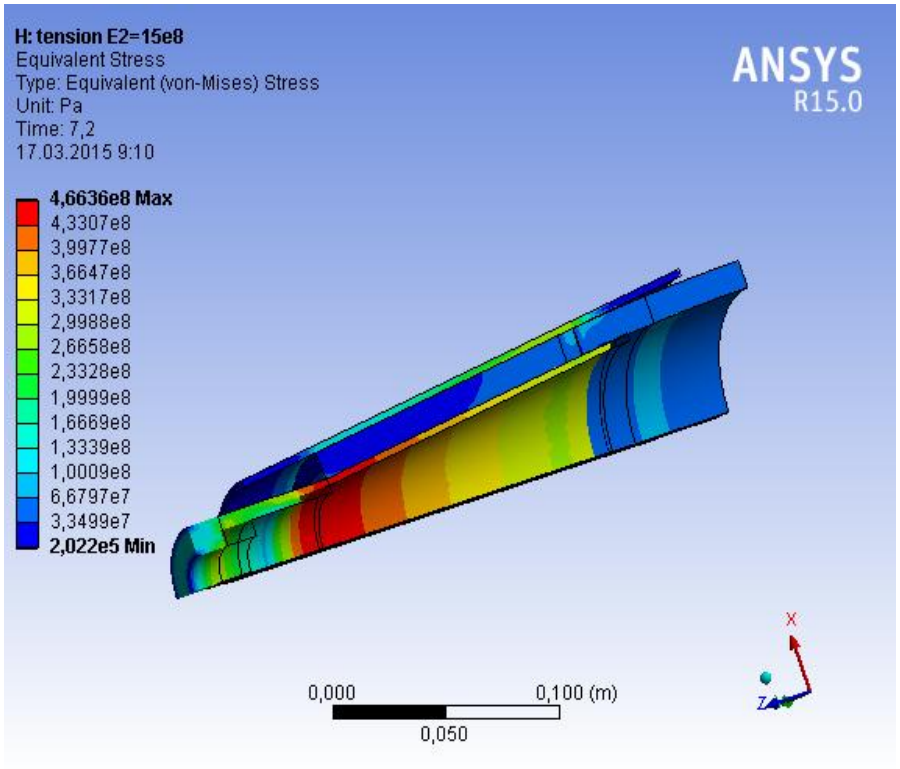


Рисунок 2.14 – Ориентация осей конечных элементов модели

Результаты программного расчета

Анализ результатов расчета ведется по диаграммам напряжений и перемещений. Приняты два возможных предельных состояния узла: (1) достижение напряжениями в стальных элементах узла предела текучести, (2) достижение напряжениями в любых элементах узла предела прочности. При этом сделано допущение о том, что локальные концентрации напряжений не оказывают существенного влияния на работу узла в целом [78].

При растягивающей нагрузке получены следующие результаты. При достижении нагрузки 19,44 тс во внутреннем конусе и одновременно в бамбуке происходит разрушение, суммарное перемещение при этом составляет 17,08 мм (рисунок 2.15). При нагрузке 8,1 тс во внутреннем конусе возникла текучесть стали, перемещение составило 1,25 мм (рисунок 2.16) (таблица 2.6).



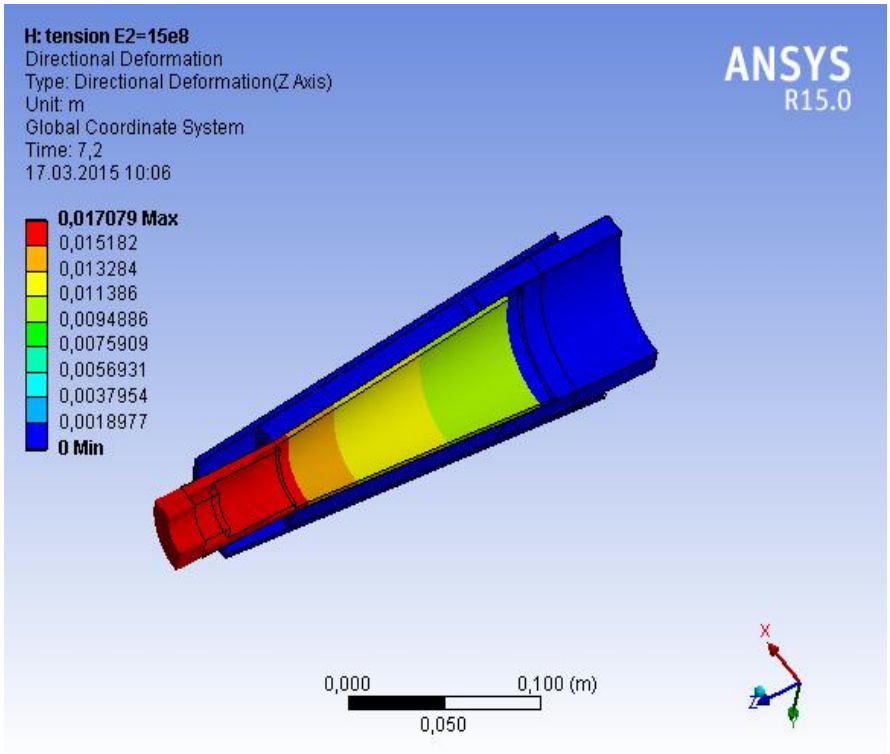
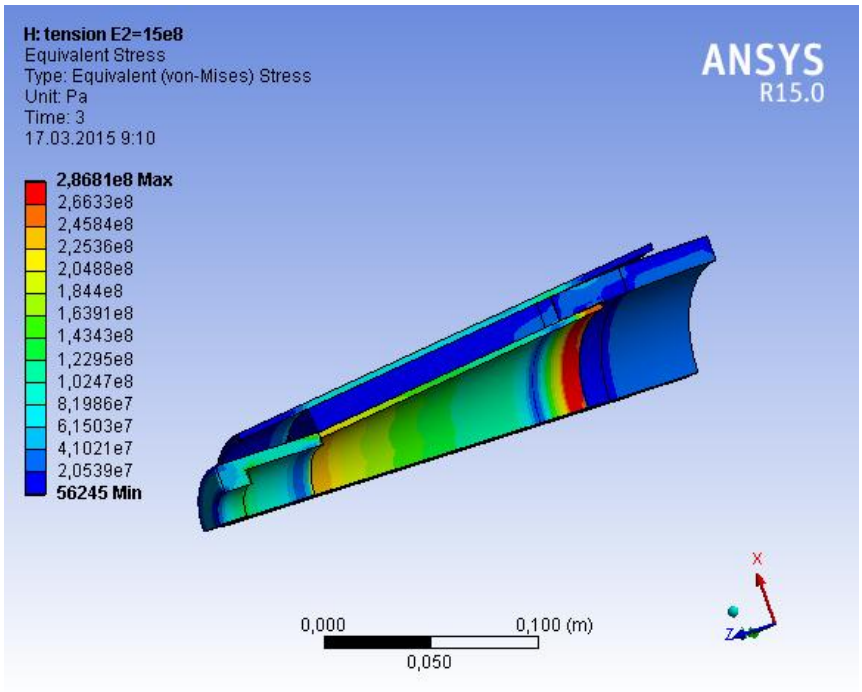


Рисунок 2.15 – Диаграммы напряжений и перемещений в момент разрушения при растяжении



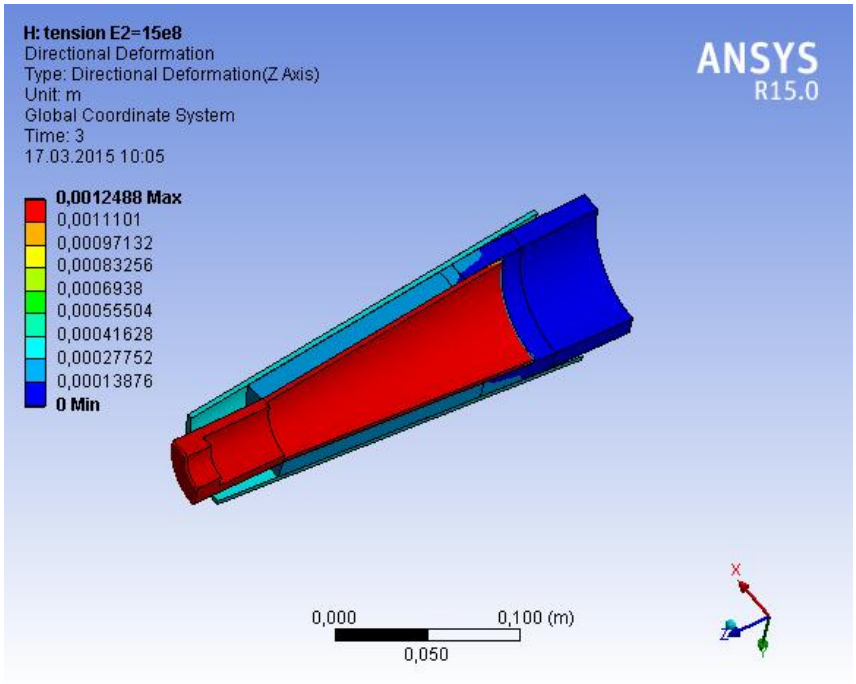
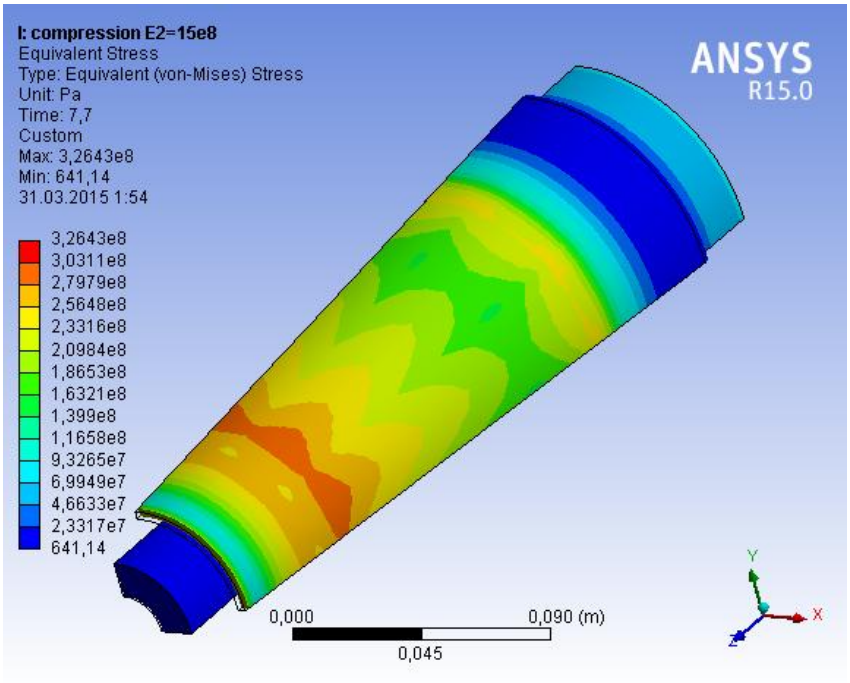


Рисунок 2.16 – Диаграммы напряжений и перемещений в момент достижения предела текучести при растяжении



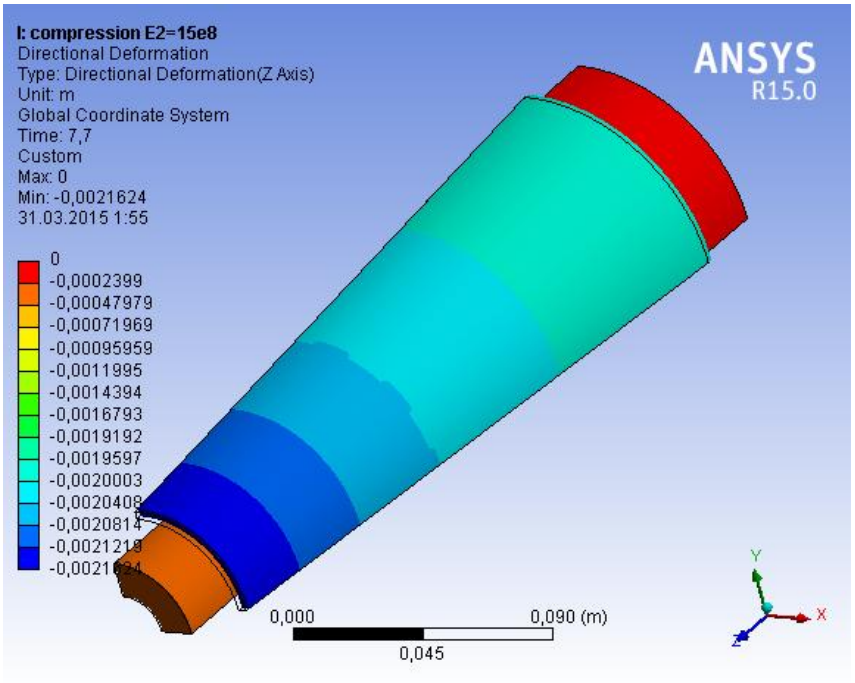
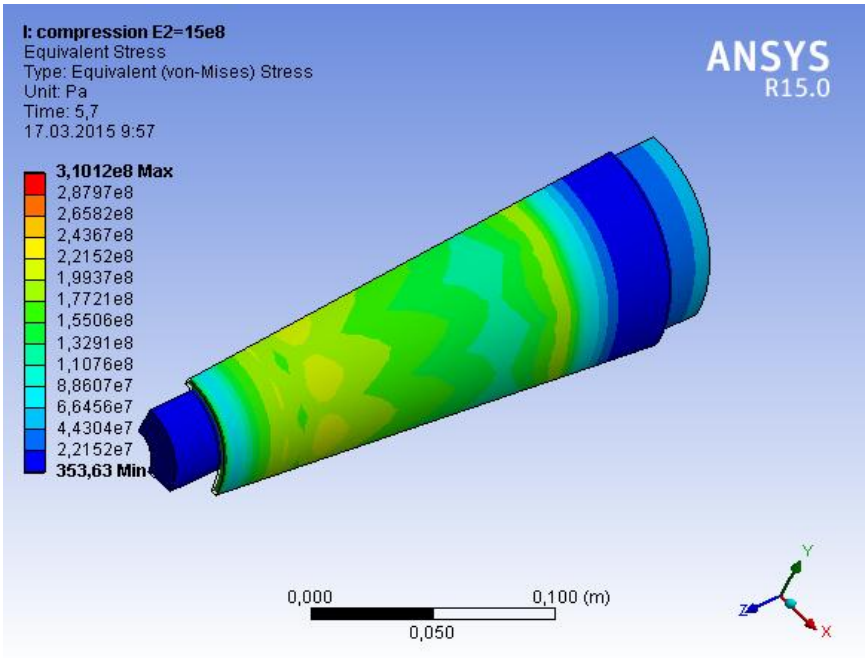


Рисунок 2.17 – Диаграммы напряжений и перемещений в момент разрушения при сжатии



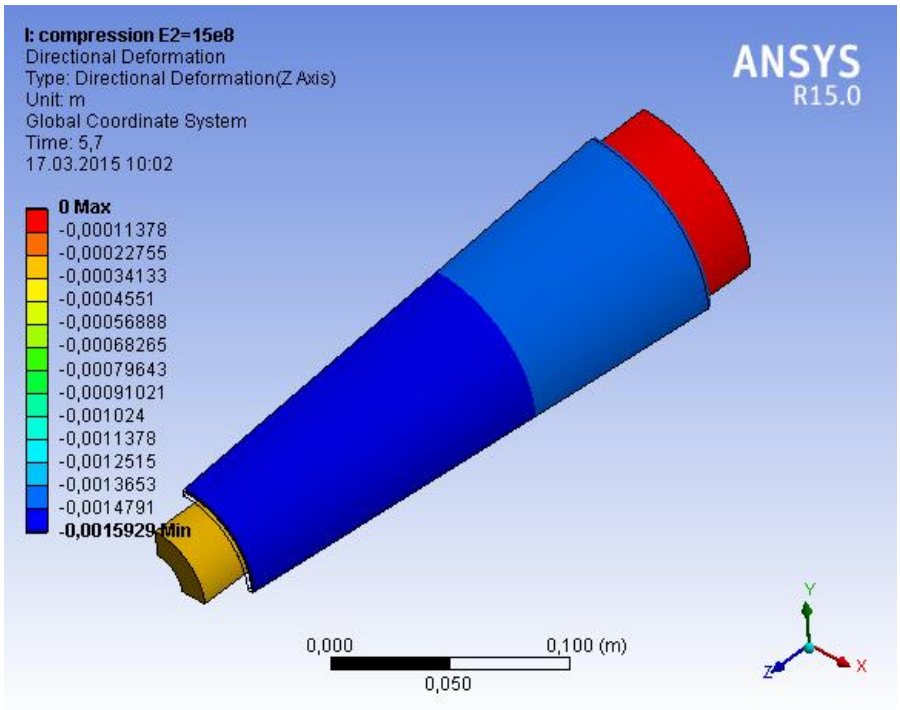


Рисунок 2.18 – Диаграммы напряжений и перемещений в момент достижения предела текучести при сжатии

Таблица 2.6 – I. Растягивающее усилие

Элемент узла		**Стадия 1. Достижение предела текучести стали: Нагрузка (F) – 8,1 тс**		**Стадия 2. Разрушение: Нагрузка (F) – 19,44 тс**	
		Напряжения, МПа	Предел, МПа	Напряжения, МПа	Предел, МПа
Внутренний конус		**225-246**	235	**433-466**	460
Внешний конус		143-164	235	267-300	460
Бамбук	Вдоль волокон	(+) 39,5-44,2	–	(+) 39,1-46,2	115,1
	Поперек волокон	(–) 8,5-13,8	–	(–) **24,4-28,4**	28,2
Перемещения, мм		1,25		17,08	

Источник: разработано автором

При сжимающей нагрузке получены следующие результаты. При достижении нагрузки 15,09 тс в бамбуке происходит разрушение, суммарное перемещение при этом составляет 2,16 мм (рисунок 2.17). При нагрузке 11,17 тс во внутреннем конусе возникла текучесть стали, перемещение составило 1,59 мм (рисунок 2.18) (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – II. Сжимающее усилие

Элемент узла		**Стадия 1. Достижение предела текучести стали: Нагрузка (F) – 11,17 тс**		**Стадия 2. Разрушение: Нагрузка (F) – 15,09 тс**	
		Напряжения, МПа	Предел, МПа	Напряжения, МПа	Предел, МПа
Внутренний конус		140-163	235	163-186	460
Внешний конус		**226-251**	235	280-303	460
Бамбук	Вдоль волокон	(–) 8,4-11,0	–	(–) 12,7-15,4	73,9
	Поперек волокон	(–) 16,6-25,8	–	(–) **19,6-29,8**	28,2
Перемещения, мм		1,59		2,16	

Источник: разработано автором

Выводы

В результате анализа недостатков существующих конструктивных решений узлов соединения бамбуковых элементов установлены принципы для разработки узлов нового типа: механический тип соединения (без использования клея или других вяжущих); отсутствие передачи момента сил; быстрота монтажа и демонтажа как деталей узла, так и бамбуковых стержней; прочность и жесткость (узел должен воспринимать нагрузки, близкие к нагрузкам, воспринимаемым бамбуковым стволом); художественная выразительность. Одна из идей, использованных при разработке узлов нового типа, состоит в том, чтобы для соединения отдельных бамбуковых стержней применить стальной шар–коннектор, нашедший применение в узлах стальных конструкций, разработанных в МАРХИ. Таким образом, задача проектирования узла сведена к разработке способа присоединения отдельного бамбукового стержня к стальному соединительному шару. Для этого предложено использовать систему конических элементов, в которой зажимается конец бамбукового ствола. Для этого он предварительно разделяется на сегменты, которые собираются в конус. В диссертационной работе предложено несколько конструктивных решений, использующих эти идеи. Вариант с металлическими внутренним и внешним конусами признан наиболее рациональным.

Для узлового соединения нового типа с использованием двух металлических конических элементов выполнены аналитический расчет и расчет с помощью программного комплекса ANSYS. Посредством анализа, проведенного программным комплексом ANSYS в отношении растяжения и сжатия узлов нового типа установлено, что при растяжении нагрузкой 19,44 тс в узле возникает разру-

шение (перемещение при этом составляет 17,08 мм). При нагрузке 8,1 тс в узле возникает текучесть стали (перемещение в этот момент составляет 1,25 мм). При сжатии нагрузкой 15,09 тс в узле возникает разрушение (перемещение при этом составляет 2,16 мм). При нагрузке 11,7 тс в узле возникает текучесть стали (перемещение в этот момент составляет 1,59 мм). Эти результаты используются далее для сравнения с результатами опытов. Приближенный аналитический расчет показал, что текучесть стали в элементах узла возникает при растяжении при нагрузке 11,8 тс, а при сжатии – при нагрузке 19,0 тс. Разница с результатами расчета в комплексе ANSYS составляет 31% и 38% соответственно.

Проверка результатов, полученных теоретическим путем, осуществляется экспериментально. Ход опытов и их результаты приведены в главе 3 диссертации.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ БАМБУКА

3.1 Выбор бамбукового материала

В настоящее время в природе выявлено более 1600 видов бамбука, из них 400 произрастает в Китае, а среди последних, в свою очередь, 2/3 приходится на бамбук Мосо [60]. Территория Китая обладает самым большим объемом бамбука и его самым широким ассортиментом. Так как в Китае существуют большие объемы производства бамбука Мосо, цены на него здесь относительно низкие. С другой стороны, благодаря хорошим механическим свойствам и привлекательному внешнему виду бамбука Мосо, его используют в декоративно-прикладном искусстве, изготовлении мебели, строительных лесов, музыкальных инструментов, а также для сборки домов малых народностей Китая [111]. В результате изучения процесса роста бамбука Мосо установлено следующее: бамбук Мосо растет около 4-6 лет, диаметр бамбука составляет 10-15 см; толщина стенок бамбука составляет от 9 мм до 12 мм, плотность 0,626 г/см^3-0,81 г/см^3; бамбук обладает прекрасным качеством и механическими свойствам, подходит для сборки архитектурных конструкций [61]. Принимая во внимание приведенные факторы, в качестве материала бамбуковых элементов в настоящей диссертационной работе принят именно бамбук Мосо [80].

3.2 Экспериментальные исследования механических свойств бамбука Мосо

Особая природная структура бамбука Мосо – естественно сформированные

полости между суставами и цельное строение коленца сустава, оказывает большое влияние на его механические свойства [79]. Исходя из этого, перед экспериментальным исследованием новых моделей соединения узла, в первую очередь, стоит задача испытания бамбукового материала на сопротивление растяжению и сжатию, чтобы таким образом лучше изучить его механические свойства.

Подборка материалов – Мосо бамбука (Phellosiachys pubescens): возраст – 5 лет, место произрастания – уезд Ле, провинции Фуцзянь. Основные показатели бамбука (в среднем) приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные показатели бамбука Мосо

Виды бамбука	**Диаметр (мм)**	**Толщина стенки (мм)**	**Длина (мм)**	**Расстояние между сустава (мм)**
Мосо бамбук	102	10	726	345,5

Источник: разработано автором

Испытание на растяжение бамбука Моso

Так как бамбук Мосо имеет большой диаметр, для испытаний берется только его часть – фрагмент стенки квадратного сечения. Образцы с «суставом» и «без сустава» были взяты от одного бамбука. Суставы расположены в середине каждого образца. Часть образцов с суставом должна быть обработана таким образом, чтобы их толщин была идентичной образцам «без сустава». Чтобы этого добиться, для обработки использовался токарный станок для дерева, соответствующий национальным китайским стандартам.

Испытание бамбука Мосо на растяжение производилось в соответствии с экспериментальными нормами GB/T15780−1995 «Методы испытаний физических и механических свойств бамбука» [98]. Образцы имели форму «гантели». Радиус

дуги перехода составляет 120 мм, рабочая часть – 60 мм.

На основе испытаний 20 образцов: 10 штук с «суставом», 10 штук «без сустава» (рисунок 3.1), и последующей обработки данных получены величины прочности на растяжение (таблица. 3.2 и табл. 3.3). Образцы «без суставов» и с «суставом» имеют различную прочность. Образцы с «суставом» показали прочность на растяжение на 2,4% больше, чем «без суставов». Разрушения в 90% случаев произошли по сечению «без сустава».

Рисунок 3.1 – Образцы бамбука с «суставом» (10 шт.) и «без сустава» (10 шт.)

Таблица 3.2 – Испытание образцов «с суставом» на растяжение (бамбук Мосо)

№	**Ширина размеры *a* (см)**	**Толщина размеры *b* (см)**	**Площадь сечения $A = a \times b$ (см^2)**	**Разрушающая нагрузка *F* (кгс)**	**$\sigma = \frac{F}{A}$ (МПа)**
1	0,49	0,93	0,4557	565	123,99
2	0,49	1,05	0,5145	635	123,42
3	0,54	1,02	0,5508	410	74,44
4	0,55	1,01	0,5555	505	90,91
5	0,46	1,01	0,4646	570	122,69
6	0,43	0,98	0,4214	570	135,26
7	0,49	0,98	0,4802	565	117,66
8	0,49	0,99	0,4851	650	133,99
9	0,47	0,96	0,4512	550	121,90
10	0,24	0,95	0,2280	305	133,77
Временное сопротивление (среднее значение) $R_{вр}$ = 117,803 МПа					

Источник: разработано автором

Таблица 3.3 – Испытание образцов «без сустава» на растяжение (бамбук Мосо)

№	Ширина размеры *a* (см)	Толщина размеры *b* (см)	Площадь сечения $A = a \times b$ (см^2)	Разрушающая нагрузка *F* (кгс)	$\sigma = \frac{F}{A}$ (МПа)
1	0,23	0,87	0,2001	249	124,438
2	0,39	0,93	0,3627	390	107,527
3	0,35	0,91	0,3185	360	113,03
4	0,46	0,87	0,4002	245	61,219
5	0,34	0,9	0,306	375	122,549
6	0,3	0,92	0,276	280	101,449
7	0,41	0,93	0,3813	580	152,111
8	0,47	0,91	0,4277	370	86,509
9	0,36	0,89	0,3204	390	121,723
10	0,36	0,91	0,3276	525	160,256
Временное сопротивление (среднее значение) $R_{вр}$ = 115,081 МПа					

Источник: разработано автором

Прочность на растяжение бамбука в зоне «сустава» и «без суставов» соответственно равны 117,803 МПа и 115,081 МПа. Так как показатель Р (точности) составляет 5-6%, можно утверждать, что испытания прошли удовлетворительно с достаточной достоверностью. Прочность на растяжение в «суставе» оказалась выше прочности образцов «без сустава» на 2,4%. Таким образом, можно сделать важный вывод о том, что влияние на прочность наличия «суставов» в бамбуковых стержнях можно не учитывать и за прочность бамбука принимать прочность в зоне «без сустава» [40].

Испытание на сжатие бамбука Мосо

Целями проведения испытаний являлись изучение деформативности, характера разрушения и прочности бамбука на сжатие вдоль волокон. Размеры экспериментальных образцов приняты в соответствии с размерами, указанными в ки-

тайском стандарте JG/T 199-2007 «Способы испытания механических и физических свойств бамбука, используемого в строительстве» [99]. Высота экспериментальных образцов составляет 15 мм, сечение 9 мм (толщина стенки бамбука)×15 мм (рисунок 3.2 а).

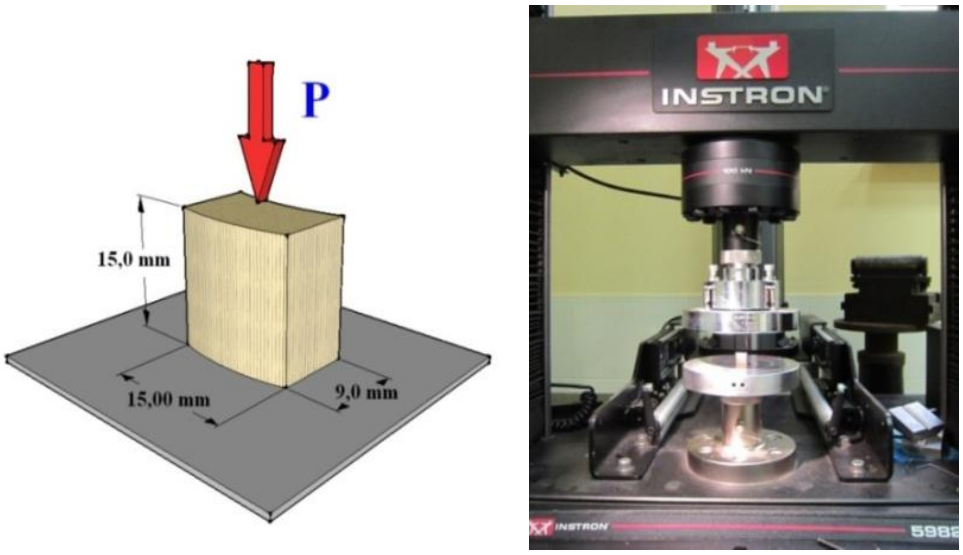


Рисунок 3.2 – Испытания прочности бамбука Мосо при сжатии вдоль волокон
а – Схема образца б – Экспериментальная установка

Всего изготовлено 10 экспериментальных образцов из бамбука Мосо. При проведении испытания на прочность при сжатии вдоль волокон был использован универсальный электронный тестовый пресс с компьютерным управлением INSTRON5982 (рисунок 3.2 б). Способ управления нагрузкой – контроль смещения. Во время проведения испытания фиксировались все события, замеченные в ходе проведения испытания, и пиковые нагрузки. На рисунке 3.3 представлен график деформаций сжатия опытных образцов при нагружении, а в таблице 3.4 – результаты испытаний.

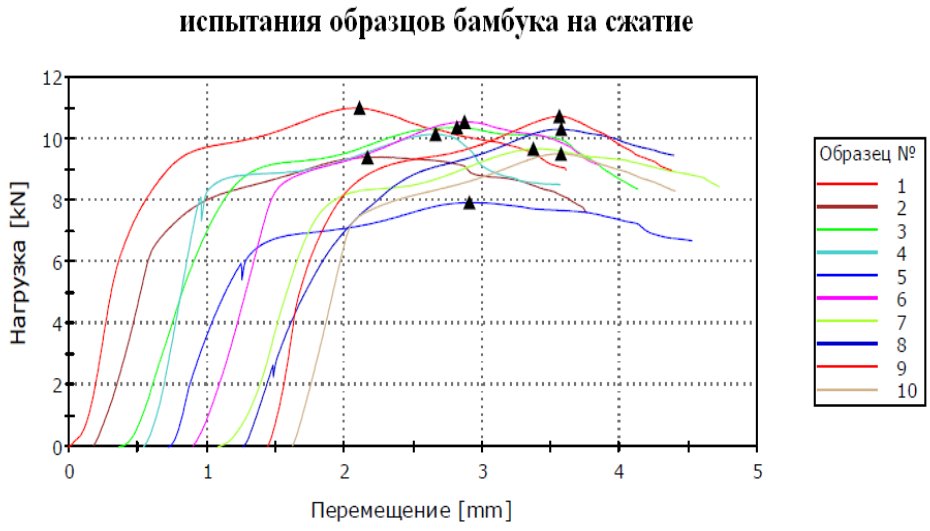


Рисунок 3.3 – График «нагрузка-перемещение» при испытании бамбука Мосо на сжатие вдоль волокон

Таблица 3.4 – Испытание образцов на сжатие (бамбук Мосо)

№	Ширина размеры *a* (см)	Толщина размеры *b* (см)	Площадь сечения $A = a \times b$ (см^2)	Разрушающая нагрузка *F* (кгс)	$\sigma = \frac{F}{A}$ (МПа)
1	0,99	1,50	1,48	1122,04	75,814
2	0,89	1,53	1,35	959,18	71,050
3	0,94	1,52	1,43	1057,25	73,933
4	0,88	1,51	1,33	1035,31	77,843
5	0,84	1,50	1,26	808,78	64,189
6	0,93	1,49	1,39	1075,71	77,389
7	0,87	1,51	1,31	986,33	75,292
8	0,93	1,53	1,41	1051,22	74,555
9	0,98	1,52	1,49	1094,29	73,442
10	0,85	1,50	1,28	970,31	75,805
Временное сопротивление (среднее значение) $R_{вр}$= 73,931 МПа					

Источник: разработано автором

После обработки экспериментальных данных средняя прочность на сжатие бамбука Мосо составила $R_{вр}$= 73,931 МПа. При сравнении результатов испытаний можно выделить 3 формы разрушения образцов: 1. Искривленный излом 2. Вертикальный раскол 3. Разрыв со смещением [40].

Во второй главе проводится анализ работы нового узлового соединения при различных видах нагрузки, из которого следует, что внутренние и внешние конические элементы создают давление на поперечные волокна бамбука, ввиду чего необходимо проведение испытаний бамбука на сжатие поперек волокон. Размеры экспериментальных образцов приняты в соответствии с размерами, указанными в китайском стандарте JG/T 199-2007 «Способы испытания механических и физических свойств бамбука, используемого в строительстве» [99]. Длина экспериментальных образцов составляет 60 мм, сечение 9 мм (толщина стенки бамбука) ×15 мм (ширина) (рисунок 3.4). Всего изготовлено 10 экспериментальных образцов из бамбука Мосо (рисунок 3.5). Также при проведении испытаний была использована электронная универсальная испытательная машина INSTRON5982. В ходе проведения испытаний фиксировались все события, замеченные в процессе, и пиковые нагрузки. На рисунке 3.6 представлен график деформаций сжатия опытных образцов при нагружении, а в таблице 3.5 – результаты испытаний.

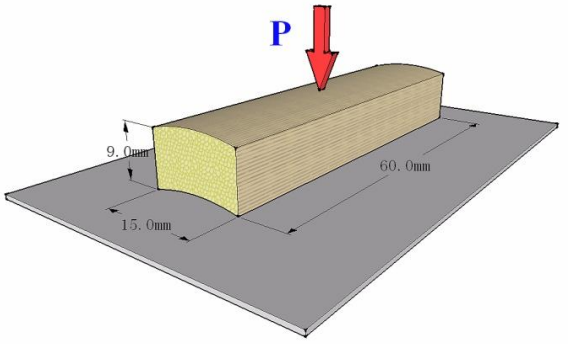


Рисунок 3.4 – Схема образца при сжатии поперек волокон

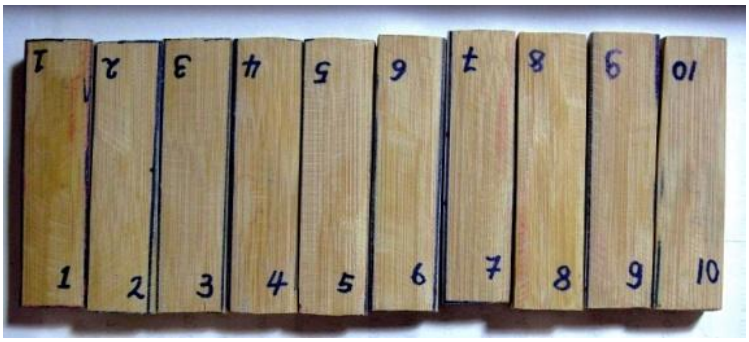


Рисунок 3.5 – Образцы бамбука при сжатии поперек волокон (10

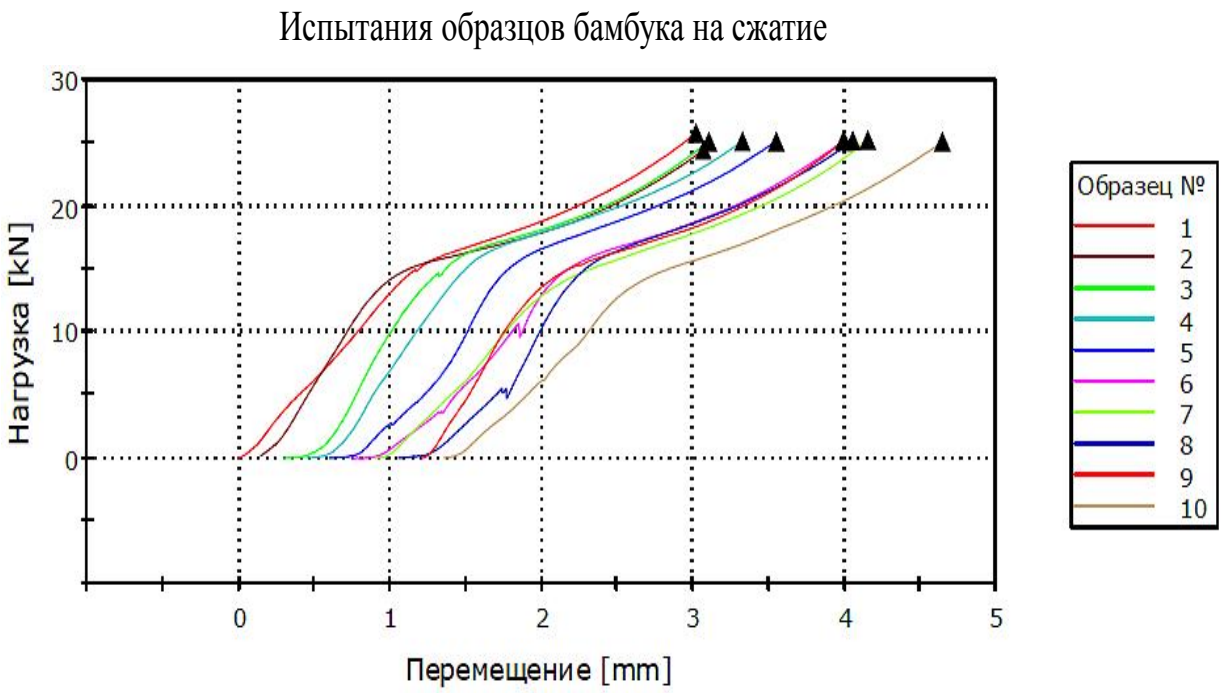


Рисунок 3.6 – График «нагрузка-перемещение» при испытании бамбука Мосо на сжатие поперек волокон

Таблица 3.5 – Результаты испытаний при нагружении

№	Ширина размеры *a* (см)	Длина размеры *b* (см)	Площадь сечения $A = a \times b$ (см^2)	Разрушающая нагрузка *F* (кгс)	$\sigma = \frac{F}{A}$ (МПа)
1	1,520	5,881	8,939	2626,483	29,382
2	1,529	5,991	9,160	2490,453	27,188
3	1,539	6,016	9,259	2559,06	27,639
4	1,527	5,997	9,157	2561,425	27,972
5	1,505	6,018	9,057	2559,284	28,258
6	1,504	6,009	9,038	2562,649	28,354
7	1,524	5,947	9,063	2569,073	28,347
8	1,525	5,984	9,126	2563,770	28,093
9	1,498	6,013	9,007	2563,770	28,093
10	1,477	6,005	8,869	2556,531	28,826
Временное сопротивление (среднее значение) $R_{вр}$= 28,215 МПа					

Источник: разработано автором

Анализ результатов испытаний: После обработки экспериментальных данных средняя прочность на сжатие бамбука Мосо составила $R_{вр}$= 28,215 МПа. При

сравнении результатов испытаний можно увидеть форму разрушения образцов: образцы частично были сплющены, толщина образцов уменьшилась.

3.3 Анализ резки бамбука Мосо для сборки предлагаемого узла

При естественном росте бамбук Мосо имеет форму круглой трубки. В проектах узлов нового типа используется конус, имеющий определенный угол. Поэтому на конце бамбука необходимо произвести по сегментную резку, затем загнуть полученные сегменты с нужным углом, в завершении закрепить конец бамбука в форме конуса. Только после этого можно приступать к соединению с соединительными узловыми элементами. Для выяснения влияния резки концов бамбука на монтаж и прочность узловых соединений был проведен соответствующий экспериментальный анализ [116].

Стенки бамбука имеют определенную толщину. При изгибе разрезанного бамбука, из-за дугового радиуса, который после резки имеют стенки и «лепестки» конца бамбука, возможно, что бамбук не достигнет необходимого угла изгиба. С другой стороны, принимая во внимание простоту обработки бамбука – в данном случае резки, анализ был проведен для четырех разных форм резки бамбука – на 6, 8, 10 и 12 частей.

Прежде всего, в программе SketchUp в соответствии с реальными размерами бамбука была создана модель бамбука. Также по принципу реальной резки было осуществлено моделирование резки бамбука в четырех названных выше формах (рисунок 3.7) [1]. В программе AutoCAD были созданы чертежи данных четырех форм резки, рассчитаны площадь и размеры «лепестков».

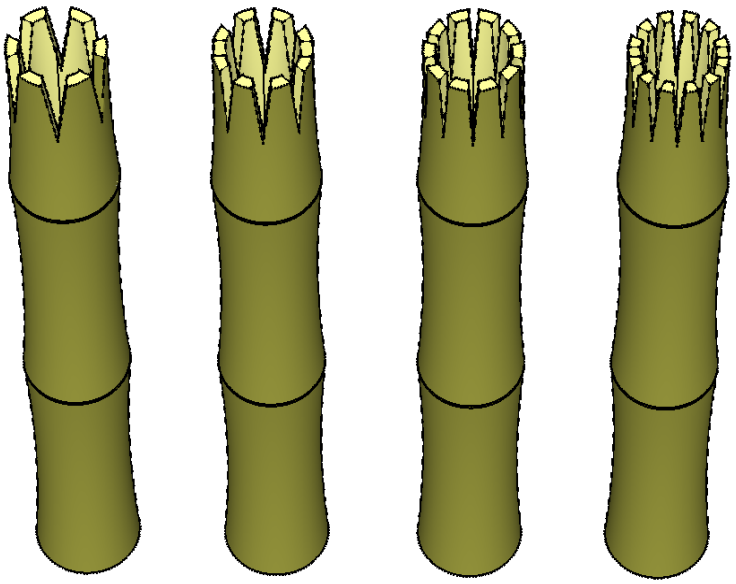


Рисунок 3.7 – Модель резки в программе SketchUp в соответствии с реальными размерами бамбука (6 частей, 8 частей, 10 частей и 12 частей).

Из таблицы 3.6 видно, что наибольшая площадь, наибольший дуговой градус «лепестков» и наименьшее количество подходов резки наблюдается в случае резки бамбука на 6 частей. Резка бамбука на 12 частей, напротив, характеризуется наименьшей площадью, наименьшим дуговым градусом «лепестков» и наибольшим количеством подходов резки

Таблица 3.6 – Размер данных из бамбука (6 частей, 8 частей, 10 частей, 12 частей)

№	Название	6 равных частей	8 равных частей	10 равных частей	12 равных частей
1	Площадь в нижней части бамбука (мм^2)	438	344	277	227
2	Площадь в верхней части бамбука (мм^2)	328	224	184	156
3	Угол между частями (градус)	60°	45°	36°	30°

Источник: разработано автором

После проведения программного моделирования, в соответствии с моделью, представленной на чертеже, была произведена реальная резка бамбука. Выбран-

ные размеры соответствуют четырем выбранным формам резки бамбука (рисунок 3.8). После резки проведена обработка с целью изгиба данных 4-х форм бамбука для принятия ими конической формы. В процессе изгиба выявлено, что формы бамбука с 6 и 8 «лепестками» очевидно трудно подвергались обработке, из-за чего было трудно достигнуть необходимого угла, указанного в проекте. Бамбук, разрезанный на 10 и 12 «лепестков» достиг необходимого угла, указанного в проекте. С точки зрения прочности, бамбук, разрезанный на 12 частей, имеет наименьшую площадь «лепестков». Поэтому форма резки на 10 лепестков по сравнению с тремя другими предложенными формами резки бамбука является наиболее соответствующей требованиям, предусмотренным проектом предлагаемых узловых соединений.

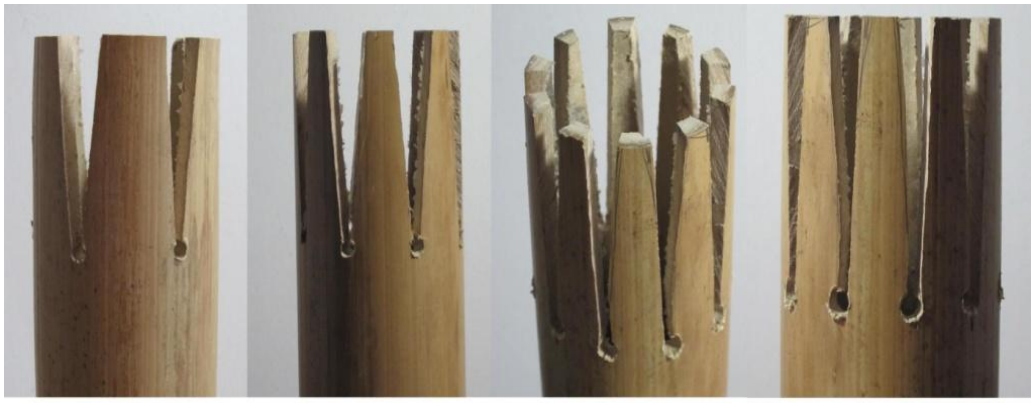


Рисунок 3.8 – Четыре разные формы резки бамбука – на 6, 8, 10 и12 частей.

3.4 Экспериментальный анализ материала внешнего конуса

В проекте предлагаемых узлов нового типа был изучен материал для изготовления внешнего конуса. Выбор основан, прежде всего, на соответствии требованию прочности данной детали, а также на весовых и ценовых показателях материала. Были выбраны 2 наиболее распространенных материала – фторопласт и

полиэтилен. Данные материалы были подвергнуты экспериментальному анализу. Цель экспериментального анализа – определить, подходят ли данные материалы для узлов нового типа.

Экспериментальный анализ фторопластовых труб

Рисунок 3.9 – Образец фторопласта

Фторопласт является распространенным материалом для изготовления труб, также используется в строительной сфере. В соответствии с требованиями эксперимента были выполнены образцы. Параметры образцов выбраны в соответствии с российским ГОСТ11262-80 «Пластмассы метод испытания на растяжение» [94] (рисунок 3.9). Испытание было произведено на оборудовании INSTRON5969 (рисунок 3.10). В процессе проведения испытания все данные фиксировались компьютером.

Рисунок 3.10 – Экспериментальная машина INSTRON 5969

В начале испытания деталь была подвергнута растяжению, постепенно возникала деформация. При увеличении усилия в местах деформации быстро возникали трещины. В течение всего эксперимента деформация материала была не слишком заметна. После двух испытаний проведена обработка результатов, выявлена прочность фторопластовых труб, которая составила 27 МПа. В соответствии с требованиями проектирования узлов нового типа фторопласт не обладает достаточной прочностью, поэтому дальнейшее использование данного материала было прекращено.

Экспериментальный анализ полиэтиленовых труб

Один из вариантов решения узлового соединения предполагал использование полиэтиленовой трубы. В связи с этим было проведено испытание полос из стенки полиэтиленовой трубы на растяжение.

Материал полиэтиленовых труб обладает хорошими свойствами: имеет высокую износостойкость, устойчивость к коррозии, и широко используются в строительстве. Параметры экспериментальных образцов, а также методы испытаний были выбраны в соответствии с ГОСТ 11262-80 «Пластмассы метод испытания на растяжение». Экспериментальные образцы были выполнены в форме гантелей с радиусом сопряжения 75 мм и рабочей частью 50 мм [94]. Всего использовалось 10 образцов (рисунок 3.11).

Рисунок 3.11 – Десять образцов из полиэтилена

Испытания проводились на прессе модели INSRON5969. На рисунке 3.12 представлены данные, выданные компьютером во время испытаний на растяжение. В таблице 3.7 – результаты испытаний [40].

Испытание образцов полиэтилена на растяжение

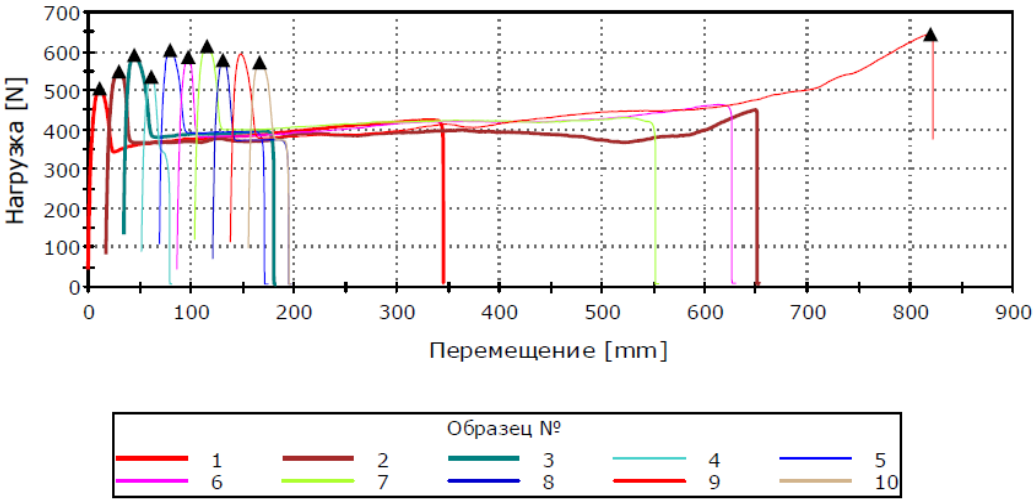


Рисунок 3.12 – График «нагрузка-перемещение» при испытании полиэтилена на растяжение

Таблица 3.7 – Испытание образцов полиэтилена на растяжение

№	Ширина размеры *a* (см)	Толщина размеры *b* (см)	Площадь сечения $A = a \times b$ (см^2)	Разрушающая нагрузка *F* (кгс)	$\sigma = \frac{F}{A}$ (МПа)
1	0,56	0,51	0,29	51,68	17,821
2	0,54	0,5	0,27	56,1	20,778
3	0,57	0,50	0,28	60,28	21,529
4	0,55	0,51	0,28	54,74	19,55
5	0,59	0,51	0,30	61,6	20,533
6	0,58	0,50	0,29	59,79	20,617
7	0,57	0,50	0,29	62,61	21,59
8	0,59	0,51	0,30	58,99	19,663
9	0,55	0,51	0,28	65,68	23,457
10	0,54	0,50	0,27	58,45	21,648
Временное сопротивление (среднее значение) $R_{вр}$=20,719 МПа					

Источник: разработано автором

Анализ результатов испытания элементов полиэтиленовых труб

В результате испытания было выявлено два типа формы разрушения экспериментальных образцов (рисунок 3.13). В первом случае при постепенном увеличении нагрузки в образце возникали большие относительные и абсолютные удлинения, и через некоторое время образец разрывался.

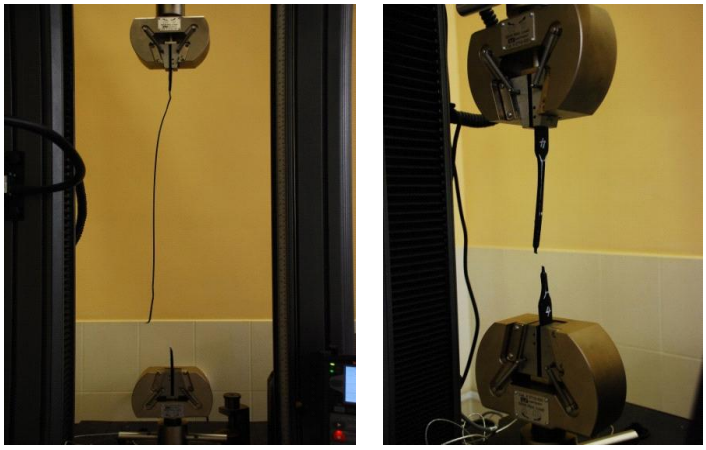


Рисунок 3.13 – Два типа формы разрушения экспериментальных образцов

Во втором случае относительное удлинение было меньше. После начала проведения испытания образец очень быстро разрушался. Главная причина заключается в том, что полиэтилен относится к вязкоупругим материалам, его натяжение и расслабление тесно связаны со скоростью деформации. Натяжение и расслабление – это временной процесс. При быстром вытягивании скорость движения молекулярных частиц не совпадает со скоростью внешней силы, и материал становится хрупким, прочность растяжения увеличивается, уменьшается относительное удлинение. При растяжении на малой скорости молекулярные частицы смещаются, уменьшается прочность на растяжения, возрастает относительное удлинение [112].

Как видно из таблицы 3.7, прочность полиэтилена ниже, чем у фторопласта, а, следовательно, тем более не удовлетворяет требованиям к элементам предлагаемого узла.

3.5 Экспериментальный анализ внутренних компонентов

Узловые соединения нового типа имеют коническую форму, поэтому внутренние детали также имеют конусообразную форму. В результате анализа узлов нового типа было установлено, что внутренние элементы данных узлов играют роль только при работе узла на растяжение. При этом сам внутренний элемент работает на сжатие. Таким образом, появилась необходимость в подборе материала, хорошо работающего на сжатие. В отношении всех использованных материалов так же был проведен анализ.

Экспериментальный анализ бетона

Критерием для выбора бетонных материалов является, прежде всего, хорошая устойчивость к сжатию, которая бы соответствовала сжатию, возникающему во внутренней части бамбука при получении нагрузки внутренними элементами конуса. Что касается изготовления внутренних элементов узла, то, так как внутренние элементы имеют коническую форму, сначала в соответствии с размерами изготавливается форма, затем осуществляется заливка бетона. Для увеличения прочности бетона и уменьшения возможных усадочных деформаций в него добавляются металлические волокна

Рисунок 3.14 – Стальная волнистая фибра образца

(рисунок 3.14). Через 28 дней бетон приобретает необходимую прочность. В отношении бетонных элементов, установленных во внутреннюю часть бамбука, был проведен эксперимент.

Для проведения эксперимента конических бетонных элементов, установленных во внутренней части бамбука, была использована компьютерная электронная универсальная испытательная машина INSTRON5989 (рисунок 3.15). Собранный узел, в котором в качестве внутреннего элемента использовался бетонный конус, подвергался растяжению. Эксперимент на растяжение был проведен в 2 подхода. Когда во время эксперимента сила растяжения на аппарате достигла показателя более 2 кН, произошло смещение — на силовом графике отобразились небольшие колебания. При достижении силы растяжения более 4 кН, на силовом графике отобразились очень сильные колебания (рисунок 3.16), сопровождающиеся шумом. Максимальные показатели усилия на растяжение в двух подходах эксперимента составили соответственно 18,91 кН и 14,80 кН. После достижения перемещений в 33,44 мм эксперимент был остановлен. После проведения эксперимента был проведен демонтаж каждого узлового элемента, все элементы были сфотографированы. После демонтажа узловых элементов было замечено, что на внешних узловых элементах нет повреждений или изменений, в бамбуке также не произошло повреждений или изменений. На внутреннем бетонном конусе, напротив, возникли повреждения, располагающиеся,

Рисунок 3.15 – Экспериментальная машина INSTRON 5989

главным образом, на нижней части бетонного конуса (рисунок 3.17).

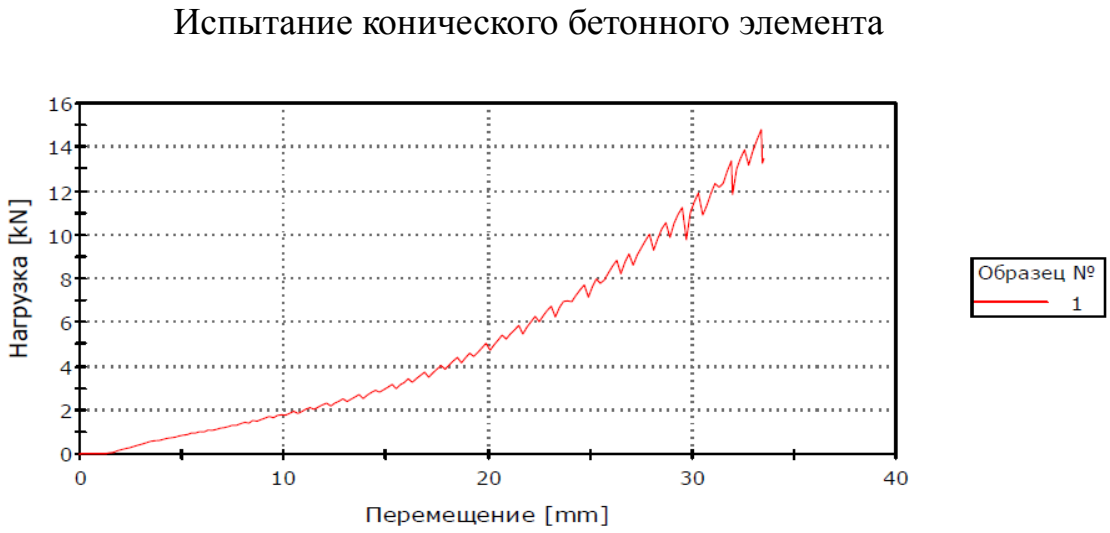


Рисунок 3.16 – График «нагрузка-перемещение» при испытании конического бетонного элемента на растяжение

Рисунок 3.17 – Разрушения экспериментальных конических бетонных образцов

Посредством анализа поврежденных частей бетонного конуса и дополнительной записи силового графика можно видеть, что во время получения нагрузки на узел, между внутренними узловыми элементами и бамбуком возникает сжатие. После увеличения нагрузки в бетонных частях возникает смещение вперед. Из-за

того, что бамбук сам по себе имеет жесткую текстуру, на нижней части экспериментального бетонного элемента возникли повреждения. Вместе с непрерывным увеличением нагрузки в экспериментальном бетонном элементе непрерывно возникали повреждения, отображающиеся на силовом графике в виде сильных колебаний. Результаты эксперимента показали непригодность бетонных материалов для узловых соединений нового типа. Был сделан вывод о том, что необходимо использовать иной материал.

Экспериментальный анализ стальных материалов

В результате испытания с использованием бетонных материалов для изготовления внутренних элементов был сделан вывод о том, что используемый материал должен обладать более высокой прочностью. Учитывая это, была выбрана сталь как материал для изготовления внутренних элементов. В отношении стали как материала для внутренних элементов узла был проведен экспериментальный анализ узлового соединения.

В соответствии с размерами, предусмотренными проектом, было изготовлено 2 внутренних узловых элемента (рисунок 3.18). Принимая во внимание снижение массы и увеличение силы трения, первоначальная высота внутренних стальных узловых элементов была уменьшена до 50 мм. Также увеличена шероховатость по-

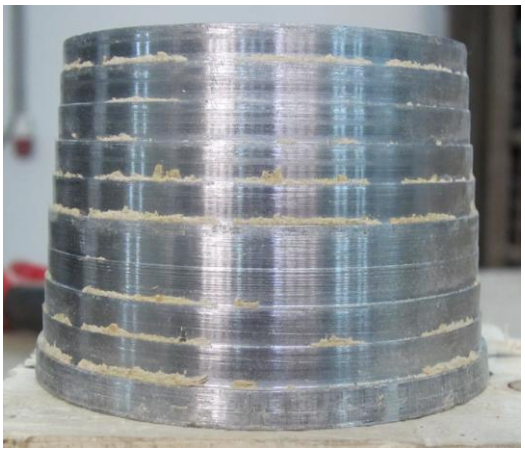


Рисунок 3.18 – Конический образец из стали

верхности конуса: выполнена ступенчатая поверхность с интервалом 5 мм, высотой 0,5 мм (рисунок 3.19). Внутренние элементы после обработки были установлены в узел, в отношении узла был проведен эксперимент на растяжение.

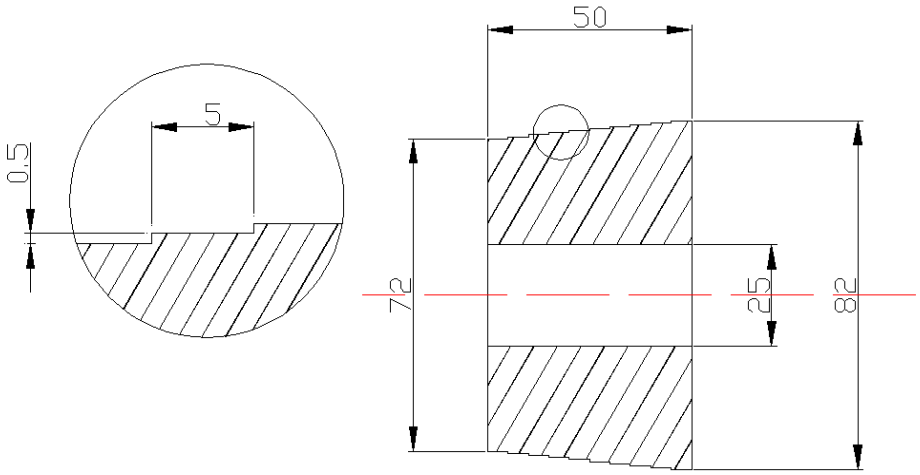


Рисунок 3.19 – Схема конического образца из стали

Для проведения испытания была использована компьютерная электронная универсальная испытательная машина INSTRON5989. Эксперимент на растяжение был проведен в 2 подхода. Когда во время эксперимента сила растяжения на аппарате достигла нагрузки 40 кН, произошло смещение, отобразившееся на силовом графике. Также возник шум. При достижении нагрузки 73,22 кН, на силовом графике появился нисходящий участок (рисунок 3.20). Полное перемещение достигло 73,30 мм. После проведения эксперимента был проведен демонтаж каждого узлового элемента, все элементы были сфотографированы. После демонтажа узловых элементов было замечено, что на внешних узловых элементах нет повреждений, на внутреннем стальном конусе и бамбуке также не возникло повреждений (рисунок 3.21).

Испытание конического стального элемента

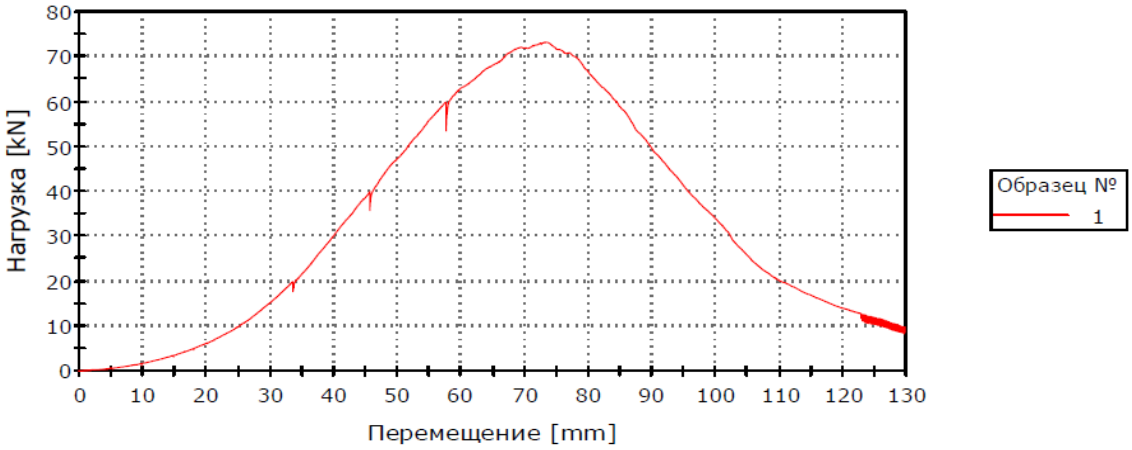


Рисунок 3.20 – График «нагрузка-перемещение» при испытании конического стального элемента на растяжение

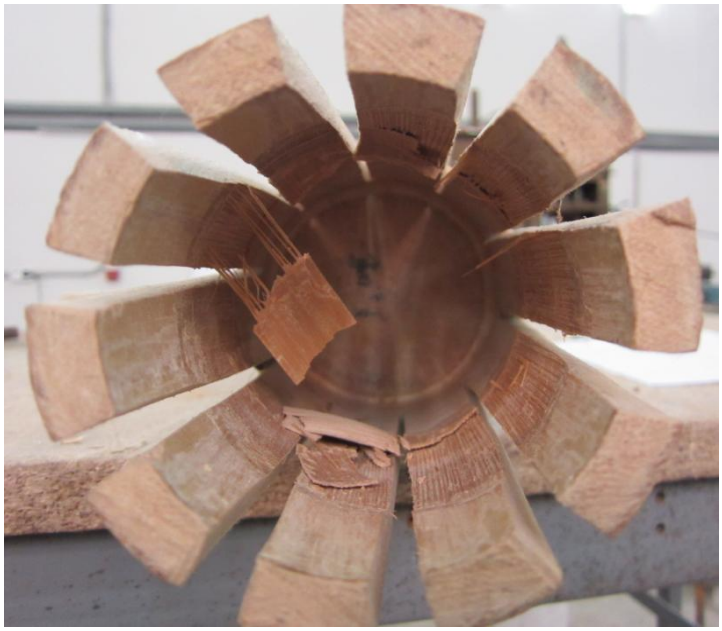


Рисунок 3.21 – Разрушение экспериментального образца из бамбука

На рисунке видно, что во внутренней части бамбука присутствовали повреждения разной степени. Согласно показателям графиков и информации о полу-

ченных повреждениях был проведен анализ: при получении всем узлом внешнего растяжения, во внутренних узловых элементах стало происходить смещение по направлению растяжения. Однако оно было ограничено бамбуком и внешними узловыми элементами. При непрерывном увеличении нагрузки, из-за того, что прочность внутренних стальных элементов выше прочности бамбука, вместе со смещением, произошедшем во внутренних узловых элементах, возникло повреждение бамбука. То есть произошло разрушение бамбука в следствие его смятия поперек волокон. Когда максимальная нагрузка на силовом графике достигла 73,22 кН, внутренние узловые элементы оказались вмятыми в структуру бамбука, поэтому на графике виден нисходящий участок. Результаты обоих подходов эксперимента были относительно похожи, поэтому эксперимент был остановлен. В результате проведенного эксперимента можно сделать вывод, что проектная длина внутреннего конуса должна быль больше конца бамбука. Таким образом эффективно решается проблема с повреждениями внутренней части бамбука, а также происходит соединение бамбука с конической формой, увеличивается поверхность трения, уменьшается перемещение, увеличивается прочность узла.

3.6 Экспериментальный анализ использования металла в новом узле

В результате проведенного исследования разных материалов, использующихся во внешней и внутренней частях конструкции, был сделан вывод, что в существующей ситуации наилучшим материалом для каждой части конструкции узлов нового типа является металл. Согласно результатам анализа, проведенного в несколько этапов, наиболее подходящим узловым соединением для бамбука явля-

ется проект узлового соединения №3, основанный на использовании конической формы и принципа «самоблокировки». Поэтому было проведено экспериментальное исследование проекта №3. В процессе эксперимента было использовано 2 вида материала. Учитывая, что обработка узловых элементов при соотношении 1:1 требует длительного времени, на начальном этапе проведено испытание модели узла в масштабе 1:3. В качестве материала элементов узла использован высокопрочный алюминиевый сплав. Образец был испытан на растяжение. Затем был произведен эксперимент над образцом реальных размеров со стальными ментами соединения.

Испытания алюминиевых элементов узла

Высокопрочные алюминиевые материалы имеют высокую прочность, легкий вес (плотность 2,79 г/см^3, предел прочности на разрыв: 420 МПа [62]). Цена такого материала выше, чем у других стальных материалов. Элементы узлового соединения были выполнены согласно параметрам проекта соединения № 3, но при уменьшенном соотношении 1:3. Элементы были установлены на бамбук диаметром 50мм, и данный узел подвергался эксперименту на растяжение.

Перед проведением эксперимента были проведены расчеты. Результаты расчетов: разрыв бамбука Мосо (диаметр 50 мм) возникает при усилии 62,13 кН, разрыв алюминиевых элементов – при 40,47 кН, болта при 32,46 кН. По результатам расчета видно, что при достижении установленного значения нагрузки разрыв болта происходит в первую очередь.

При проведении эксперимента на жение была использована компьютерная электронная универсальная испытательная машина INSTRON5969 (рисунок 3.22). В начале эксперимента при достижении нагрузки 15 кН произошло смещение – на силовом графике отобразились небольшие колебания. Их главная причина заключалась в том, что на первом этапе монтаж узловых элементов осуществлялся вручную, и поэтому скрепление бамбука с элементами было выполнено не очень качественно. При получении узлом нагрузки между внутренней частью бамбука и узловыми элементами возникло давление, что привело к небольшим перемещениям, возникшим в месте соединения бамбука и узловых элементов, в результате чего возникли небольшие колебания. В результате был сделан вывод о необходимости применения предварительного обжатия при сборке узла. Под предварительным обжатием понимается процесс приложения нагрузки (около 2 кН) для уплотнения узла до установки узла в конструкцию. Предварительное обжатие может достигаться затягиванием внешней гайки с контролируемым усилием. При достижении нагрузки 34 кН на графике появился нисходящий участок (рисунок 3.23). Его главная причина заключается в том, что нагрузка на болт превысила свой предел, что привело к текучести болта (рисунок 3.24). Полное перемещение составило 20,5 мм. После эксперимента узел был демонтирован и сфотографирован. После демонтажа на всех внешних и

Рисунок 3.22 – Экспериментальная машина INSTRON5969

внутренних узловых элементах не было обнаружено повреждений. На внешней и внутренней частях бамбука повреждений также не было обнаружено (рисунок 3.25). Таким образом, расчеты узловых соединений и результаты эксперимента приводят к выводу, что использование ческих материалов для проекта узловых соединений нового типа является логичным и рациональным решением.

Рис.3.24 – Разрушение болта в экспериментальном образце

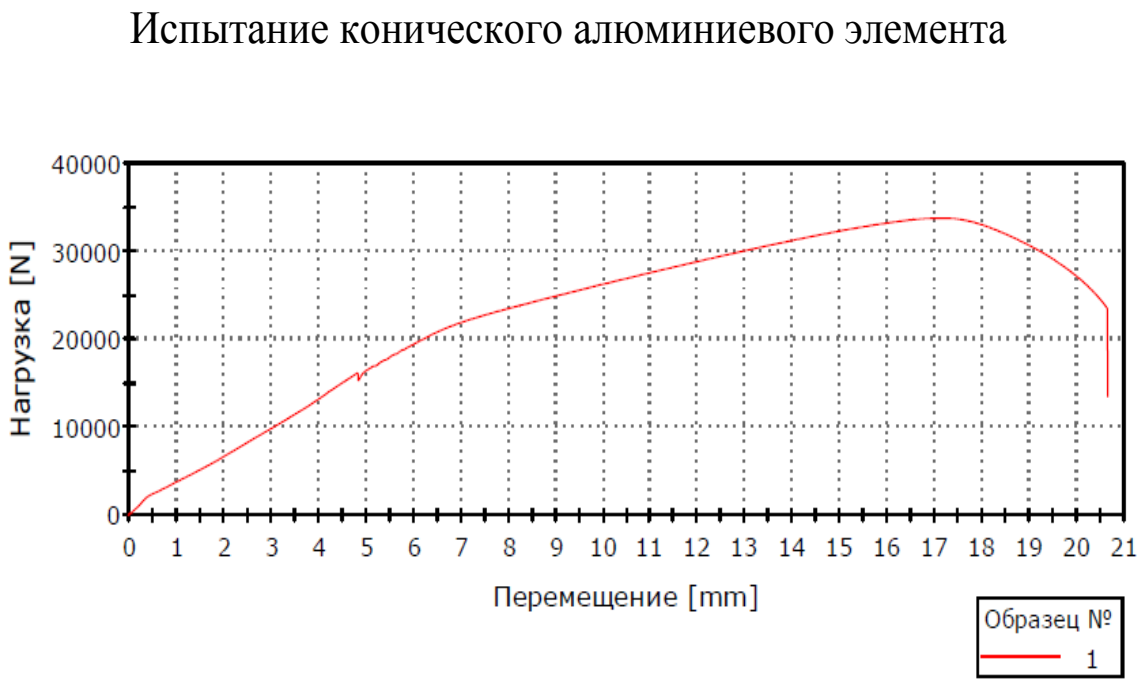


Рисунок 3.23 – График «нагрузка-перемещение» при испытании конического алюминиевого элемента на растяжение

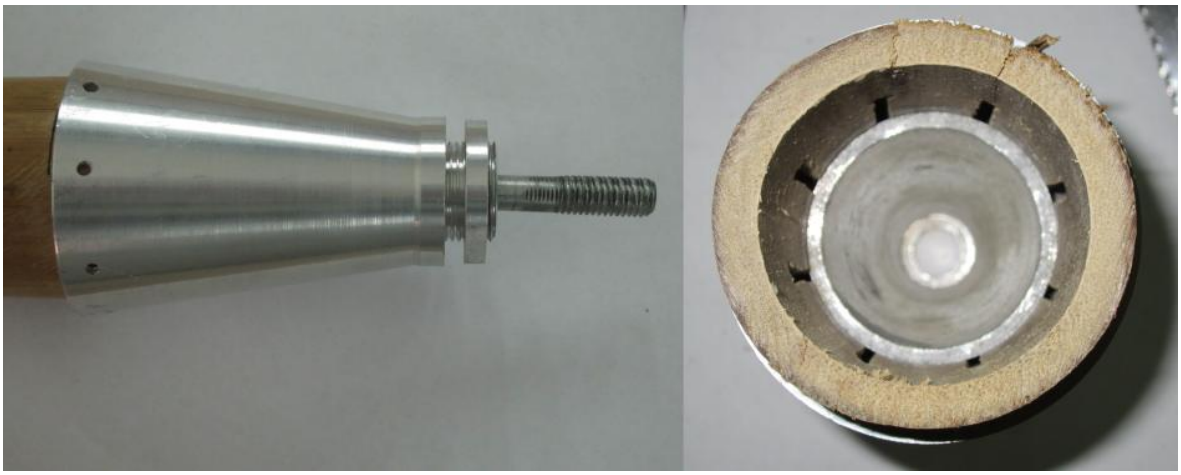


Рисунок 3.25 – Вид алюминиевых деталей и бамбука после испытания

Испытания стальных элементов узла

После проведение экспериментов проекта № 3 узлового соединения в уменьшенном масштабе были получены приблизительные результаты и расчеты. Таким образом, проект № 3 узлового соединения и использование металлических материалов соответствуют первоначальным проектным требованиям. С другой стороны, так как для эксперимента была выбрана модель узловых элементов с соотношением 1:3, результаты эксперимента являются лишь ознакомительными. Эксперимент на растяжение и сжатие необходимо провести в отношении узловых элементов, изготовленных в соответствии с соотношением 1:1. Только в этом случае полученные результаты будут точными. Что касается материалов, то из-за дороговизны высокопрочного алюминия была произведена его замена на сталь 5 [95], использованную ранее в проектах. В процессе экспериментов также было замечено, что прочность болтов недостаточна и не соответствует проектным требованиям. Поэтому для болтов была выбрана сталь 45 [96], что дополнительно повысило несущую способность узла.

Изготовление узловых элементов было проведено на станке с цифровым программным управлением. Размеры элементов были выбраны в соответствии с проектом № 3, использована сталь 5. Болты: высокопрочные термически обработанные болты из стали 45 (рисунок 3.26). Бамбук: бамбук Мосо, диаметром 100–125мм. После сборки узла были проведены испытания его на растяжение и сжатие.

Рисунок 3.26 –Металлические детали по проекту узла 3

Испытание на растяжение

Процесс подготовки экспериментальных образцов состоял в следующем: был выбран ствол бамбука Мосо длиной 700 мм, диаметром 105 мм, на обоих концах бамбук был разрезан на 10 равных частей. Внутренний конус был установлен внутрь бамбука, после резки бамбук был подвергнут изгибу так, чтобы угол «лепестков» на концах бамбука соответствовал углу внутреннего конуса (рисунок 3.27). Затем внешний конус установлен на конце бамбука, внутренний и внешний конусы скреплены между собой с помощью гаек (рисунок 3.28).

Рисунок 3.27 – Установка внутренней конической трубки в бамбук

Рисунок 3.28 – Установка стальных элементов узла

Для проведения эксперимента на растяжение узлов нового типа была использована компьютерная электронная универсальная пытательная машина INSTRON5989 (рисунок 3.29). Также была проведена компьютерная запись хода эксперимента. Перед проведением эксперимента для предварительного обжатия элементов к узлам была приложена нагрузка 20 кН, испытательная машина временно остановлена на 1 минуту для более удобного наблюдения за образцом.

Рисунок 3.29 – Испытание стальной конической трубки на растяжение

В течение всего эксперимента вместе с увеличением нагрузки в экспериментальном образце происходило смещение. Сначала смещение было относительно сильное, и к тому же сопровождалось шумом. Но при постепенном увеличении нагрузки происходило постепенное уменьшение смещения, шум также становился все более слабым, пока совсем не прекратился. Эксперимент был остановлен при достижении нагрузки 97,04кН. Главная причина остановки заключалась в том, что был достигнут предел длины хода испытательной машины. По-

сле завершения эксперимента был произведен демонтаж каждого элемента. На внешней части, внутреннем конусе, бамбуке и болтах не было обнаружено никаких повреждений (рисунок 3.30).

Рисунок 3.30 – После испытания внутренней конической трубки и сечение бамбука

Для получения окончательных данных о разрушении узла требуется провести эксперимент на другой испытательной установке. Был проведен анализ результатов эксперимента и перемещений, приведенных на графике (рисунок 3.31). Из графика можно заключить, что предварительное обжатие нагрузкой в 20 кН (цифра получена в ходе предварительного испытания модели узла в масштабе 1:3 с использованием алюминиевых элементов) оказалось недостаточным. В начале эксперимента каждый из элементов узла не был закреплен наилучшим способом.

В виду того, что естественная форма бамбука не является идеальной круглой формой, между бамбуком и металлическими элементами нет полного смыкания. В начале эксперимента имело место уплотнение узла, о чем свидетельствовал шум. После совмещения и закрепления соединения бамбука с металлическими деталями, весь узел начал функционировать в обычном режиме. Из результатов эксперимента и данных по всем элементам видно, что при нагрузке почти в 100 кН, элементы узла продолжают нормально функционировать, характер графика «нагрузка-перемещение» остается линейным.

Испытание конического стального элемента

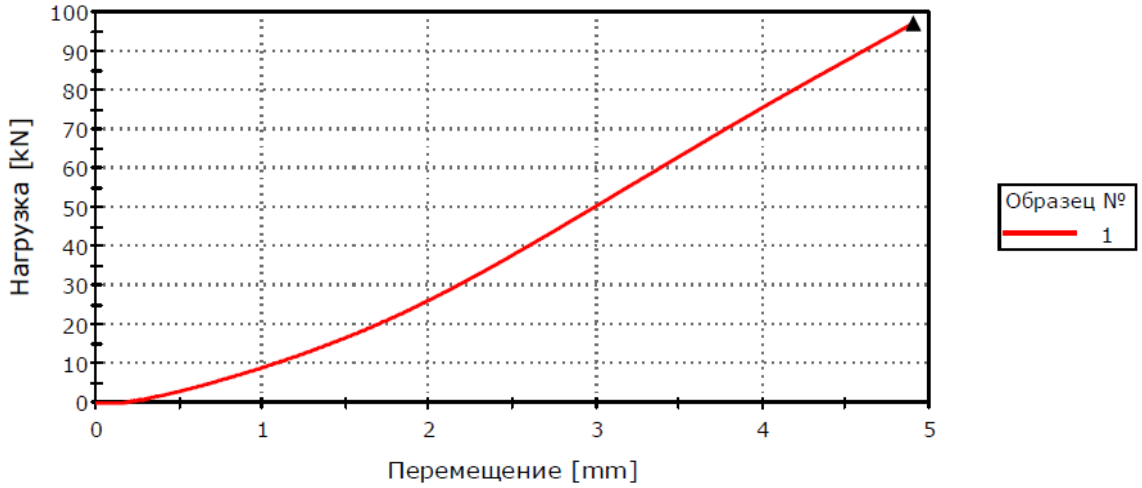


Рисунок 3.31 – График «нагрузка-перемещение» при испытании конического стального элемента на растяжение

Испытание на сжатие

Процесс проведения эксперимента на сжатие аналогичен процессу проведения эксперимента на растяжение. Для эксперимента был выбран ствол бамбука Мосо длиной 500 мм, диаметром 102 мм. Главная причина выбора таких размеров заключается в том, что после замены зажима для проведения эксперимента на сжатие на испытательной машине длина хода испытательной машины стала меньше. Поэтому размеры устанавливаемых металлических деталей также были выбраны соответственно размерам, необходимым для проведения эксперимента на сжатие (рисунок 3.32).

Рисунок 3.32 – Испытание стальной конической трубки на сжатие

Для проведения эксперимента на сжатие узлов нового типа была использована компьютерная электронная универсальная испытательная машина

INSTRON5989. Также была проведена компьютерная запись хода эксперимента. Как и в случае растяжения, использовано предварительное обжатие узла нагрузкой в 20 кН.

Рассматриваемое узловое соединение по-разному работает при растяжении и сжатии. При сжатии нагрузка передается на внешний конус, а с него непосредственно на бамбук. Таким образом, в опыте на сжатие основным являлось наблюдение за взаимным перемещением внешнего конуса и бамбука. При постепенном увеличении нагрузки от 0 кН до 150 кН зависимость между нагрузкой и перемещением оставалась линейной, с бамбуком также не происходило каких-либо изменений. При дальнейшем постепенном увеличении нагрузки перемещения увеличились. После достижения нагрузкой показателя 173 кН видимого разрушения не произошло, однако эксперимент был остановлен в силу нелинейности деформаций. В процессе эксперимента суммарное перемещение составило 7 мм. После завершения эксперимента был произведен демонтаж каждого элемента. На внутреннем и внешнем конусах не было обнаружено никаких повреждений. На гайках, соединяющих внутренний и внешний конусы, также не было обнаружено повреждений. На бамбуке видны следы давления, однако в целом бамбук не имеет повреждений.

Из анализа наблюдения за элементами узла и перемещениями, отображенными на графике (рисунок 3.33), следует, что до нагрузки 154 кН работа узла отвечает проектным ожиданиям. До проведения дополнительных исследований работы узла на сжатие следует принять его несущую способность равной 154 кН. При этом надо отметить, что даже при нагрузке в 173 кН разрушение элементов

узла не наступило.

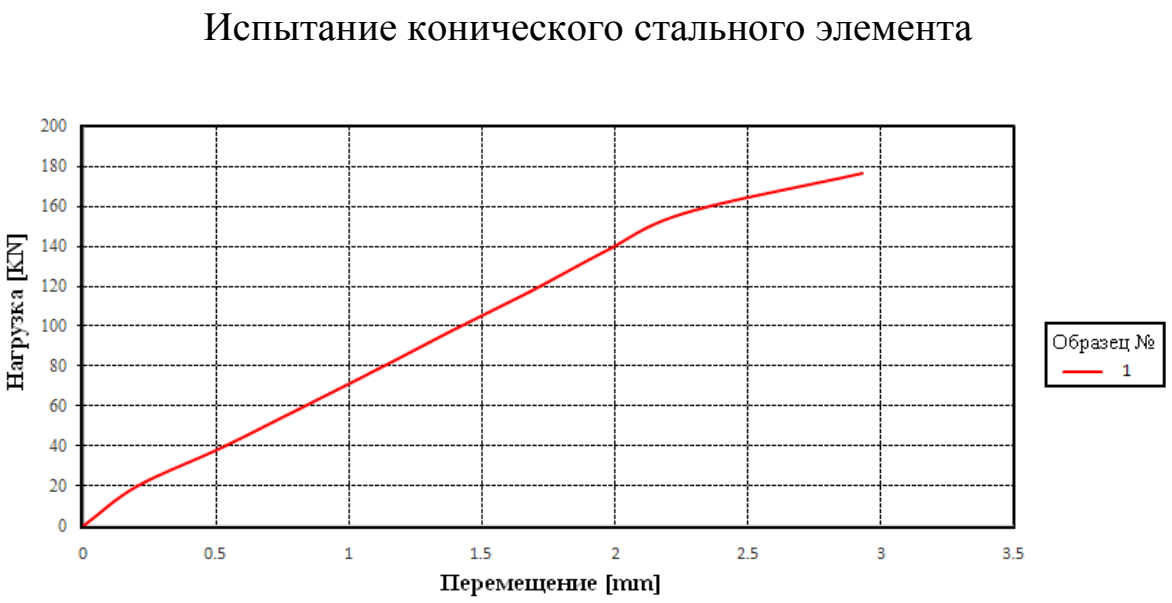


Рисунок 3.33 – График «нагрузка-перемещение» при испытании конического стального элемента на сжатие

3.7 Испытание нового узла на разрушение при растяжении

При проведении испытания на растяжение и сжатие варианта 3 узловых соединений нового типа при достижении нагрузки 97,04 кН и 173 кН соответственно, испытания были остановлены. Одной из причин остановки было то, что первоначально ставилась задача оценить лишь упругую работу узла. Соответственно продолжение эксперимента при нелинейном графике «нагрузка-перемещение» не требовалось. С помощью экспериментального анализа было установлено, что после прекращения испытаний элементы узла по-прежнему находились в рабочем состоянии. Требовалось установить, при какой нагрузке узловые соединения подвергаются разрушению, в каких частях разрушения возникнут в первую очередь; установить, какое влияние оказывают поврежденные части на работу узла. Поэтому в отношении узлов нового типа были проведены испытания на разрушение

при растяжении.

Сначала в отношении узлов нового типа было проведено испытание на разрушение при растяжении. Из-за ограниченной длины хода испытательной машины INSTRON5989 для испытания была выбрана многофункциональная испытательная машина старого образца ГМС-50N типа ЗИМ (рисунок 3.34). Указанная установка не имеет компьютера для автоматической регистрации данных. Для эксперимента был выбран бамбук Мосо длиной 1040 мм и диаметром 107 мм. Металлические элементы были изготовлены в соответствии с параметрами проекта узла № 3. Внешний и внутренний конусы и гайки изготовлены из стали 5, болты – из стали 45.

Рисунок 3.34 – Экспериментальная машина ЗИМ ГМС-50N

Подготовка элементов узла и бамбука была произведена по аналогии с предыдущими испытаниями на растяжение и сжатие. В начале предыдущих испытаний между бамбуком и металлическими элементами не было плотного стыка. Поэтому, учитывая опыт предыдущих экспериментов, в данном случае после установки узловых элементов было произведено их предварительное растяжение с нагрузкой 2 тс. В результате предварительного обжатия произошло смещение внутреннего конического элемента на 10 мм. Гайка, скрепляющая внутренний и внешний конусы, была докручена на эти 10 мм, после чего узел был готов к испытанию. После предварительного растяжения началось стандартное испытание

данных образцов узлового соединения на разрушение. Нагрузка прикладывалась ступенями. После приложения каждой ступени фиксировались перемещения. Испытательная машина была установлена на максимальную нагрузку растяжения с пределом в 25 тс (рисунок 3.35). Фиксация перемещения производилась визуально со шкалы испытательной машины.

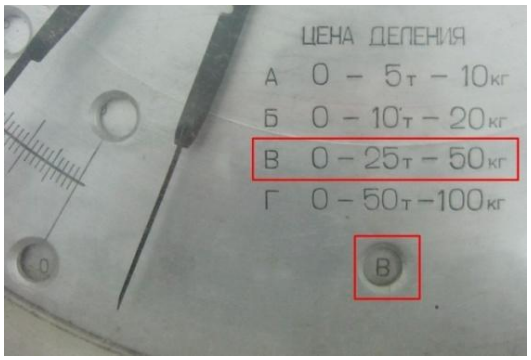


Рисунок 3.35 – Испытательная машина настроена на испытание с пределом в 25

Благодаря тому, что в начале испытаний было произведено предварительное растяжение узлов, существенных перемещений в них не возникло. Перемещения проявились после того, как нагрузка достигла 5 тс. При увеличении нагрузки до 8 тс в экспериментальном образце возник звук, но образец не разрушился. При увеличении нагрузки до 11 тс в экспериментальном образце также возник звук, однако после проведения визуальной проверки экспериментального образца повреждений также не было обнаружено. При достижении нагрузки 24,35 тс испытание было остановлено. Причина остановки обусловлена тем, что максимальная нагрузка испытательной машины составляет 25 тс. Во время проведения испытания при достижении нагрузки 24,35 тс на экспериментальном образце также не было обнаружено повреждений. Испытательная машина была перенастроена, и произведено ново испытание. Полное перемещение составило 80мм. После завершения испытания была произведена обработка данных（таблица. 3.8）, на основании обработанных данных составлен график зависимости перемещений от нагрузки（рисунок 3.36）.

Таблица 3.8 – Результаты испытания на растяжение при максимальной нагрузке 25 тонн силы

№	Перемещение (мм)	Нагрузка (тс)
1	0	0
2	0	0,5
3	0	1
4	15	5
5	23	10
6	32	15,5
7	46	20
8	58	22,6
9	63	23
10	72	24
11	80	24,35

Источник: разработано автором

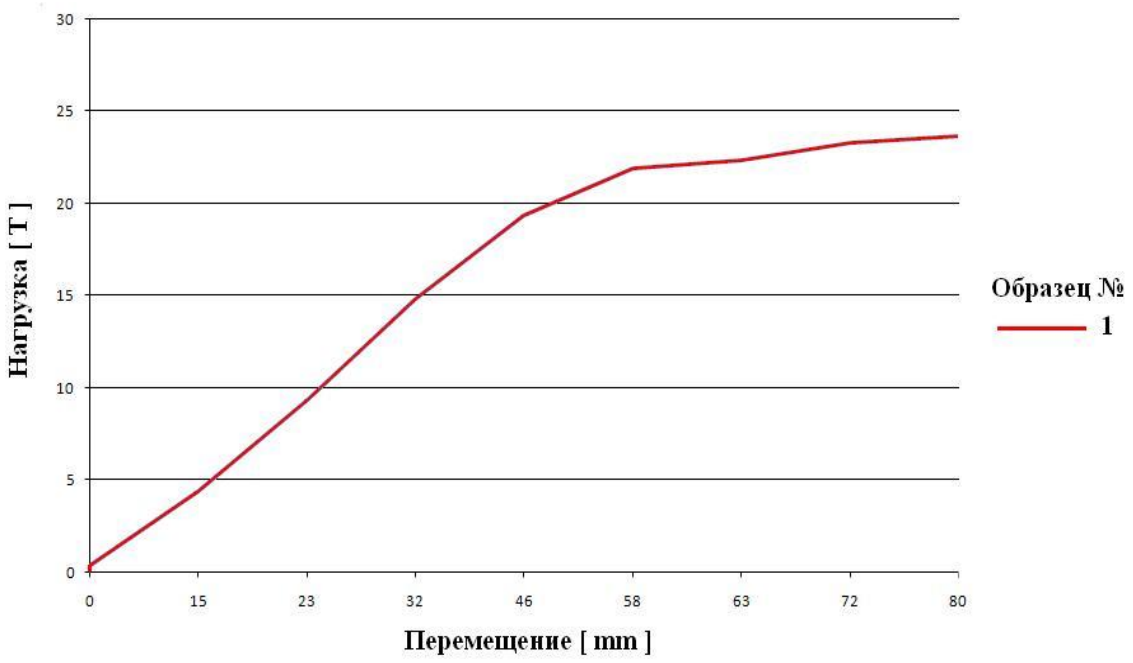


Рисунок 3.36 – График «нагрузка-перемещение» при испытании на разрушение при растяжении (25 тс)

В начале проведения второго подхода испытания, прежде всего, была произведена настройка испытательной машины. Установлено ограничение макси-

мальной нагрузки 50 тс（Рисунок 3.37）. Экспериментальные образцы приготовлены и установлены на испытательную машину. В начале проведения (до 10 тс) испытания перемещений не обнаружено. При увеличении нагрузки до 22,6 тс в узловых элементах возник звук. Была произведена визуальная проверка узловых элементов, на металлических элементах и бамбуке не было обнаружено повреждений. При увеличении нагрузки до 27,6 тс произошло разрушение болта, испытание было остановлено. Полное перемещение составило 57 мм. После завершения испытания все узловые элементы были демонтированы и сфотографированы. Затем была произведена обработка данных（таблица. 3.9）. На основании перемещений и данных о нагрузке при растяжении был составлен график（рисунок 3.38）.

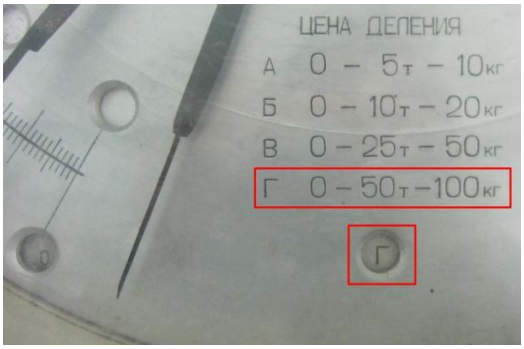


Рисунок 3.37 – Испытательная машина настроена на испытание с пределом в 50 тс

Таблица 3.9 – Результаты испытания на растяжение при максимальной нагрузке 50 тонн силы

№	Перемещение (мм)	Нагрузка (тс)
1	0	0
2	0	05
3	9	10
4	13	15,5
5	17	20
6	20	22,6
7	22	23
8	23	24
9	24	25
10	29	26
11	38	27
12	57	27,6

Источник: разработано автором

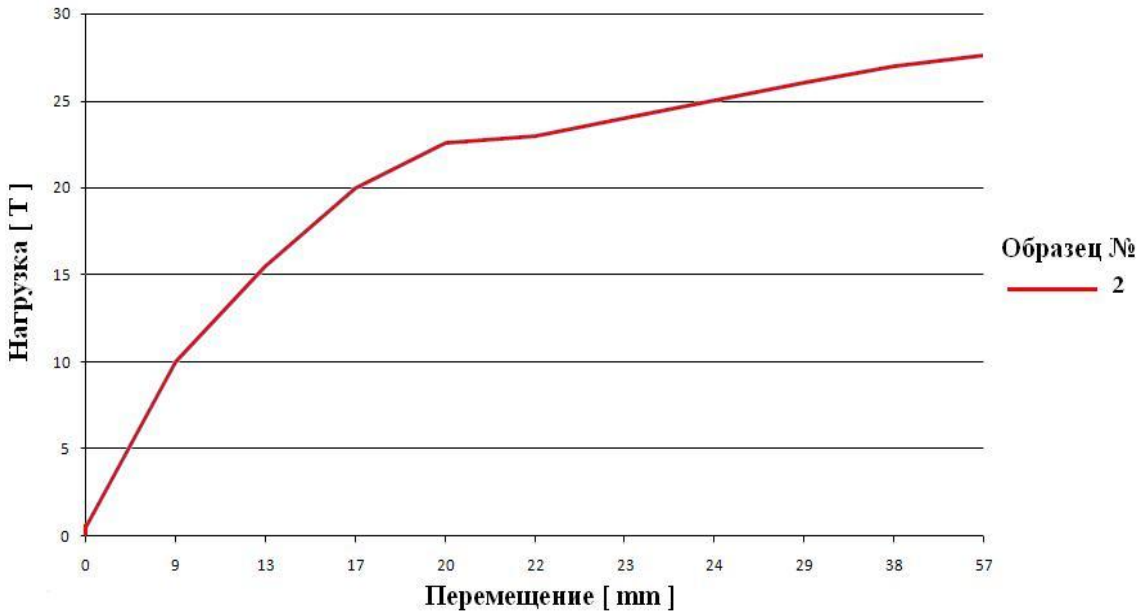


Рисунок 3.38 – График «нагрузка- перемещение» при испытании на разрушение при растяжении (50 тс)

При достижении нагрузки 27,6 тс между бамбуком и металлическими элементами возник очень плотный стык, поэтому их демонтаж было невозможно осуществить вручную. Для демонтажа была использована вспомогательная техника. После демонтажа узловых элементов на внешнем и внутреннем конусе не было обнаружено никаких повреждений. Вместе с тем произошло сплющивание стенок бамбука. Для болтов была использована сталь 45, физические и механические свойства которой выше, чем у обычной стали. Вследствие того, что эта сталь является высокоуглеродистой ее разрушение по характеру близко к разрушению хрупких материалов (рисунок 3.39). Общие результаты испытаний близки к предварительным расчетам.

Рисунок3.39 – Разрушение болта в экспериментальном образце

Выводы

1. Прочность на растяжение бамбука в зоне «сустава» и «без суставов» соответственно равны 117,803 МПа и 115,081 МПа. Прочность на растяжение в «суставе» оказалась выше прочности образцов «без сустава» на 2,4%. Таким образом, «сустав» в бамбуке не влияет на его прочность при растяжении вдоль волокон

2. Установлены механические характеристики бамбука Moco. В ходе исследования материала в первую очередь были проведены испытания бамбука на сжатие, и по их результатам предел прочности бамбука при сжатии вдоль волокон составил 73,931 МПа，а при сжатии поперек волокон 28,215 МПа.

3. В силу того, что проектное решение новой модели узлового соединения требует разделение ствола бамбука на сегменты, было проведено исследование способов разделения бамбукового материала, по итогам которого установлено, что наиболее рациональным делением стебля бамбука на части для придания ему конической формы является разрезка на 10 сегментов.

4. Проведено исследование материалов, использующихся во внешних элементах конструкции. Отдельное испытание двух выбранных материалов: фторопласта и полиэтилена, показало, что прочность этих двух видов материала недостаточна. Также было проведено исследование материалов внутренних элементов конструкции, были отдельно сделаны испытания используемых бетонных конусообразных элементов и стальных конусообразных элементов, по результатам которых оказалось, что бетонные элементы в ходе испытаний узла на растяжение частично разрушаются при сравнительно небольшой нагрузке, тогда как в случае

применения стальных элементов разрушение происходит по внутренним частям бамбука.

5. После анализа результатов испытаний, выявлено, что необходимо увеличить длину внутренних конусообразных элементов, решив таким образом проблему разрушения внутренней части бамбука, и одновременно с этим увеличив контактную поверхность между внутренними элементами и бамбуком, что повысит прочность узлового соединения. Таким образом, можно утверждать, что оптимальным материалом для элементов предлагаемого узла нового типа является металл.

6. Установлено, что при сборке узла для приведения его в рабочее состояние необходимо предварительное обжатие нагрузкой около 2 тс. Предварительное обжатие может достигаться затягиванием внешней гайки с контролируемым усилием.

7. Проведены испытания узла со стальными соединительными элементами на сжатие и растяжение. После многократных испытаний не было выявлено каких-либо признаков разрушения. При испытании новой модели узлового соединения на разрушение растяжением и сжатием места предполагаемого разрушения совпали с первоначальными проектными расчетами. Установлены следующие пределы, обеспечивающие работоспособное состояние узла: при растяжении – 22,5 тс, при сжатии – 15,7 тс.

ГЛАВА 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

4.1 Оценка податливости разработанного узлового соединения

В соответствии с нормами Российской Федерации по надежности строительных конструкций [97] при проектировании решетчатой стержневой конструкции и соответственно расчете узлов соединения стержней помимо проверки всех элементов конструкции по несущей способности (или по первой группе предельных состояний) необходимо выполнять проверку конструкции по второй группе предельных состояний, то есть для случая, когда нарушается нормальная эксплуатация строительной конструкции. Как правило, при отсутствии экстраординарных воздействий или условий работы конструкции выход за пределы нормальной эксплуатации в нормах ограничивается требованиями не превышения предельных прогибов или перемещений элементов (участков) конструкции в горизонтальных и вертикальных направлениях.

Очевидно, что для рассматриваемой стержневой конструкции из бамбука с узловыми соединениями важным фактором, влияющим на общую и локальную деформативность конструкции сооружения, становится комплекс продольных деформаций, сжатых и растянутых бамбуковых стержней, а также податливость элементов узла соединения.

Проведенные испытания узла на растяжение и сжатие показали, что деформативность узлов при растягивающих и сжимающих усилиях различна. В частности, при растягивающих усилиях податливость несколько выше, чем при сжатии. Это объясняется тем, что при растяжении лепестковый конус бамбука, зажатый

между внутренним и внешним стальными конусами, при малых усилиях может проскальзывать между ними. А так как силы трения между бамбуком и конусами линейно (коэффициент трения постоянен) зависят от сил обжатия этими конусами, то получается, что проскальзывание остановится только тогда, когда эти силы обжатия создадут силы трения, превышающие усилие растяжения в стержне.

Приближенно такое условие можно записать в виде:

$$T_{тр} = \sigma_{обж} F k_{тр} \geq N_{ст.раст} \quad , \qquad (4.1)$$

где – $T_{тр}$- сила трения по контакту «металл-бамбук» в области касания металлических конусов и бамбука;

$\sigma_{обж}$– напряжения сжатия (обжатия) бамбука поперек волокон, вызванные сближением внутреннего и внешнего металлических конусов за счет втягивания внутреннего конуса во внешний при растяжении в стержне;

F– суммарная площадь касания бамбука с внутренним и внешним металлическими конусами, см^2;

$k_{тр}$ – коэффициент трения скольжения «металл-бамбук»;

$N_{ст.раст}$ – усилие растяжения в рассматриваемом стержне.

Таким образом, для того, чтобы исключить проскальзывание бамбука в конусах следует до начала загружения конструкции во всех стержнях, в которых предполагается растяжение, создать такое обжатие бамбука, которое вызовет в контакте «металл-бамбук» силы трения, превышающие усилие растяжения в стержне. Такое усилие можно и следует создать путем затягивания упорной гайки, которая втягивает внутренний конус во внешний. При этом следует контролировать усилие затягивание, например, с помощью динамометрических ключей.

Для решения задачи определения усилия затягивания упорной гайки следует знать коэффициент трения скольжения «металл-бамбук» $k_{тр}$. Из открытых источников, автору диссертации этих характеристики найти не удалось. Кроме того, здесь следует обратить внимание на то, что «трубка» бамбука имеет различную плотность на наружной и внутренней поверхностях этой «трубки». И судя по внешнему виду, плотность «древесины» наружных слоев бамбука значительно выше «древесины» бамбука внутренних слоев. Значит, и коэффициент трения скольжения «металл-бамбук» будет также разным для каждой из поверхностей. Кроме плотности, можно утверждать, что и деформации смятия поперек волокон с наружной и внутренней стороны будут также значительно различаться.

Очевидно, что для получения знаний по изложенным выше вопросам требуются отдельные исследования, которые могли бы быть логичным продолжением выполненных в данной диссертации исследований.

«Проскальзывания» бамбука в узле является наиболее крупным вкладом в общую податливость узла. Но кроме «проскальзывания» еще остаются прочие деформации, в числе которых можно назвать неточности сборки, рыхлые деформации непредвиденных зазоров, изгибные деформации от расцентровки узла и др.

В первом приближении (без специальных исследований) и с некоторым запасом общую податливость можно принять равной предельным деформациям в соединениях деревянных конструкций, равной предельным деформациям нагельных соединениям – 2 мм. Очевидно также, что и эта задача может быть решена в рамках дальнейших исследований.

Тем не менее, приближенную оценку усилия затягивания упорной гайки и

исключение наибольших смещений проскальзывания можно привести.

Условно примем коэффициент трения скольжения «металл-бамбук» равным среднему коэффициенту трения скольжения «металл-дерево», равным 0,45. Напряжения смятия бамбука σ_{bam} получены ранее по формуле (8).

$$\sigma_{обж} = \sigma_{bam} = q = \frac{\cos\alpha}{\pi(2\rho_0 + L\mathrm{tg}\alpha)L} N, \qquad (4.2)$$

Площадь поверхности усеченного конуса составляет $F=\pi (r_1+ r_2) L$.

Так как контакт обжатия происходит снаружи и внутри бамбука, то площадь касания при трении увеличиваем в 2 раза. Тогда сила трения от обжатия (1) будет равна

$$T_{тр} = \frac{\cos\alpha}{\pi(2\rho_0 + L\mathrm{tg}\alpha)L} N_{ст.раст} \; 2F\, k_{тр} \geq N_{ст.раст}, \qquad (4.3)$$

после преобразования условие затягивания гайки будет выглядеть

$$K_{зат} = \frac{\cos\alpha}{\pi(2\rho_0 + L\mathrm{tg}\alpha)L} \; 2F\, k_{тр} \geq 1.0, \qquad (4.4)$$

Это неравенство показывает во сколько раз усилие затяжки должно быть выше усилия в стержне. Например, для экспериментального узла, испытанного на растяжение это значение составляет.

d_{int} = 56.2 мм; d_{ext} = 88.0 мм; $k_{тр}$= 0,45; L = 17,55 мм;

$\alpha = \mathrm{arctg}((d_{ext} - d_{int}) / 2L) = 5{,}2°$; $\rho_o = \pi (d_{ext}+d_{int}) / (4\cos(\alpha) = 35{,}4$ мм;

$F = \pi (d_{ext}+d_{int}) L / 2 = 390$ см^2.

Подставив эти значения в (4.4) мы получим $K_{зат}$ = 0,7. Значит следует увеличить усилие затягивания примерно в 1,5 раза больше, чем возникает усилие растяжения в наиболее растянутом стержне. В этом случае $K_{зат}$ = 0,7 ·1,5 = 1,1. К примеру, если максимальное усилие растяжение в растянутых стержнях составля-

ет 6 т, то с помощью динамометрических ключей упорную гайку следует подтягивать до усилия в 6т·1,5 = 9,0 т.

В реальном строительстве инженер-проектировщик должен выполнить статический расчет стержневой конструкции. Получить усилия в стержнях, и выделить те стержни, в которых при любой нагрузке возникают растягивающие усилия. По ним определить наибольшее усилие в каком-либо стержне. Затем по предложенной выше формуле вычислить коэффициент затяжки гайки. Перемножив этот коэффициент и наибольшее усилие, получить усилие затяжки упорной гайки. Если при строительстве заранее неизвестно какие стержни будут растянуты, то следует в проектной документации записать указание, что во всех стержнях следует выполнить затяжку упорных гаек до указанной величины.

4.2 Методические рекомендации по конструированию узлового соединения

В соответствии с данными, приведенными в диссертационной работе, основанными на проведенных исследованиях, результаты изучения нового узлового соединения выявляют его состоятельность. В качестве материала для исследований использовался бамбук Мосо диаметром приблизительно в 100 мм. Принимая во внимание то, что диаметр стебля бамбука может существенно различаться, для практического применения необходимо увеличить вариативность параметров предлагаемого в работе узлового соединения. Необходимо обеспечить возможность подбора габаритов металлических соединительных деталей в зависимости от диаметра бамбука. Таким образом, возможности применения нового типа уз-

ловой конструкции существенно расширяются. Ниже приводятся описание материалов, используемых в соединении и параметры элементов узлового соединения в рекомендуемом диапазоне.

Бамбук

Среди большого разнообразия сортов бамбука в Китае особенно распространено выращивание именно бамбука Мосо. Соответственно, данный материал имеет низкую стоимость. С другой стороны, изделия из бамбука Мосо обладают очень хорошими физическими и механическими свойствами. Кроме того, использование бамбука Мосо в строительстве имеет свою долгую историю. Таким образом, можно прийти к выводу, что данный материал является прекрасной основой строительной конструкции. Возраст бамбука Мосо должен достигать 4–10 лет для стабилизации свойств материала, однако в современном строительстве используют бамбук Мосо возрастом не более 6 лет. В этом возрасте влагосодержание, плотность, усадка при высыхании и прочность бамбука достигают оптимальных показателей [111]. В строительстве наиболее распространено использование средней части стебля бамбука. Диаметр стебля бамбука Мосо может варьироваться от 80мм до 150 мм, однако, для практического применения можно остановиться на диаметре 100–150 мм. В Китае существует государственный стандарт, определяющий свойства бамбука Мосо – GB/T2690-2000 «Рекомендованный национальный стандарт Китая для бамбука Мосо» [100]. В диссертационной работе рассматривается материал, определяемый данным стандартом.

Сферический элемент

Главное назначение сферического элемента–коннектора с отверстиями для болтов заключается в соединении стволов бамбука, а также передаче полученного растяжения и сжатия на стволы бамбука. Учитывая это для сферического элемента–коннектора был произведен выбор материала и параметров. В качестве материла выбрана сталь 45. Выбор параметров осуществлялся в соответствии с китайскими стандартами JGJ 75.1–91 «Болтовые узловые соединения каркаса металлических структурных конструкций» [101]. Рекомендации по практическому применению сводятся к подбору вида сферического коннектора и диаметра соединительных болтов в зависимости от диаметра ствола бамбука. Выбрано три диапазона диаметра бамбука: 100–114 мм, 115–129мм и 130–150 мм. Соответственно им выбрано три разных диаметра сферического элемента–коннектора – 100 мм，125 мм，150 мм. На коннекторе сделаны отверстия с внутренней резьбой диаметром 20 мм，24 мм и 30 мм (таблица. 4.1) (рисунок 4.1). На каждом сферическом коннекторе должно быть 18 стандартных отверстий с внутренней резьбой для закрепления узлового соединения бамбукового стержня.

Таблица 4.1 – Три разных диаметра сферического элемента-коннектора

Размер сферический элемент	**Диаметр бамбука**		
	100-114 мм	**115-129 мм**	**130-150 мм**
1.Диаметр сферического элемента （D, мм）	100	125	150
2.Диаметр отверстия (d, мм)	20	24	30
3.Длина отверстия (l, мм)	22	26.5	33
4.Угол (α)	45	45	45
5.Количество отверстий в сферическом элементе (шт.)	18	18	18

Источник: доработано автором

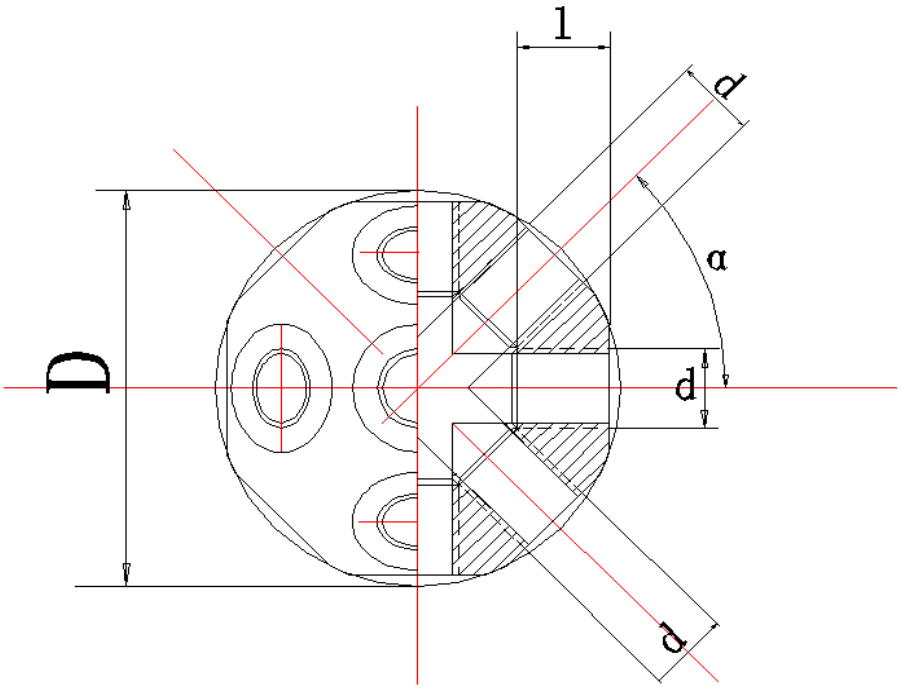


Рисунок 4.1 – Схема сферического элемента

Высокопрочные болты

Высокопрочные болты являются важными соединительными элементами, соединяющими сферический элемент-коннектор и ствол бамбука. Они выполняют важную роль при растяжении соединений нового типа. Высокопрочные болты должны соответствовать китайскому стандарту GB/T 16939-1997 «Применение высокопрочных болтов в болтовых узловых соединениях каркаса металлических структурных конструкций» [102]. Необходимый класс прочности – 8.8 или 10.9. Для удобства монтажа шляпки болтов должны иметь круглую форму. В соответствии с параметрами сферического элемента-коннектора диаметр болтов должен быть соответственно 20 мм, 24 мм и 30 мм. Прочие параметры болтов указаны в приведенной ниже таблице. 4.2 (рисунок 4.2).

Таблица 4.2 – Прочие параметры болтов

Размер высокопрочных болтов	**Диаметр сферического элемента**		
	100 мм	**125 мм**	**150 мм**
1. d, мм	M20	M24	M30
2. d_k, мм	30	36	46
3. L, мм	73	82	98
4. K, мм	12,5	15	18,7
5. b, мм	30	36	44
6.l_1, мм	24	24	28
7.l_2, мм	16	18	24
8.l_3, мм	4	4	4
9.n, мм	5,5	5,3	6,3
10.t_1, мм	3,30	3,30	4,38
11.t_2, мм	2,80	2,80	3,30

Источник: доработано автором

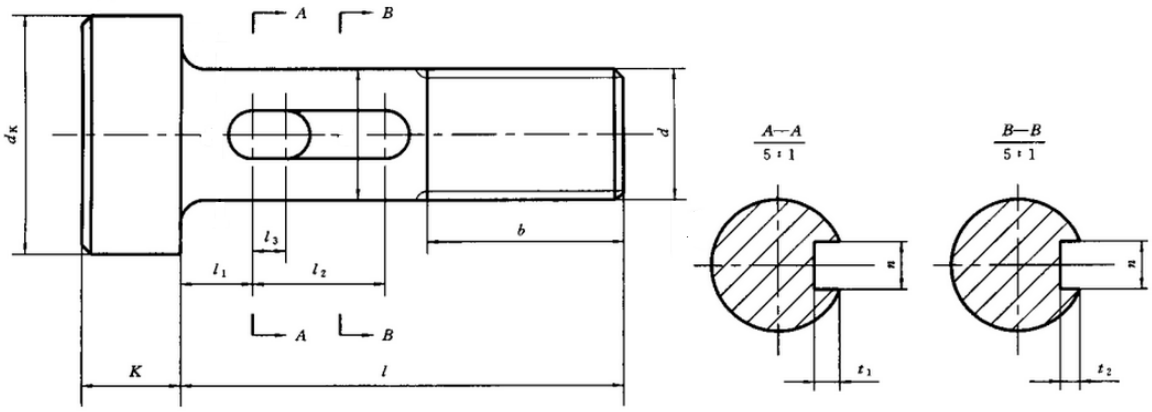


Рисунок 4.2 – Схема высокопрочного болта

Внешняя коническая трубка (внешний конус)

Главное назначение внешней конической трубки (внешнего конуса) заключается в ограничении смещения вовне бамбука при растяжении узла, обеспечение эффективности соединения при «самоблокировке» между внутренним конусом и бамбуком. Этот элемент также выполняет функцию передачи нагрузки на бамбук при работе узла на сжатие и защищает соединения внутреннего конуса и бамбука.

Для внешней конической трубки используется сталь 5. Для различных значений диаметра бамбука предложены соответствующие параметры внешнего конуса (таблица 4.3) (рисунок 4.3).

Таблица 4.3 – Параметры внешнего конуса

Размер внешней конической трубки	**Диаметр бамбука**		
	100-114 мм	**115-129 мм**	**130–150 мм**
1. Верхний диаметр трубы (d_1, мм)	72	88	106
2. Нижний диаметр трубы (d_2, мм)	115	140	170
3. Толщина стенки трубы (h, мм)	3	3	3
4. Длина трубы (L, мм)	240	240	240
5. Угол (β)	11°	11°	11°

Источник: разработано автором

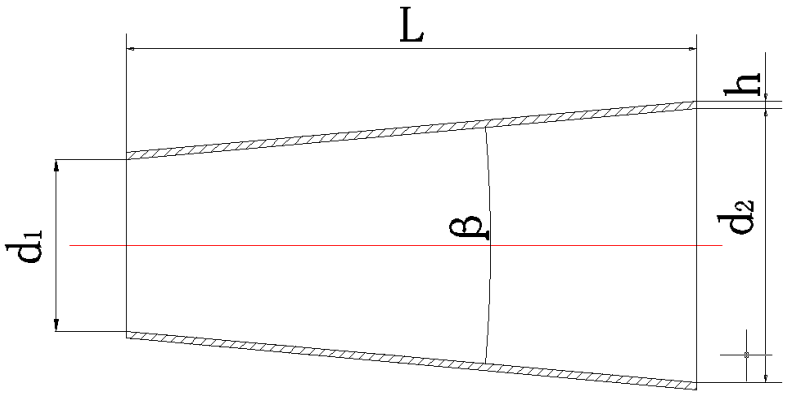


Рисунок 4.3 – Схема внешней конической трубки

Внутренняя коническая трубка (внутренний конус)

Главное назначение внутренней конической трубки (внутреннего конуса) заключается в соединении концов бамбука, обеспечение «самоблокировки» с внешним конусом при растяжении. Таким образом, обеспечивается эффективное соединение между бамбуком и металлическими элементами, а также равномерная передача нагрузки на бамбук. В качестве материала для внутренней конической

трубки выбрана сталь 5. В зависимости от диаметра бамбука предложены соответствующие параметры внутренней конической трубки (таблица 4.4) (рисунок 4.4).

Таблица 4.4 – Параметры внутренней конической трубки

Размер внутренней конической трубки	**Диаметр бамбука**		
	100—114 мм	**115—129 мм**	**130—150 мм**
1. Верхний диаметр трубы (d1, мм)	56	70	84
2. Нижний диаметр трубы (d2, мм)	88	110	130
3. d_3, мм	22	26	32
4. d_4, мм	40	50	60
5. L_1, мм	175	220	260
6. L_2, мм	60	75	88
7. L_3, мм	16	16	16
8. L_4, мм	45	56	68
9. Толщина стенки (h, мм)	3	3	3
10. Угол (β)	11°	11°	11°

Источник: разработано автором

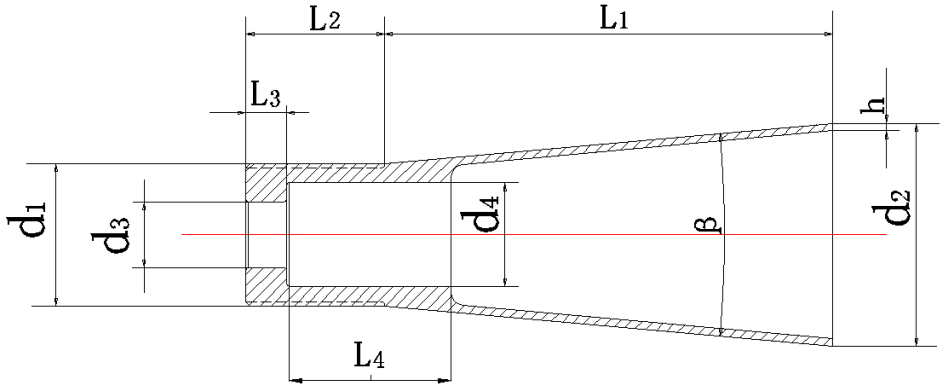


Рисунок 4.4 – Схема внутренней конической трубки

Гайка

Главное назначение гаек заключается в соединении и закреплении внутренней и внешней конических трубок. При работе узла на сжатие гайка участвует в передаче усилия на внешний конус. Также может использоваться для предвари-

тельного обжатия элементов узла. В этом случае необходимо производить ее затягивание с контролируемым моментом. В качестве материала для гаек выбрана сталь 5. В соответствии с диаметром бамбука предложены необходимые параметры гаек (таблица 4.5) (рисунок 4.5).

Таблица 4.5 – Параметры гайки

Размер гайки	**Верхний диаметр внутренней конической трубы**		
	56 мм	**70 мм**	**84 мм**
1.Наружный диаметр гайки (d_1, мм)	56	70	84
2.Внутренний диаметр гайки (d_2, мм)	20	24	30
3.Толщина стенки гайки (h, мм)	10	12	14

Источник: разработано автором

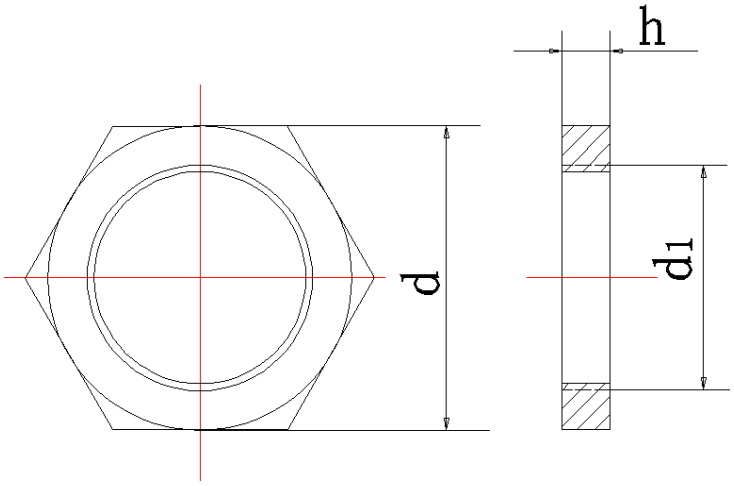


Рисунок 4.5 – Схема гайки

Поводковая гайка

Главное назначение поводковой гайки заключается в передаче нагрузки со сферического элемента–коннектора на соединительные элементы при работе узла на сжатие. В качестве материала для поводковой гайки используется сталь 45. Ее параметры должны соответствовать китайскому стандарту GB/T 16939—1997

«Применение высокопрочных болтов в болтовых узловых соединениях каркаса металлических структурных конструкций» [102]. (таблица 4.6, рисунок 4.6).

Таблица 4.6 – Параметры поводковой гайки

Размер поводковой гайки	**Диаметр высокопрочного болта**		
	20 мм	**24 мм**	**30 мм**
1. Длина поводковой гайки (M, мм)	35	40	45
2. Место фиксатора (a, мм)	10	10	10
3. Ширина поводковой гайки (S, мм)	34	41	50
4. L, мм	37,29	45,20	55,37
5. Внутренний диаметр (D, мм)	21	25	31
6. Диаметр фиксатора (D_0, мм)	6	6	8

Источник: разработано автором

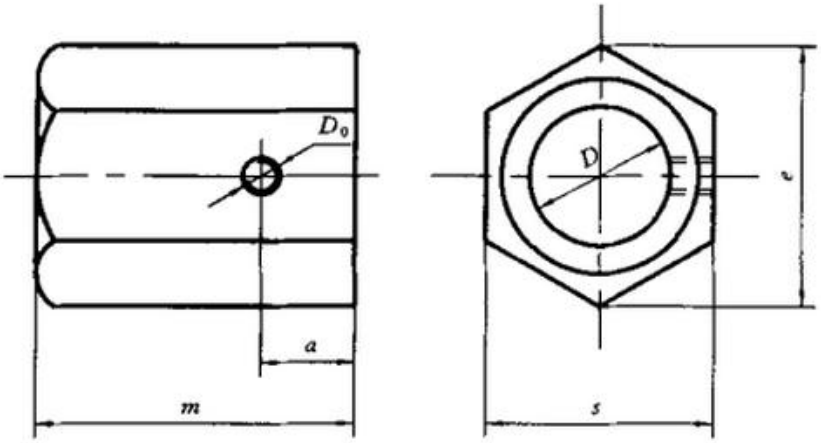


Рисунок 4.6 – Схема поводковой гайки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На начальном этапе работы установлена важность и актуальность развития строительства из бамбука. Вместе с сокращением площади леса в Китае правительство уделяет все большее внимание реализации проектов по защите естественных лесов. Проблема нехватки лесных ресурсов становится все более заметной, цены на строительные лесоматериалы также непрерывно растут [43]. Бамбук относится к быстро растущим видам лесных ресурсов. Его быстрая воспроизводимость и ряд других преимуществ привлекают внимание все большего числа людей.

Из-за своей экологичности бамбук вызывает все больше внимания и предпочтения у архитекторов и дизайнеров. Тем не менее, развитие бамбуковой архитектуры ограничивается из-за низкой надежности существующих соединительных узлов, недостаточной долговечности. Для преодоления данной проблемы необходимо разработать принципиально новый вариант узлового соединения стержневых бамбуковых элементов. Прежде всего в диссертационной работе выполнен анализ существующих сегодня в мире бамбуковых узлов.

2. В ходе анализа существующих конструктивных решений соединения бамбуковых элементов установлены требования, которым должен удовлетворять новый вариант узлового соединения: высокая скорость монтажа, низкая стоимости материалов и работ, надежность конструкции (несущая способность соединения должна быть близка к несущей способности бамбука), максимально эффективное использование положительных свойств бамбука, возможность демонтажа, в том числе замены отдельных элементов узла.

3. В ходе изучения бамбука замечено, что цилиндрические стволы бамбука близки к стальным трубам и по внешнему виду, и по механическим свойствам. Поэтому была выдвинута идея о том, что можно выполнять бамбуковые конструктивные соединения по аналогии с проектами стальных узловых соединений. Идея конструктивного решения узла состоит в том, что бамбуковые стволы крепятся к общему соединительному элементу (стальному шару). При этом болтовое соединение с использованием стального соединительного шара, используемое для стальных конструкций, в настоящее время имеет уже отработанную технологию с четко определенными стандартами выполнения. Такой способ, например, разработан В. К. Файбишенко и другими конструкторами «систем МАРХИ» [4]. После усовершенствования и оптимизации проектов узловых соединений нового типа в итоге был получен наиболее рациональный проект конструктивного соединения нового типа. С помощью формул и программы построения конечно-элементарной модели ANSYS соответственно были проведены расчеты и анализ проекта №3 узловых соединений нового типа.

4. В ходе работы проведены экспериментальные исследования, а именно: испытание материалов и испытание собственно узла нового типа. При проведении испытания материалов отдельно были проведены испытания бамбука Мосо на растяжение и сжатие. Вместе с этим был проведен анализ способа сегментации бамбукового материала в узловых соединениях нового типа. Кроме этого, были проведены испытания фторопласта и полиэтилена как материала для внешних элементов узла, а также бетонного и стального конусов как внутреннего элемента узла. В результате установлено, что наиболее эффективным является использова-

ние для внутреннего и внешнего конусов металла.

5. На заключительном этапе испытательной работы узел был выполнен в натуральную величину и подвергнут ряду испытаний. После проведения нескольких испытаний было установлено, что данное соединение надежно и безопасно. Допускаемая нагрузка при растяжении составила 22,5 тс, а при сжатии – 17,6 тс. При проведении испытаний был использован бамбук Мосо со средним диаметром 100 мм.

6. На заключительном этапе исследования сделаны некоторые разработки с целью упрощения практического применения предлагаемого узла. Для трех диапазонов диаметра бамбука (100–114 мм, 115–129 мм, 130–150 мм) подобраны параметры всех соединительных элементов узла. Каждый диаметр соответствует параметрам металлических элементов, сферического коннектора, болтов.

Результатом данной работы является предложенная идея конструктивного решения бамбукового узлового соединения нового типа, выработанная в результате анализа строительных узлов в современной бамбуковой архитектуре, а также в результате изучения свойств материалов. Разработанный вариант узла обеспечивает универсальное, прочное, надежное, относительно простое в изготовлении, монтаже и демонтаже соединение. Эффективность разработанной конструкции подтверждена опытами.

Новый вариант узла обеспечивает универсальное, прочное, надежное, относительно простое в изготовлении, монтаже и демонтаже соединение, условно названное «Узел СПбГАСУ».

Кроме того, благодаря особой конструкции «Узла СПбГАСУ», появляется

возможность замены не только одного или нескольких поврежденных, или вышедших из строя бамбуковых стержней на новые, но и самих стальных наконечников, закрепляющих стержни бамбука в узле конструкции. Причем эти замены можно производить также в условиях «без полной разгрузки» конструкции. В этом случае, благодаря свойству сборно–разборности, можно временно выключить из работы какой-либо стержень. При этом остальные стержни возьмут на себя часть нагрузки и перераспределят её на соседние элементы.

Эффективность разработанной конструкции подтверждена опытами. Новый вариант конструктивного решения соединения бамбуковых элементов может найти широкое применение в современной бамбуковой архитектуре.

Таким образом, можно утверждать, что в диссертации изложены новые научно обоснованные технические и технологические разработки узловых соединений бамбука в строительных конструкциях пространственного решетчатого типа, имеющие существенное значение для страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Научно–исследовательские издания

1. Александр, Петелин. SketchUp-просто 3D! Учебник–справочник Google SkechUp v.8.0 Pro / Петелин Александр // Электронное издание. – 2012.

2. Басов, К. А. ANSYS для конструкторов / К. А. Басов // – М. ДМК Пресс, – 2009.

3. Власов, В. З. Общая теория оболочек / В. З. Власов // – Москва. Госстройиздат, – 1949.

4. Горев, В. В. Металлические конструкции в3 т. Т. 1 / В. В. Горев. // – М. Элементы конструкций, Высшая школа, – 2001.

5. Горчаков, Г. И. Строительные материалы / Г. И. Горчаков, Ю. М. Баженов // – Москва, – 2012.

6. Деордиев, С.В. Экспериментальные исследования клеедощатых балок на поперечный изгиб при действии статической и кратковременной динамической нагрузки / С. В. Деордиев, Д. Г. Копаница, Г. Д. Копаица, Р. С. Тутатчиков // Вестник ТГАСУ, – 2014, – №3.

7. Жаданов, В. И. Оценка напряженно-деформированного состояния крупноразмерных клеефанерных плит численными методами / В. И. Жаданов // Вестник ОГУ, – 2002, – №5. –С. 179-182.

8. Жаданов, В. И. Влияние конструктивных особенностей совмещенных ребристых деревянных плит на их напряженно-деформированное состояние / В. И. Жаданов // Вестник МГСУ, – 2013, – №5. – С. 35-42.

9. Инжутов, И. С. Анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций и разработка сборно-разборного узлового элемента / И. С. Инжутов // Вестник МГСУ, – 2013, – №3. – СФУ, – С. 61-71.

10. Карлсен, Г. Г. Конструкции из дерева и пластмасс / Г. Г. Карлсен, Ю. В. Слицкоухов // – М. – 1986.

11. Карлсен, Г. Г. Индустриальные деревянные конструкции. Примеры проектирования / Г. Г. Карлесн // – М. –1967.

12. Котлов, В.Г. Конструкции из дерева и пластмасс: методические указания к выполнению лабораторных работ / В.Г. Котлов, Наумов А.К. // – ПГТУ, – 2011.

13. Крицин, А. В. Анализ режима силовых воздействий на деревянные конструкции покрытий / В. Г. Миронов, А. В. Крицин // Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте: Сб. науч. тр. Междунар. Науч.-техн. Конф. –Самара: СамГАСА, – 2002. – С. 295-300.

14. Крицин, А. В. Несущая способность соединений на металлических зубчатых пластинах и ее зависимость от ориентации и толщины пластины / А. В. Крицин, В. Г. Миронов // Строительные конструкции – 2000: Сб. материалов Всерос. науч. – практ. конф. молодых ученых. – М.: МГСУ, – 2000. – Ч. 3. – С. 24-28.

15. Крицин, А. В. Исследования на прочность малоразмерных образцов из бамбукового композита / А. В. Крицин, С. Ю. Лизачева, А. С. Торопов, Д. М. Лобов, А. В. Тихонов // приволжский научный журнал, Новгород, – 2014. – №3. – С. 26-30.

16. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева // – М. Едиториал, УРСС, – 2003.

17. Ляв, А. Математическая теория упругости./ А. Ляв // ОНТИ НКТП, – Москва, – 1935.

18. Лабудин, Б. В. Расчет композитных деревоклееных балок на основе применения инженерного метода [Текст] / С. И. Рощина, М. В. Лукин, Б. В. Лабудин, В. И. Мелехов // Лесной журнал. – 2012. – № 3.

19. Лабудин, Б. В. Клееные деревянные конструкции: состояние и проблемы развития [Текст] / Е. Н. Серов, Б. В. Лабудин // Известия вузов. Лесной журнал. – 2013. – № 2.

20. Муханов К. К. Металлические конструкции / К. К. Муханов // – М. Стройиздат, – 1978.

21. Макаров, Е. Г. Самоучитель MathCad 14 / Е. Г. Макаров // Санкт-Петербург, – 2008.

22. Макаров, Е. Г. Инженерные расчеты в MathCad 14 / Е. Г. Макаров // Санкт-Петербург, – 2007.

23. Никитин, Г. Г. Разработка конструкций зданий и сооружений с использованием древесины / Г. Г. Никитин, Л. Р. Куправа // – СПб. –2007.

24. Никитин, Г. Г. Вопросы применения и расчета нагельных соединений / Г. Г. Никитин // Сборник научных трудов. Вып. 34. ЛИСИ, – 1961. – С.56-59.

25. Найчук, А.Я. О несущей способности узлов деревянных клееных трехшарнирных арок. / А.Я. Найчук // «Лесной журнал», – 2006. – №3, –С. 141-145.

26. Орлов, А. А. Autocad 2014 / А. А. Орлов // Санкт-Петербург, – 2014.

27. Погорельцев, А.А. Клееные деревянные конструкции с узлами на вклеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК) /А.А. Погорельцев, С. Б. Турковский, И.П. преображенская // Стройматериалы, – 2013.

28. Серов, Е.Н. Проектирование деревянных конструкций [Текст]: учеб. Пособие / Е. Н. Серов, Ю. Д. Санников, А. Е. Серов, // – М. Издательство АСВ, – 2011.

29. Сериков, Г. А. Строительство дома. От фундамента до крыши. Современная архитектура, технологии и материалы / Г. А. Сериков // –М. – Рипол Классик, – 2009.

30. Самуль, В. И. Основы теории упругости и пластичности / В. И. Самуль // – Москва, "Высшая школа", – 1970.

31. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер // – М. изд-во «Наука» . – 1966, – 636 с.

32. Тимошенко, С. П. Курс теории упругости / Тимошенко С. П. // – Киев, "Наукова думка", – 1972.

33. Турковский, С.Б. Физкультурно-оздоровительные комплексы Москвы с деревянными стропильными системами покрытий / С. Б. Турковский, А.А. Погорельцев, В.Г. Николаев // строительные материалы, оборудование, технологии 21века, –2008. – №8, – С 70-72.

34. Цагарели, З. В. Новый тип растянутого стыка и узлового соединения ферм из бамбуковых элементов для строительных конструкций / З. В. Цагарели. // – Тбилиси, – 1957.

35. Черных, А. Г. Технология защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов / А. Г. Черных // Учебное пособие. – Братск, – 1996.

36. Черных, А. Г. Исследование соединений деревянных конструкций из «ULTRALAM» на цилиндрических нагелях в зависимости от комбинации соединяемых элементов / А. Г. Черных // Отчет о научно-исследовательской работе, – СПбГАСУ, – 2011.

37. Шмидт, А. Б. Унифицированные клеефанерные элементы (УКФ-элементы) как несущие конструкции покрытия зданий и сооружений / А. Б. Шмидт // Известия вузов, Строительство. – 1998. – № 1. – С. 18-21.

38. Шимкин, Ф. И. Изменение физико-механических свойств древесины бамбука Мосо с целью предотвращения ее растрескивания / Ф. И. Шимкин // диссертация, Воронеж, – 1987.

39. Яо, Вэй, Применение бамбука в строительстве / Вэй Яо, А. Б. Шмидт // Вестник гражданских инженеров. – СПб, – 2013. – №2(37), – С71-74.

40. Яо, Вэй. Исследование узлов сопряжения элементов из бамбука в строительных стержневых конструкциях / Вэй Яо // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – №31 (50). – С. 70 -75.

41. Яо, Вэй. Экспериментальные исследования элементов узлового соединения стержневой конструкции из бамбука / Вэй Яо, А. Б. Шмидт // Вестник гражданских инженеров. – СПб, – 2013, – №6(47), – С. 77-83.

Литература на иностранных языках

42. 王新友. 环境材料与绿色建材//建筑材料学报，–上海，– 1998. – №8.(Ван, СиньЮ. Экологически чистые и натуральные строительные материалы / СиньЮ Ван // Вестник строительных материалов. – Шанхай. – 1998. – №8.)

43. 蒋高明, 李勇. 中国森林现状//百科知识, –北京，—2011. – №6. (Цзян, Гаомин Современная ситуация с лесным хозяйством Китая / Гаомин Цзян, Юн Ли // Энциклопедическое знание, – Пекин. – 2011. – №6.)

44. 江泽慧. 世界竹藤 //中国林业出版社，– 北京，– 2008.

Цзян, Цзэхуэй. Бамбук и ротанг в мире / Цзэхуэй Цзян. // Китайского лесного издательство, – Пекин. – 2008.

45. 李慧,张玉坤. 生态建筑材料竹子浅析//建筑科学, –北京，– 2007. –№8.(Ли, Хуэй Краткий анализ бамбука как экологического строительного материала / Хуэй Ли, Юйкун Чжан // Архитектура, – Пекин. – 2007. – №8.)

46. 蒋建新,扬中开,朱莉伟,史丽敏,闫立杰. 竹纤维结构及其性能研究//林业大学学报，–北京，–2008.–№1.(Цзян, Цзяньсинь Исследование бамбукового волокна и его свойств / Цзяньсинь Цзян, Чжункай Ян, Ливэй Чжу, Лимин Ши, Лицзе Янь // Вестник Лесохозяйственного университета, – Пекин. – 2008. – №1.)

47. 冼杏娟. 竹材的微观结构及其力学性能的关系//–北京，– 1990. – №3.(Сянь, Синцзюань. Зависимость механических свойств бамбука от его микроструктуры / Синцзюань Сянь // –Пекин. – 1990. – №3.)

48. 孙宁，张立衫. 竹子的力学特性//力学与实践，–北京，–1997.(Сун, Нин, Чжан, Лишань. Механические свойства бамбука / Нин Сун, Лишань Чжан // Механика и практика, – Пекин. – 1997.)

49, 黄盛霞. 竹材的构造与力学行为的关系//–安徽，–2007. (Хуан, Шэнся. Зависимость механических свойств бамбука от его структуры / Шэнся Хуан. – Аньхой. – 2007.)

50. 王恺. 竹材在土木建筑工程上的应用//竹子研究汇刊,–北京，–1990.–№ 1.(Ван, Кай. Применение бамбуковых материалов в гражданском строительстве / Кай Ван // Исследование бамбука, – Пекин. –1990. – №1.)

51. 印度尼西亚巴里岛的竹子学校//世界竹藤通讯，–2011，–№（4），14-15p.(Индонезийский институт бамбука на Бали // информационная бюллетень международной ассоциации охраны бамбука и ротанга(INBAR) , – 2011. – №(4), – С.14-15)

52. 王正，郭文静. 新型竹建筑材料的开发利用 //世界竹藤通迅，–北京，–2003. –№1.(Ван, Чжэн Разработка и применение новых видов строительных материалов из бамбука / Чжэн Ван, Вэньцзин Го // Информационная бюллетень международной ассоциации охраны бамбука и ротанга (INBAR), – Пекин. – 2003. – №1.)

53. 柏文峰，吕珏. 傣族民居的保护与振兴//工业建筑，–北京，–2007，–№3, –P738-411.(Бай, Вэньфэн Защита и возрождение народности Дай / Вэньфэн Бай, Цзюэ Лю // Промышленная архитектура. – Пекин. – 2007. – №37,– С. 38–411.)

54. 谢浩. 竹材在建筑中的使用考察//中国住宅设施，–广东，–2010.(Се, Хао. Исследование применения бамбука в строительстве / Хао Се // Жилищная инфраструктура Китая. – Гуандун. – 2010.)

55. 张楠. 竹子建筑节点构造分析及改进//科学技术与工程,–昆明，–2008. –№18. (Чжан, Нань. Анализ и усовершенствование узловых соединений в строительстве из бамбука / Нань Чжан // Наука и технологии, –Кунмин. –2008. –№8.)

56. 张楠，柏文峰. 原竹建筑节点构造分析及改进//科学技术与工程，–北京，–2008. –№18，P36–39.(Чжан, Нань Архитектурный анализ и усовершенствование узловых соединений в строительстве из необработанного бамбука / Нань Чжан, Вэнь фэн Бай. // Наука и технологии, – Пекин. – 2008. – №18, –С. 36-39.)

57. 车慎思. 毛竹细观结构与力学性能试验研究//硕士论文, –南京, –2011 年，3 月 (Чэ, Шэнсы. Опытное исследование микроструктуры бамбука и его механических свойств / Шэнсы Чэ // Магистерская диссертация, – Нанькин. – март 2001.)

58. 付建勋，李京社，汪春雷，朱经涛. 5 号钢杨氏弹性模量的研究//材料导报, –北京,–2009.–№9.(Фу, Цзяньсюнь, Ли, Циншэ, Ван, Чуньлэй, Чжу, Цзинтао. Исследование модуля упругости(модуля Юнга) стали 5 / Цзяньсюнь Фу, Циншэ Ли, Чуньлэй Ван, Цзинтао Чжу // Обзор материалов, – Пекин. – 2009. – № 9.)

59. 许斌，蒋身学. 竹木复合层积材横纹静摩擦系数的研究//林业技术开发, –南京,–2000.–№6.(Сю, Бинь Исследование коэффициента трения при покое вдоль волокон древесно-бамбукового композитного ламината / Бинь Сю, Шэньсюэ Цзян // Технические разработки лесохозяйства, – Нанкин. – 2000. – №6.)

60. 竺肇华. 中国热带地区竹藤发展//中国林业出版社,–北京,–2001.(Чжу, Чжаохуа. Развитие посадок бамбука и ротанга в тропическом поясе Китая / Чжаохуа Чжу // Издательство Лесохозяйство Китая, – Пекин. 2001.)

61. 张丹，王戈，张文福，程海涛. 毛竹圆竹力学性能的研究//中国林业科技大学学报，–北京, –2012.–№7.(Чжан, Дань Исследование механических свойств бамбука Мосо / Дань Чжан, Гэ Ван, Вэньфу Чжан, Хайтао Чэн // Вестник научно-технического университета лесного хозяйства Китая, – Пекин. – 2012. – №7.)

62. 杨运民，彭向和，陈裕泽，尹益辉，陈刚. 温升率对 LY12 铝合金拉伸响应的影响//金属学报，–重庆, –2000. –№09.(Ян, Юньминь Влияние коэффициента повышения температуры на растяжение алюминиевого сплава LY12 / Юньминь Ян, Сянхэ Пэн, Юцзэ Чэнь, Ихуэй Инь, Ган Чэнь // Вестник металловедения, – Чунцин. – 2000. – № 09.)

63. 李浩. CAD / CAM / CAE 工程应用丛书：ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通 //机械工业出版社，–北京，–2014. (Ли, Хао. CAD/ CAM/ CAE приложений инженерных серии: элементного анализа ANSYS 15.0 от входа к хозяину/ Хао Ли // Издательский дом механическая промышленность, – Пекин. –2014.)

64. 马库斯. 海因斯多夫. 设计结合自然：马库斯.海因斯多夫的竹子建筑（The Bamboo Architecture Markus Heinsdorff Design with Nature ）//辽宁科学技术出版社，–沈阳，–2010. （Маркус, Хейнсдорф. Бамбуковая архитектура, Маркус Хейнсдорф, Дизайн с природой / Хейнсдорф Маркус // Ляонин науки и техники. – Шэньян. – 2010. ）

65. 钱海滨，薛永森，田彦军 土地资源合理利用评价研究综述 //中国农业大学，–北京：–2001，– №2(Цянь, Хайбинь Рациональное использование земельных ресурсов: исследовательский обзор / Хайбинь Цянь, Юнсэнь Сюэ, Яньцзюнь Тянь // Китайский сельскохозяйственный университет. – Пекин. –2001., – № 2.）

66. 王敏. 中国的环境污染与经济增长 //中国人民大学，–北京，–2015，–№2.（Ван, Минь Загрязнение окружающей среды и экономический рост в Китае / Минь Ван, Ин Хуан // Китайский народный университет. – Пекин, – 2015., – № 2.）

67. 杨红强 中国木材资源安全论 //人民出版社，北京，–2012.（Ян, Хунцян О безопасности лесных ресурсов Китая / Хунцян Ян, Ин Не // Издательство Жэньминь. – Пекин, – 2012.）

68. 爱德华. 布鲁托 竹材建筑与设计集成 //江苏凤凰科学技术出版社，–2014.（Эдуард, Брото Интеграция бамбуковой архитектуры и дизайна / Брото Эдуард, Чжэньдун Чжан // Научно-техническое издательство Феникс провинции Цзянсу. –Цзянсу. – 2012.）

69. 马建峰 基于竹子微观结构的柱状结构仿生设计 //机械设计出版社，北京，–2008，–№12.（Ма, Цзяньфэн Бионический дизайн столбчатой структуры на основании микроскопического строения бамбука / Цзяньфэн Ма, Уи Чэнь, Линь Чжао, Дахай Чжао // Издательство Механическое Проектирование, –Пекин. – 2012., – №12.）

70. 叶克林. 竹材特性及竹材的工业利用 / 叶克林，木材工业， 1994 17（2）：33-36（Е, Кэлинь Особенности бамбука и промышленное использование бамбука / Келинь Е // Лесная промышленность, – 1994., – №17(2). – 33-36с. ）

71. 张晓东. 竹材碳化新工艺研究 / 张晓东，朱一辛，竹子研究汇刊，1996，23（6）：16-17（Чжан, Сяодун Исследование новых технологий карбонизации бамбука / Сяодун Чжан, Исинь Чжу // Исследования бамбука, – 1996., – №23(6). – 16-17с.）

72. 曾其蕴. 竹节对竹材力学强度影响的研究 / 曾其蕴，林业科学， 1992 28（3）：247-251（Цзэн, Циюн Исследование влияния бамбуковых узлов на механическую прочность бамбука / Циюн Цзэн // Наука и лесное хозяйство наука, – 1992., – №28(3). – 247-251с.）

73. 陈国 现代竹结构住宅设计及工程应用 / 陈国，肖岩，工业建筑，2011，41（4）：66-70.（Чэнь, Го Проектирование жилых объектов из современных бамбуковых конструкций и их инженерное применение / Го Чэнь, Ян Сяо // Промышленная архитектура, – 2011., – №41(4). – 66-70с.）

74.. 黄桂秋 竹材加固的力学性能试验研究分析 / 黄桂秋， 上海交通大学，2013.（Хуан, Гуйцю Исследование и анализ механических испытаний бамбуковых конструкций / Гуйцю Хуан // Шанхайский университет, – 2013.）

75. 费本华 竹结构连接件的承载能力 / 费本华，张东升，南京林业大学学报，2008 32（2）：67-70.（Фэй, Бэньхуа Несущая способность соединительных элементов бамбуковых конструкций / Бэньхуа Фэй, Дуншэн Чжан // Лесотехнический университет, – Нанкин, – 2008., – №32(2). – 66-70с.）

76. 曾竟谊 关于现代竹结构动力性能的试验研究 / 湖南，湖南大学，2011.（Цзэн, Цзини Экспериментальное исследование динамических характеристик современных конструкций из бамбука / Цзини Цзэн // Университета Хунань, –Хунань, – 2011.）

77. 郝文化， ANSYS 土木工程运用实例, 中国水利水电出版社，2005 年，P - 352 页。（Хао, Вэньхуа Примеры использования ANSYS в гражданском строительстве / Вэньхуа Хао // издательство: Гидроэнергетика Китая, – 2005., – С.352.）

78. 徐鹤山， ANSYS 在建筑工程中的运用/机械工业出版社，2005 年， P - 250 页。（Сюй, Хэшань Использование ANSYS в архитектурном строительстве / Хэшань Сюй // издательство: Механическая промышленность, – 2005., – С.250.）

79. 石江辉 江南传统民居的生态材料及其使用考察/浙江万里学院学报，2005 18（3）：53-56 （Ши, Цзянхуэй Экологичные материалы традиционного жилищного строительства Цзяннаня и обзор их применения / Цзянхуэй Ши // Университет Ваньли провинции Чжэцзян, – 2005., – №18(3). – 53-56с.）

80. 郭起荣 毛竹学名百年之争 / 郭起荣，杨光耀，杜天真，施建敏，世界竹藤通讯， 2006 01.（Го, Цижун Столетние споры о научном названии бамбука Моso / Цижун Го, Гуаняо Ян, Тяньчжэнь Ду, Цзяньминь Ши // Связь бамбука и ротанга в мире, – 2006., – №1.）

81. Clito, Afonso. Solar Chimneys: Simulation and Experiment / Afonso Clito, Oiverira Armando // Energy and Bulidings. – 2000. – №32 (1). –P. 71-79.

82. Haas, EM. Milieubeo ordeling (in Dutch). In: NIBE. Basiswerk Duurzaam & Gezond Bouwen – Deleidraad bij het realiseren vanduurzame en gezonde woning / EM Haas // en utiliteitsbouw (Suppl. 4). Naarden, Netherlands: NIBE Publishing. –February 2003.

83. NIBE. Classificatietabel. In: NIBE. Basiswerk Duurzaam & Gezond Bouwen – Deleidraad bij het realiseren van duurzameen gezonde woning – en utiliteitsbouw (Suppl. 4). Naarden, Netherlands: NIBE Publishing, – February 2003.

84. Van derLugt P. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. / P. van derLugt // The Netherlands. Construction and Building Materials. –2006 (20), – P. 648-656.

85. Van der Lugt P., van den Dobbelsteen A. Bamboo as an alternative building material in Western Europe – A study of the sustainability costs and bottlenecks of the use of bamboo (products) in Western Europe / P.van der Lugt, A. van den Dobbelsteen // Jour-

nal of Bamboo and Rattan. –2003. – №2(3). –P. 205-23.

86. Amada. Shige Yasu, Nagase Yukito, Analysis of large deflection of timber as functionally graded material / Yasu Shige, Yukito Nagase // Japan, Society of Mechanical Engineering, –1996. №7, –P. 223-229.

87. Simone, Velez, Grow Your Own House / Velez Simone // Bilingual edition, 2000.

88. Marcelo, Villegas. New Bamboo: Bamboo architecture and design. / Villegas Marcelo // Villegas Editores, –2003.

89. Heinrich, Kries M. Sustainability. In: von Vegesack A, / M Kries Heinrich // editors. Grow your own house. Balingen, –Germany: Vitra Design Museum, – 2000. –P. 152.

90. Markus, Heinsdorff, Markus Heinsdorff—design with nature the bamboo architecture / Heinsdorff Markus // –Germany. –2010.

91. Kries, Mateo, Grow Your Own House: Simon Velez and Bamboo Architecture / Mateo Kries, Jean Dethier, Klaus Steffens // Vitra Design Museum. –2002.

92. Dixon, P. G. The structure and mechanics of Moso bamboo material / P. G. Dixon, L. J. Gibson, – 2014.

93. Marco, Fabiani Bamboo structures: Italian culms as likely resource for green buildings / Fabiani Marco, Davi Fabrizio, Mentrasti Lando // Doctoral school on engineering sciences, – 2014.

Строительные нормы и правила

94. ГОСТ 11262–80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение, – Москва.: изд-во стандартов, –1980.

95. ГОСТ 380–2005 Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки, – Меж-

государственный стандарт, – Москва.: изд-во стандартов, –2008.

96. ГОСТ 1050–88 Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия. –Москва.: изд-во стандартов, –1996.

97. ГОСТ Р 54257–2010. Надежность строительных конструкций. Основные положения, –М.: изд-во стандартов, –2011.

98. GB/T 15780–1995 竹材物理力学性质试验方法，中国国际标准，(GB/T 15780. 1995– Физические и механические свойства бамбука. Методы испытаний, – Пекин.: Китайский национальный стандарт, –1995.)

99. JG/T 199–2007 建筑用竹材物理力学性能试验方法，中国国际标准，2008 (JG/T 199–2007 Методы испытаний физико-механических свойств бамбуковых материалов, используемых в строительстве, –Пекин: Китайский национальный стандарт. –2008.)

100. GB/T 2690–2000 毛竹材（Bamboo timber），中国标准出版社，北京，2000 年 (GB/T 2690-2000 бамбуковый материал, –Пекин.: Издательство Промышленные стандарты Китая. –2000.)

101. JGJ 75. 1–91 钢网架螺栓球节点，中国行业标准，北京，1991

(JGJ 75. 1-91 Болтовые узловые соединения каркаса металлических структурных конструкций, – Пекин: Промышленные стандарты Китая. –1991.)

102. GB/T 16939–1997 钢网架螺栓球节点用高强螺栓，北京，1998

(GB/T 16939–1997 Применение высокопрочных болтов в болтовых узловых соединениях каркаса металлических структурных конструкций, –Пекин.: Промышленные стандарты Китая. –1998.)

Электронные ресурсы

103. 中国木材进口存在的问题与责任，百度文库

(Существующие проблемы и обязательства импорта древесины в Китае // электронная библиотека сайта Бай Ду. [Электронный ресурс]) — Адрес доступа: http://wenku.baidu.com/link?url=th81Jg33J6Z1h98ro74nDtKSBwbjX-iosUEl7ORKDNPjvK_YejTNGYBqA6CGJOFfaUoMRCmjpIbcxLAwT3wN1GjMC8e-P65SEJfOdbgg15e

104. 竹材资源国内外现状，竹藤中心，–2007 年 5 月 21 日

(Современное состояние мировых запасов бамбука // Центр бамбука и ротанга, –21 мая 2007 года. [Электронный ресурс]) –Адрес доступа: http://www.forestry.gov.cn/portal/ztzx/s/1244/content-136248.html

105. 竹结构材料在建筑领域的前景， 百度文库

(Перспективы бамбуковых материалов в строительстве // электронная библиотека сайта Бай Ду. [Электронный ресурс]) –Адрес доступа: http://wenku.baidu.com/link?url=J4xgT5DtYdlBsVTzPYG6n4rLx36B-wiV_YvlM7RHWevMjB09FQrmTEe6cJERr4OAlLQEremBd5I4UBAw1PjAcZ7gV04kzF06iUOt6omKrk_

106. 竹结构的应用，百度文库

(Применение конструкций из бамбука // электронная библиотека сайта Бай Ду. [Электронный ресурс]) – Адрес доступа: http://wenku.baidu.com/link?url=d3Lk3YAO4fL2LkHRNu6JR8IqNcd0sWet3B3-3FDWlT4UZFfodUd3mSdWp9WmkPwlalbfrDOy8MLDHX8PmWmiaAHf3Q-GufhmnPrLSs2-cV3)

107. 竹子的开发与利用，百度文库

(Разработка и применение бамбука // электронная библиотека сайта Бай Ду. [Электронный ресурс]) – Адрес доступа:

http://wenku.baidu.com/link?url=i9n_w218Y72aYGxfUHyqPZsrHW6478aLKyCA_7zRcKQpFoeFLbhwdMZOlTrRshHvR5mmYEr4GG15M8wWm3kus_khGRJ72UMBiIL1FtJ5ZRS

108. 竹子的物理属性，百度文库

(Физические свойства бамбука // электронная библиотека сайта Бай Ду. [Электронный ресурс]) – Адрес доступа:

http://wenku.baidu.com/link?url=6c76lmZNUV0AT2_yJcPUMynBIiy3qhIaYe0b_BFY5CLON5cpnXvELsiH8p778xxeM7XhGHf-lU_QW9WPOHor_sgTE5b7IC2GEHtzEAQg783

109. 全竹屋，百度文库

(Здания, полностью созданные из бамбука // электронная библиотека сайта Бай Ду. [Электронный ресурс]) – Адрес доступа:

http://wenku.baidu.com/link?url=AnAuMRu3Zp8WistAe_cR9ovnJoPAtteFnec9yI4Qclo35DMVm2REoq8czguVmrae7C_wOOALwoPilaeBX4YokG70s3ueogRfmESFdcF0m37

110.Свойства стали 45 [Электронный ресурс], – Адрес доступа:

http://gost-tu.ucoz.ru/publ/chjornye_metally/prochie_stali/svojstva_stali_st45/9-1-0-17

111. 毛竹的用途和经济实用，百度文库(Сферы применения и экономическая польза бамбука // электронная библиотека сайта Бай Ду. [Электронный ресурс]) – Адрес доступа:

http://wenku.baidu.com/link?url=gH4rPE_e4ndWR5kX5j68NgvSKBUSfyxVH8y2wm765IZ6gh9RJhzhEpM2RpyuyQDCBfLmzpaxwlBo_sCa4PNHeww6WuFhYBb_KZvmuhYfrv_

112. 聚乙烯拉伸性能试验影响因素的分析，百度文库 (Анализ влияющих факторов при испытаниях полиэтилена на растяжение // электронная библиотека сайта Бай Ду. [Электронный ресурс]) – Адрес доступа: http://wenku.baidu.com/link?url=RQJ2kh5wku9DfQQsT7K8khBn2GD_V9sefREP0HgsZVd61RIVuvKa7ve9lTUFz_MJsgRbAGtJsjzN2ILz9faFjfkrClfIjC3qHdLRLRZ_qqG

113. 国际竹藤组织 (INBAR), 百度文库 (Международная сеть по бамбука и ротанга // электронная библиотека сайта Бай Ду. [Электронный ресурс]) – Адрес доступа: http://baike.baidu.com/link?url=E3i4IgaCIxsp53c41BsRSH8IS5TM-Gpu_yBYuyi7JdK2aMV0h9o_Sm3jN6BoLwblHPxyHvDk9njfU9iRUqjdbq

114. 竹子建筑，百度文库 (Бамбуковые здание // электронная библиотека сайта Бай Ду.[Электронный ресурс]) – Адрес доступа: http://wenku.baidu.com/link?url=nGwTusjZBen_TgOlA6uuZ3NZljX7I5ll_8yRuDEsZyIuVZ8GgXd3th1gb5-qtQsM3vEXQGuz8YebnrbHW1o78C2mFebQ39uiMwg3E-l9N9S

115. 竹板材的优点，百度文库 （Преимущества бамбуковых материалов // электронная библиотека сайта Бай Ду. [Электронный ресурс]) – Адрес доступа: http://wenku.baidu.com/link?url=lmVjZdgslzG46P1Jzee7dZ1ASZrViW0OZ4JILf6f3S_zD0Rl9AiK53KFnvUR3eBaoDetZ1lzVxIsHzS9AtN_EgsPXZ4cHsBwjfgkMbjXg77

116. 竹子深加工，百度文库（Глубокая обработка бамбука // электронная библиотека сайта Бай Ду. [Электронный ресурс]) – Адрес доступа: http://wenku.baidu.com/link?url=SdxOxFc7_WjKz2vBzZ7wpxLmwXm_PJihMio_e09YyJMxZYEg3Py0IrYKJ4kYBizUrT9R56ue7SqnZ1M3_D6EDRKvn3XrwOryo_hwpUkHbpm

117. 傣家的竹楼，百度文库（Бамбуковые дома дайцев // электронная библиотека сайта Бай Ду. [Электронный ресурс]) – Адрес доступа: http://wenku.baidu.com/link?url=aKrTKUVvpcCT25B7XDHwX1JMtURym85kiNpLNOXIDomHWiJ3xoDKREWz2lw-PMY3d0p165DYE3bKDLib22yAHFD3C43QVDww_HN50lxwdEq

118. ANSYS 15.0 Help. (2014 a). "ANSYS 15.0 Help, Basic ANSYS Guide.".

119. ANSYS 15.0 Help. (2014 b). "ANSYS 15.0 Help, Mechanical APDL, Element Reference. ".

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Содержание научных экспериментальных исследований

1. Эксперимент №. 1– Испытания на растяжение бамбука Моso (с суставами и без суставов);

2. Эксперимент №. 2 – Испытания на сжатие по вдоль волокон бамбука Моso;

3. Эксперимент №. 3 – Испытание на сжатие поперек волокон бамбука Моso;

4. Эксперимент №.4 – Испытание на растяжение фторопластовой трубы;

5. Эксперимент №.5 – Испытание на растяжение полиэтилена;

6. Эксперимент №.6 – Определение резки бамбука Моso для сборки узла (формы резки конца бамбука на 6, 8, 10 и 12 зубцов);

7. Эксперимент №.7 – Испытание узла (второй вариант) с коническим сердечником из фибробетона;

8. Эксперимент №.8 – Испытание узла (второй вариант) со стальным коническим сердечником;

9. Эксперимент №.9 – Испытание алюминиевой узловой части бамбука (третий вариант) с диаметром 56 – 57 мм на растяжение;

10. Эксперимент №.10 – Испытание стальной узловой части бамбука (третий вариант) с диаметром 100 – 125 мм на растяжение;

11. Эксперимент №.11 – Испытание конической стальной узловой части бамбука (третий вариант) с диаметром 100 – 125 мм на сжатие;

12. Эксперимент №.12 – Испытание стальной узловой части бамбука (третий вариант) с диаметром 100–125 мм на разрушение.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Акт о внедрении

天津市元太系统工程技术有限公司
Tianjin Yuan Tai Systems Engineering Technology Co., Ltd.

实践应用证明

应俄罗斯圣彼得堡国立建筑工程大学博士研究生姚伟的委托，特对该生博士论文研究的《新型竹螺栓球型节点连接方式》成果在“天津市元太系统工程技术有限公司”进行了实践应用评定。

为了证明节点的实用性和可靠性我公司对新型竹螺栓球型节点连接方式进行了实际应用。在结构搭建应用过程中进行了一系列的测评。

新型竹节点连接方式在实际应用中体现了以下优点：

- 新型竹节点连接在安装和拆卸时体现了快捷、方便的特点；
- 搭建后整体的结构强度符合现有设计要求；
- 新型竹节点连接在日常维护方面更加简便；
- 由于金属连接件可反复使用降低了整体结构的造价；
- 该新型竹节点大量的使用将会解决中国现有木材资源匮乏的现状，能够使竹子这种可再生资源材料在建筑方面得到广泛应用；

对于姚伟所研究的新型竹螺栓球型节点连接方式测评结果非常令人满意。测试过程中对新型节点连接方式进行了临时房屋框架的搭建，小型的空间网架结构搭建，桁架结构搭建等。另一面，对于新型节点能进一步在建筑结构中使用，还需要长时间及更系统标准的测试，因此我公司认为新型竹节点连接方式在竹子结构建筑中有广泛使用价值。

天津市元太系统工程技术有限公司

项目总经理：姚铁平

2015 年 8 月 26 日

地址：天津市南开区红旗南路新华园 A 楼 3 号，邮编：300191
电话：022-23790567，传真：022-23790868
邮箱：yaotieping@126.com

ООО «Тяньцзиньская Юаньтай системно-инженерная и технологическая компания»

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

По обращению аспиранта Санкт-петербургского государственного архитектурно-строительного университета (Россия) Яо Вэя, в ООО «Тяньцзиньский Юаньтай системно-инженерная и технологическая компания» была проведена оценка практических результатов его диссертации «**Метод нового типа бамбуковых узловых болтовых соединений**».

Для того, чтобы подтвердить практичность и надежность соединения, наша компания провела практическое применение нового типа узловых болтовых соединений в бамбуковой архитектуре. Мы провели ряд тестов в процессе применения архитектурных конструкций.

Преимущества нового типа соединений узлов в бамбуковой архитектуре, выявленные в практическом применении:

- Удобный и быстрый монтаж, демонтаж узловых соединений нового типа;
- Прочность конструкции после сборки соответствует существующим проектным требованиям;
- Ежедневное обслуживание узловых соединений нового типа более легкое;
- Более низкая ценовая стоимость конструкции за счет возможности повторного использования металлических деталей;
- Использование узловых соединений нового типа в бамбуковой архитектуре в дальнейшем может способствовать решению существующей проблемы нехватки лесных ресурсов в Китае. Являясь возобновляемым ресурсным материалом, бамбук сможет получить более широкое применение в архитектуре;

Результаты тестов для исследованного Яо Вэем метода нового типа узловых болтовых соединений являются очень удовлетворительными. В процессе тестирования метода нового типа узловых болтовых соединений были собраны такие временные архитектурные конструкции, как архитектурный каркас, подставка в виде сетки, ферма и др.

С другой стороны, для возможности дальнейшего использования узловых соединений нового типа в архитектурном строительстве необходимо много времени проведение более систематизированных стандартных испытаний. Поэтому наша компания считает, что метод новый тип узловых соединений имеет для бамбуковой архитектуры ценность практического использования.

Тяньцзиньский Юаньтай системно-инженерная и технологическая компания

Круглая печать: Тяньцзиньский Юаньтай системно-инженерная и технологическая компания

Генеральный директор проекта (подпись): Яо Тепин

Адрес: г. Тяньцзинь, район Нанкай, ул. Хунци Наньлу, Синьхуаюань, д. А, корпус 3.

Индекс: 300191

Тел: 022-23790567, Факс: 022-23790868 Email: yaotieping@126.com

*Я, дипломированный переводчик, **Юй Фэнин**, владеющий русским , английским и китайским языками, подтверждаю, что выполненный мною перевод приложенного документа является правильным, точным и полным.*

Юй Фэнин

САНКТ-

Санкт-