

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Шмидт Александр Борисович

Официальные оппоненты: **Лабудин Борис Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический)
федеральный университет
им. М.В. Ломоносова» (г. Архангельск),
кафедра инженерных конструкций
и архитектуры, профессор;

Крицин Алексей Владимирович,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВПО
«Нижегородский государственный архитек-
турно-строительный университет», кафедра
железобетонных, каменных и деревянных кон-
струкций, заведующий

Ведущая организация: **ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск**

Защита диссертации состоится «22» декабря 2015 г. в 16⁰⁰ часов на засе-
дании диссертационного совета Д **212.223.03** при ФГБОУ ВПО «Санкт-
Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по
адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4, зал заседаний
(ауд. 219 главного корпуса).

Телефон/факс: (812) 316-58-72, Email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-
строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Кондратьева Лидия Никитовна

I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 вырубki 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, ремонтпригодность 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 Вэньцин, 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. Дolidзе, 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 6 групп:

- соединения, перевязанные жгутами (веревками);
- прямые соединения бамбуковых элементов нагелями и болтами;
- соединения «выпиловкой» по методу «Цюань Доу»;
- узлы, усиленные цементным раствором;
- узлы с металлическими элементами;
- узлы с металлическими накладками и прокладками.

Указанные выше недостатки бамбуковых соединений обуславливают 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 решетчатых строительных конструкций, лишенного недостатков вышеуказанных узлов и удовлетворяющего следующим требованиям:

- иметь несущую способность и деформативность узла адекватной и равносильной элементу из бамбука;
- обладать простотой сборки-разборки и ремонтпригодностью;
- 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 проведенного 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 «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 испытания создавать строительные несущие конструкции из бамбука с прогнозируемой несущей способностью, надежностью и высокой эффективностью 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 «ремонтпригодностью» 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.

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 соответствует цели диссертации – добиться сборно-разборности узла и его ремонтпригодности.

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.

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработано новое узловое соединение бамбуковых элементов несущей конструкции, в котором концевая часть бамбука в форме конуса, полученного из лепестков «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».

В процессе исследований установлено, что в силу своих размеров, механических показателей и больших в Китае ареалов произрастания, наиболее подходящим для строительных конструкций оказался бамбук вида «Мосо».

Опытным путем доказано, что наличие в бамбуковом стебле так называемых «суставов» не снижает прочности бамбукового элемента конструкции при сжатии и растяжении вдоль стержня.

На основе анализа существующих в мире конструкций узлов бамбуковых стволов была разработана новая конструкция узлового соединения, в основу которого положена впервые выдвинутая идея обжатия стебля бамбука стальными элементами (внутренним и внешним конусами). Новое соединение условно названо «Узел СПбГАСУ»;

В ходе изучения бамбука замечено, что цилиндрические стволы бамбука близки к стальным трубам и по внешнему виду, и по способу использования в конструкциях. Поэтому было решено выполнять бамбуковые конструктивные соединения по аналогии с проектами стальных узловых соединений. Смысл конструктивного решения узла состоит в том, что бамбуковые стволы крепятся к общему соединительному элементу (стальному шару) с помощью концевых болтов. Болтовое соединение со стальным соединительным шаром, применяемое для стальных конструкций, в настоящее время имеет уже отработанную технологию со строго определенными стандартами исполнения. Такой способ разработан В.К. Файбишенко и другими конструкторами «системы МАРХИ» (рисунок 1).

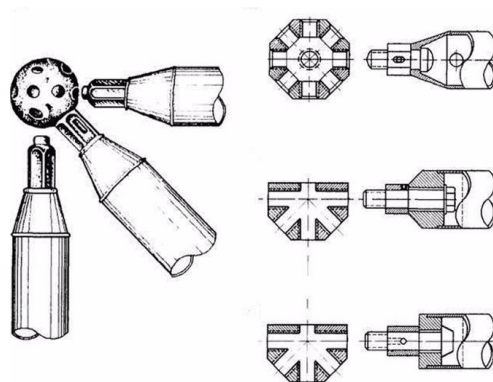
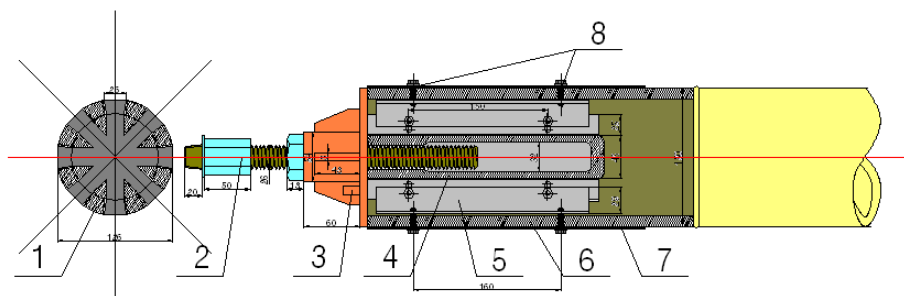


Рисунок 1 – Узловое соединение «система МАРХИ»

Таким образом, задача разработки нового узла сводится к разработке конструктивного решения присоединения отдельного бамбукового стержня к стальному соединительному шару. Рассмотрено 3 варианта нового узла.

Первый вариант

В первом варианте узла использованы металлические соединительные элементы, вмонтированные в бамбук. Соединение между металлическими элементами и бамбуком обеспечивается эпоксидным клеем и крепежными винтами (рисунок 2).

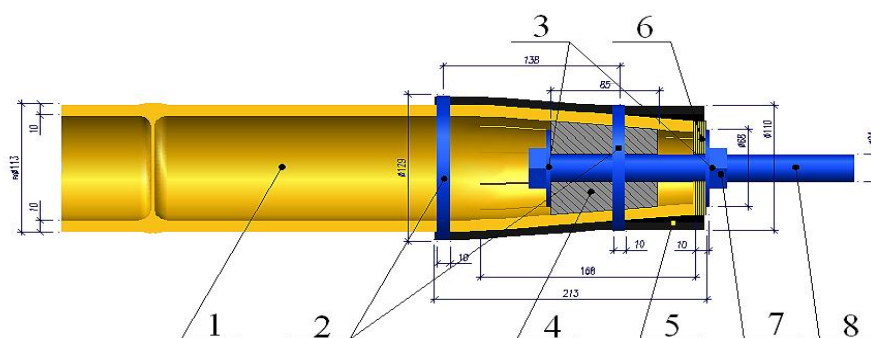


- 1 – шар-коннектор «система МАРХИ»; 2 – регулируемый винт; 3 – эпоксидная заливка; 4 – металлическое крепление; 5 – регулирующее крепление; 6 – бамбуковый ствол; 7 – труба со стенкой из углеродных волокон; 8 – крепежные винты.

Рисунок 2 – Первый вариант конструктивного решения узла

С учетом естественных отличий поперечного сечения бамбука от идеальной кольцевой формы на внутреннем сердечнике 4 предполагалось установить регулируемые металлические пластины 5, чтобы уйти от некруглого сечения бамбука. С внешней стороны бамбука установлены хомуты, для обеспечения прочности на сдвиг при соединении концов бамбука с металлическими частями.

Второй вариант



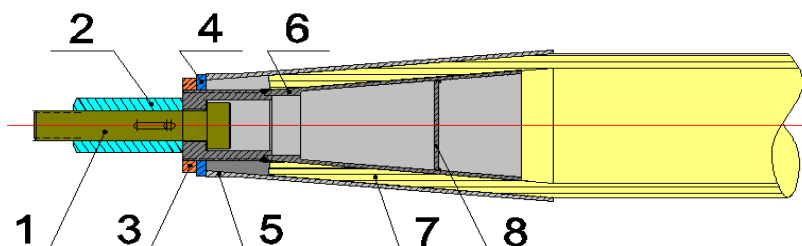
- 1 – бамбук; 2 – хомуты стяжные; 3 – шайба; 4 – конус из стали (или бетона); 5 – труба полиэтиленовая; 6 – крышка-шайба упорная; 7 – гайка; 8 – болт.

Рисунок 3 – Второй вариант конструктивного решения узла

Второй вариант применим, главным образом, к узловым соединениям на механической основе (рисунок 3). В данном случае устраняется необходимость применения жидко-твердеющих составов (эпоксидных клеев или цементных растворов) и сложных металлических внутренних связей. Конец ствола бамбука 1 разделен пропилами на несколько зубцов, способных принимать конусную

форму с требуемым углом схождения (по принципу «цангового соединения»). Концевая часть бамбука охватывает внутренний конус 4 (из бетона или стали) под углом этого конуса, сквозь которого вставлен болт 8 с резьбой и внешней гайкой 7, прижимающей упорную шайбу 6. Снаружи устанавливается полиэтиленовая труба 5, которая крепится двумя хомутами 2 на трубе

Третий вариант («Узел СПбГАСУ»)



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 4 – Третий вариант конструктивного решения узла

Третий вариант (рисунок 4) является усовершенствованием второго. На концах бамбука также делаются треугольные пропилы, для получения «лепестков», способных образовывать форму конуса 7. Внутри бамбука установлен металлический конус 6 (с резьбой в узкой части под внешнюю упорную гайку 3), сквозь который проходит болт 1 с резьбой на конце для ввинчивания в шарконнектор «системы МАРХИ». Гайка 3 устанавливается на упорную шайбу 4, в которую упирается внешний металлический конус. На болт 1 сверху устанавливается шестигранная гайка 2, закрепляющая болт в шаре «системы МАРХИ».

Принцип работы конструкции заключается в следующем:

При растягивающих усилиях внутренний конус втягивается во внешний, тем самым обжимая образуемый конус бамбука. При увеличении этого обжатия растут силы контактного трения, прочно удерживающие бамбук в соединении от вытягивания из металлических конусов.

При сжимающих усилиях обжатый конус бамбука упирается в упорную гайку, и тем самым узел воспринимает большие сжимающие напряжения.

В ходе исследований третий вариант соединения, условно названный «Узел СПбГАСУ», признан наиболее рациональным, так как он обеспечивает наибольшую надежность, несущую способность, простоту изготовления и ремонтпригодность элементов узла.

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.

Анализ работы при растяжении

Растягивающая нагрузка в рассматриваемом узловом соединении от шара-коннектора передается на болт и далее на внутренний конус, который втягивается во внешний конус и обеспечивает совместно с ним эффективное и прочное соединение с конусом ствола бамбука за счет их взаимного обжатия (рисунок 5).

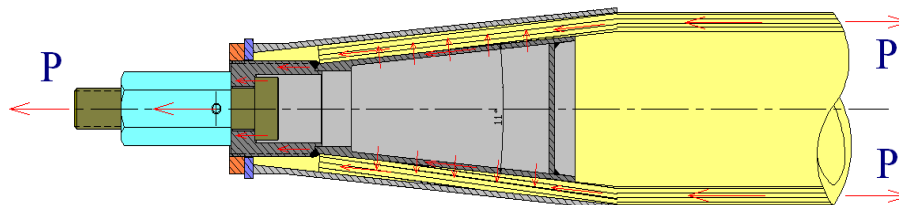


Рисунок 5 – Анализ работы нового узла соединения на растяжение

Анализ работы на сжатие

Работа узла на сжатие отличается от работы на растяжение. При восприятии усилий сжатия, нагрузка от шара-коннектора передается через болт на шестигранную гайку, которая в свою очередь передает свое усилие сначала на узкую часть внутреннего конуса, а затем через резьбу упорной гайки на внешний конус. Таким образом, конус бамбука вдавливается во внешний конус, обеспечивая прижатие к внутренней стороне внешнего стального конуса. В результате во внутреннем конусе напряжения не возникают, а усилие сжатия от нагрузки передается через внешний конус на бамбуковый ствол (рисунок 6).

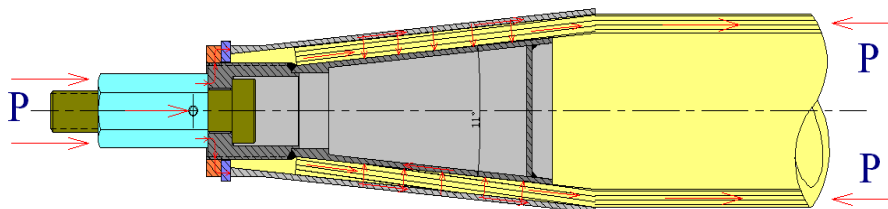


Рисунок 6 – Анализ работы нового узла соединения на сжатие

Аналитический расчет узла

В первом приближении расчет ведется для каждого элемента в отдельности. Узел состоит из следующих расчетных элементов (рисунок 8): болта, внутреннего конуса, внешнего конуса и «конуса» бамбукового ствола. Расчет ведется в упругой стадии. Для расчета конических элементов используется безмоментная теория оболочек. Мембранные усилия (нормальные силы на единицу длины срединной поверхности оболочки) связаны уравнением Лапласа:

$$\frac{N_t}{\rho_t} + \frac{N_m}{\rho_m} = p, \quad (1)$$

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 $\rho_m = \infty$,

$$N_t = p \cdot \rho_t, \quad (2)$$

Расчет на действие растягивающей нагрузки

Расчетная схема внутреннего конуса представлена на рисунке 7.

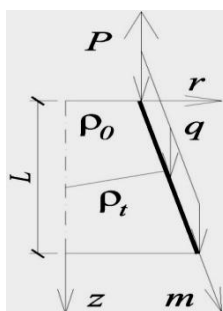


Рисунок 7 – Расчетная схема внутреннего конуса

Нагрузка, приложенная к торцевой окружности, равняется $P = N / (2\pi\rho_0)$, где N – приложенная к узлу сила. Давление по боковой поверхности оказывается следующим:

$$q = \frac{N \cos \alpha}{\pi(2\rho_0 + L \operatorname{tg} \alpha)L}, \quad (3)$$

Радиус кривизны в произвольном месте записывается следующим образом:

$$\rho_t = (\rho_0 + z \operatorname{tg} \alpha) / \cos \alpha, \quad (4)$$

После подстановки (3) и (4) в (2) и необходимых преобразований можно получить выражение для мембранного усилия в тангенциальном направлении:

$$N_t = \frac{\sin \alpha (\rho_0 + z \operatorname{tg} \alpha)}{\pi(2\rho_0 + L \operatorname{tg} \alpha)L} N, \quad (5)$$

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

$$N_m = \frac{(2\rho_0 + L \operatorname{tg} \alpha)L - (2\rho_0 + z \operatorname{tg} \alpha)z}{2\pi(2\rho_0 + L \operatorname{tg} \alpha)(\rho_0 + z \operatorname{tg} \alpha)L \cos \alpha} N, \quad (6)$$

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

$$\sigma_{\text{int}} = \sqrt{N_t^2 - N_t N_m + N_m^2} / t_{\text{int}} = R_{\text{int}}, \quad (7)$$

где t_{int} – толщина стенки внутреннего конуса, а R_{int} – предел прочности (текучести) материала внутреннего конуса.

Внешний конус не воспринимает нагрузки в направлении продольной оси; на него передается только радиальное давление (вдоль оси r на рис. 7). Поэтому в нем возникает только одно мембранное усилие N_t , которое вычисляется по формуле (5), но будет иметь противоположный знак. Таким образом, условие прочности для внешнего конуса приобретает вид:

$$\sigma_{\text{ext}} = \frac{N_t}{t_{\text{ext}}} = \frac{\sin \alpha (\rho_0 + z \operatorname{tg} \alpha)}{\pi(2\rho_0 + L \operatorname{tg} \alpha)L} \cdot \frac{N}{t_{\text{ext}}} \leq R_{\text{ext}}, \quad (8)$$

где R_{ext} – предел прочности (текучести) материала внешнего конуса при осевом сжатии.

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

$$\sigma_{bam} = q = \frac{\cos\alpha}{\pi(2\rho_0 + L \operatorname{tg} \alpha)} N, \quad (9)$$

а условие прочности соответственно имеет вид $\sigma_{bam} \leq R_{bamc\alpha}$, (10)

где $R_{bamc\alpha}$ – предел прочности бамбука при сжатии под углом α к продольным волокнам.

Из формул (7), (8), и (10) для каждого из элементов можно получить разрушающую нагрузку $[N]$. Вычисления проведены с использованием программного комплекса MathCAD при исходных данных из таблицы 1. Схема обозначений приведена на рисунке 8. Результаты расчета сведены в таблицу 2.

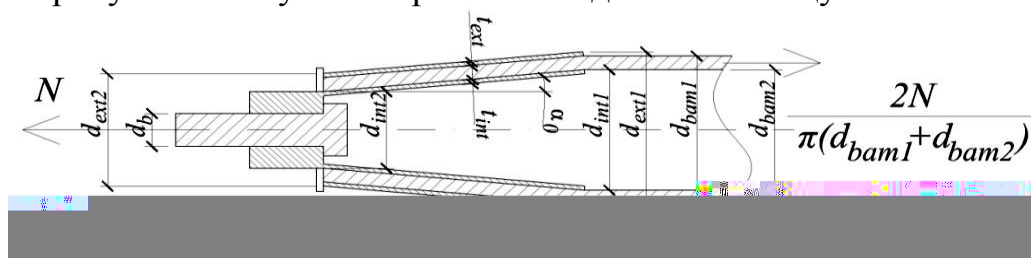


Рисунок 8 – Схема обозначений параметров узла

Таблица 1 – Исходные данные для аналитического расчета

Наименование	Обозначение	Ед. измерения	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 (С 5 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 (7), (8), (10). 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_r . Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 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

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.

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). Для определения неизвестных в задаче есть условия, которые для наглядности сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Условия работоспособности узла

Номер условия	Условие	Величины, входящие в условие	
		Заданные	Определяемые
I	Условие прочности внутреннего конуса (формула 7)	$R_{int}, D,$	L, α, t_{int}
II	Условие прочности внешнего конуса (формула 8)	$R_{ext}, D,$	L, α, t_{ext}
III	Условие прочности бамбукового «конуса» (формула 10)	$R_{bamc90}, D,$	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 4), а именно: L – из условия III, затем t_{int} и t_{ext} из условий I и II соответственно. Однако, анализ показал, что длина конических элементов должна назначаться из конструктивных соображений с целью минимизации возможных локальных концентраций напряжений. Решающее значение для прочности элементов узла имеют их толщины.

Использование программы ANSYS для расчета на прочность

1. Основные требования к моделированию

При изготовлении образцов предлагаемого узла применены три материала: бамбук, сталь 5 и сталь 45. С помощью программы 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 – сила растяжения и сжатия должна соответствовать реальным условиям работы.

2. Физико-механические характеристики материалов

Физико-механические характеристики материалов при моделировании предлагаемых узлов включают: модули упругости (E_6) и коэффициент Пуассона (μ_6) бамбука, модуль упругости ($E_{ст.5}$) и ($\mu_{ст.5}$) стали 5, ($E_{ст.45}$) и ($\mu_{ст.45}$) стали 45, коэффициент трения бамбука и металла, а также диаграмму σ_i - ϵ_i для учета пластических деформаций в стальных деталях. Вдоль волокон $E_6=12000$ МПа, поперек волокон $E_6=1489$ МПа. Вдоль волокон $\mu_6 = 0,325$, поперек волокон $\mu_6 = 0,039$. $E_{ст.5}=206000$ МПа, $\mu_{ст.5} = 0,30$. $E_{ст.45} = 210000$ МПа, $\mu_{ст.45} = 0,26$. Коэффициент трения между бамбуком и металлом составляет 0,538.

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 предостав-

лены лабораторией кафедры Е4 Балтийского Государственного Технического Университета им. Д.Ф. Устинова «Военмех».

3. Создание конечно-элементной модели

Конечно-элементная модель исследуемого узла состоит из цилиндрической полой оболочки со свойствами бамбука, внешних и внутренних конусных оболочек со свойствами стали и прочих элементов также со свойствами стали.

В анализе была использована сборочная конструкция с деталями, которая полностью соответствует конструкции, использованной при испытании на растяжение и сжатие. 3D-модель была создана в программе AutoCAD (рисунок 9). Затем она была сохранена в промежуточном формате, импортирована в ANSYS и далее разбита там на объемные конечные элементы.

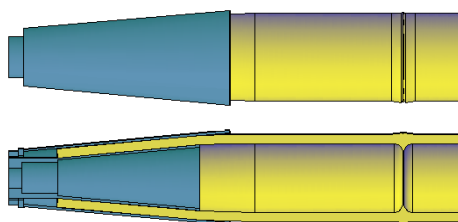


Рисунок 9 – 3D модели в программе AutoCAD

4. 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 10). Такое упрощение можно ввести в силу осевой симметрии узла.

5. 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 11). 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).

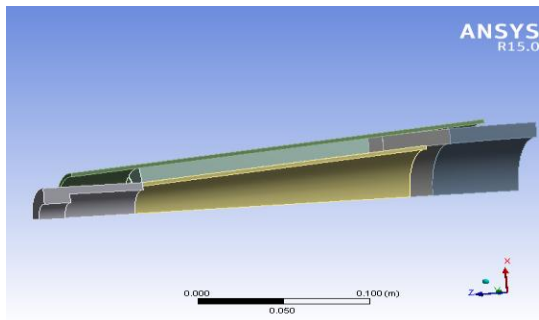


Рисунок 10 – Схема упрощенной модели в программе ANSYS

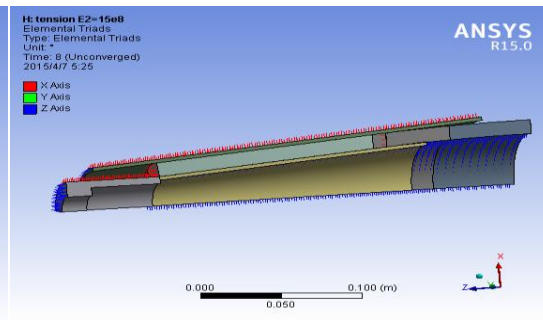


Рисунок 11 – Ориентация осей конечных элементов модели

6. Результаты программного расчета

Анализ результатов расчета проводился 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.

При растягивающей нагрузке получены следующие результаты:

По достижению нагрузки 194,4 кН во внутреннем конусе и одновременно в бамбуке произошло разрушение, суммарное перемещение при этом составило 17,08 мм (рисунок 12).

При нагрузке 174,7 кН во внутреннем конусе возникла текучесть стали, перемещение составило 1,76 мм (рисунок 13).

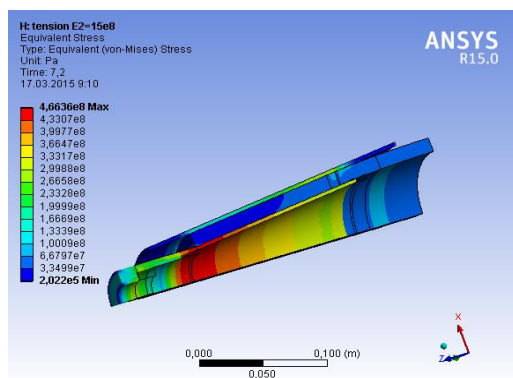
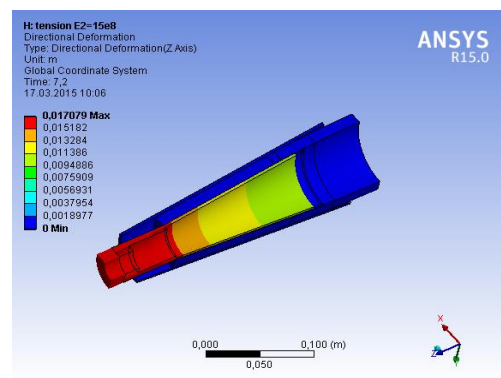


Рисунок 12 – Диаграммы напряжений и перемещений в момент разрушения при растяжении



При сжимающей нагрузке получены следующие результаты:
 При достижении 150,9 кН в бамбуке происходит разрушение, суммарное перемещение при этом составило 2,16 мм (рисунок 14).

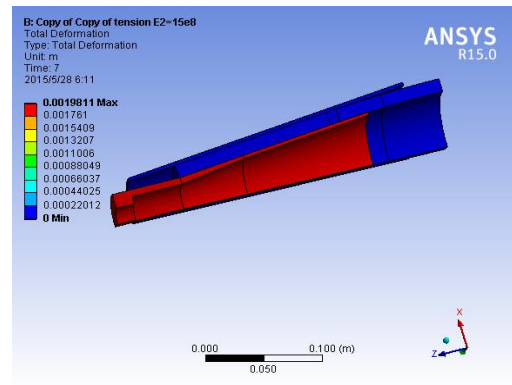
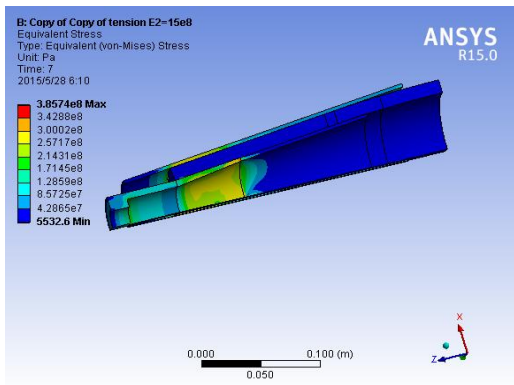


Рисунок 13 – Диаграммы напряжений и перемещений в момент достижения предела текучести при растяжении

При нагрузке 111,7 кН во внутреннем конусе возникла текучесть стали, перемещение составило 1,59 мм (рисунок 15).

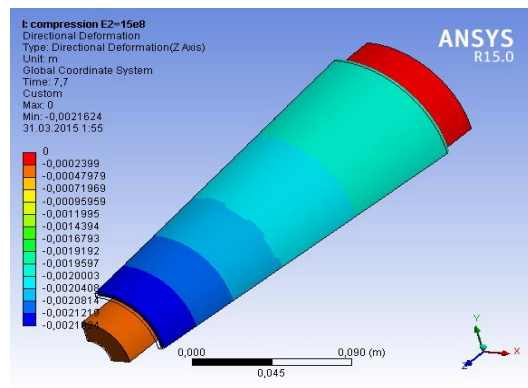
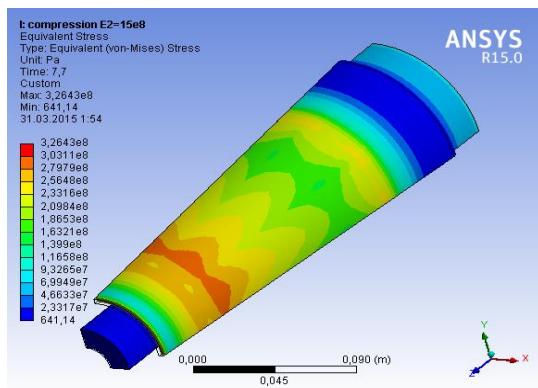
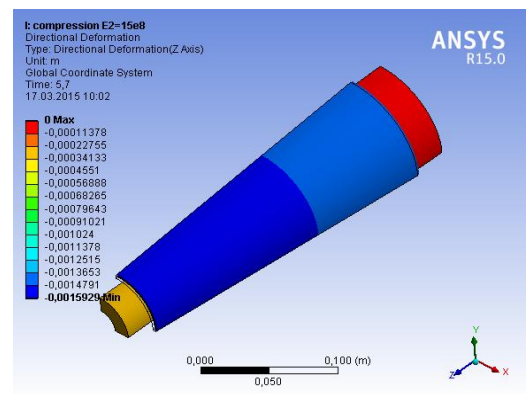
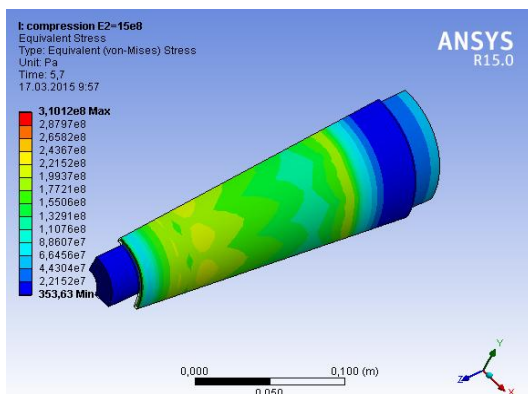


Рисунок 14 – Диаграммы напряжений и перемещений в момент разрушения при сжатии



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.

Испытание на растяжение

Процесс подготовки экспериментальных образцов состоял в следующем: был выбран ствол бамбука 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 16). Затем внешний конус установлен на конце бамбука, внутренний и внешний конусы скреплены между собой с помощью гаек (рисунок 17).



Рисунок 16 – Установка внутренней конической трубки в бамбук



Рисунок 17 – Установка стальных элементов узла

Для проведения эксперимента на растяжение узлов нового типа была использована компьютерная электронная универсальная испытательная машина INSTRON5989, показанная на рисунке 18.

Была проведена компьютерная запись хода эксперимента. Перед проведением эксперимента, для предварительного обжатия элементов к узлу была приложена нагрузка 20 кН, испытательная машина временно остановлена на 1-2 минуты для более удобного наблюдения за образцом.

Был проведен анализ результатов эксперимента и перемещений, приведенных на графике (рисунок 19). Из графика можно заключить, что наблюдалось предварительное обжатие нагрузкой в 20 кН, так как кривая до 20 кН нелинейно восходящий вид. Из результатов эксперимента и данных по всем элементам видно, что при нагрузке около в 100 кН, элементы узла продолжали нормально функционировать.



Рисунок 18 – Испытание узла на растяжение

Испытание конического стального элемента

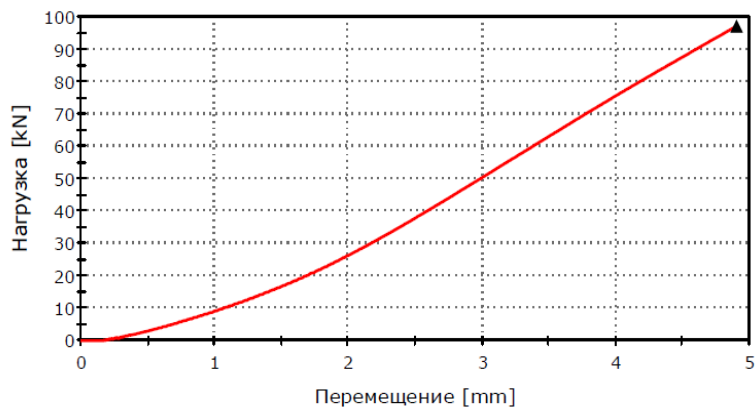


Рисунок 19 – График «нагрузка-перемещение» при испытании узла на растяжение

Испытание на сжатие

Процесс проведения эксперимента на сжатие аналогичен процессу проведения эксперимента на растяжение. Для эксперимента был выбран ствол бамбука длиной 500 мм, диаметром 102 мм. Размеры устанавливаемых металлических деталей также были выбраны соответственно размерам, необходимым для проведения эксперимента на сжатие (рисунок 20). Как и в случае растяжения, использовано предварительное обжатие узла нагрузкой в 20 кН.



Рисунок 20 – Испытание узла на сжатие

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 до 150 кН смещение внешнего конуса было очень небольшим, с бамбуком так же не происходило каких-либо изменений. При нагрузке свыше 120 кН график нагрузка-перемещение (рисунок 21) приобрел ниспадающий участок.

В процессе эксперимента 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, их также не было. На бамбуке видны следы давления, однако в целом бамбук сохранил свои свойства.

Из анализа наблюдения за элементами узла и перемещениями, отображенными на графике (рисунок 21), следует, что до нагрузки 154 кН работа узла отвечает проектным ожиданиям.

Испытание конического стального элемента

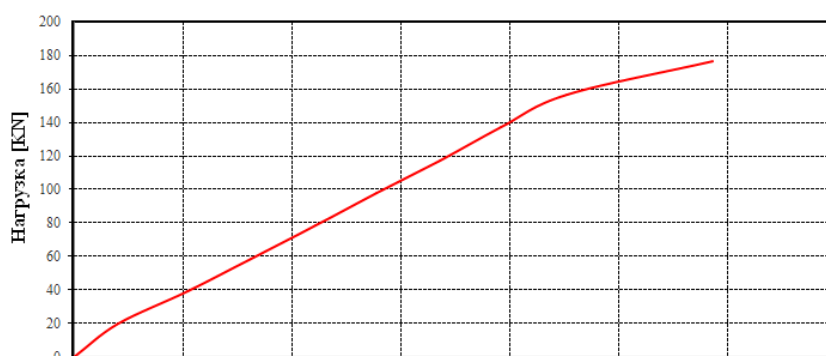


Рисунок 21 – График «нагрузка-перемещение» при испытании узла на сжатие

В результате опытов было установлено, что после прекращения испытаний элементы узла по-прежнему находились в рабочем состоянии. Требовалось установить, при какой нагрузке узловые соединения будут разрушены, в каких частях возникнут разрушения 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.

При увеличении нагрузки до 27,6 тс произошло разрушение болта, испытание было остановлено. Полное перемещение составило 57 мм (рисунок 22).

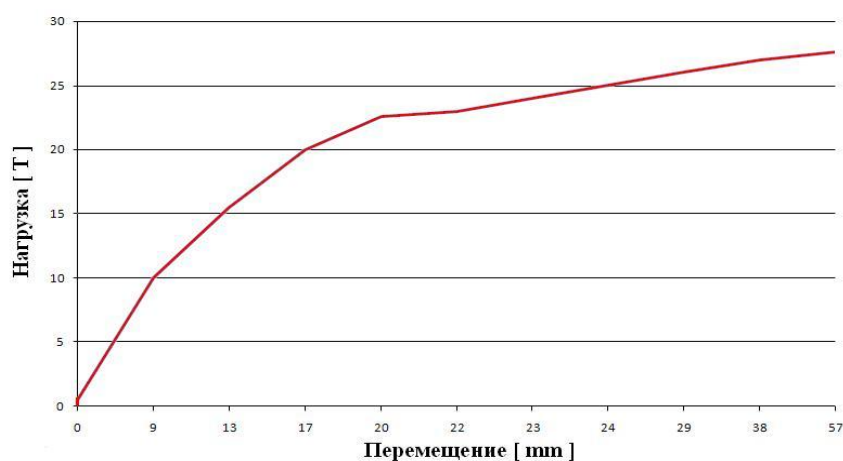
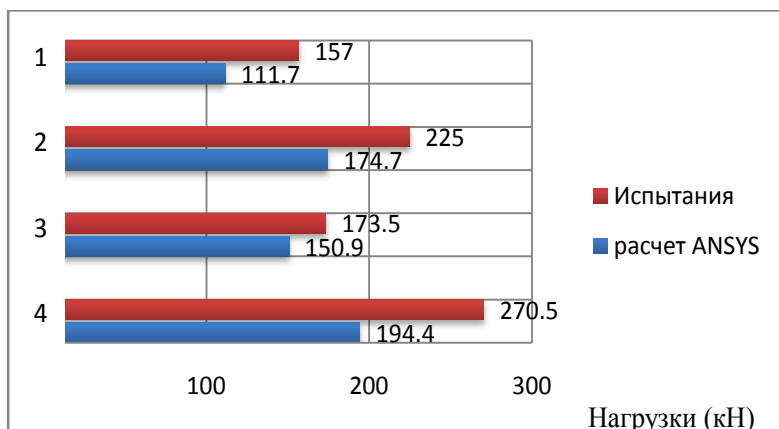


Рисунок 22 – График «нагрузка-перемещение» при испытании на разрушение при растяжении

В результате проведенных испытаний установлены следующие пределы, обеспечивающие работоспособное состояние узла: при растяжении – 225 кН, при сжатии – 157 кН. Сравнение результатов испытаний и расчетов в программном комплексе ANSYS приведены на рисунке 23.



1. Предельное расчетное усилие в узле при сжатии;
2. Предельное расчетное усилие в узле при растяжении;
3. Разрушающее усилие при сжатии;
4. Разрушающее усилие при растяжении.

Рисунок 23 – График сравнения опыта и результатов программы ANSYS

III ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ниже кратко излагаются основные итоги по результатам исследований.

1. Сформулированы основные требования, которым должен отвечать современный узел соединения бамбуковых стержней:

- надежность и несущая способность, сопоставимые с соответствующими параметрами бамбука;
- малая деформативность;
- ремонтпригодность и простота сборки-разборки;
- экономичность и долговечность;
- отсутствие жидко твердеющих материалов (бетон, цемент, клей, и т. п.);
- эстетическая привлекательность.

2. Проведен анализ свойств различных видов бамбука, из которого сделан вывод, что наиболее подходящим для строительных конструкций оказался бамбук вида «Мосо».

3. Предложена идея выполнять бамбуковые конструктивные соединения по аналогии с соединениями, используемыми в стальных структурных конструкциях (типа «систем МАРХИ»).

4. На основе анализа строительных узлов в современной бамбуковой архитектуре и оригинальных свойств бамбука разработано конструктивное решение узла соединения стержней из бамбуковых стволов, в основу которого положена идея о зажиме конца бамбукового ствола между двумя коническими стальными элементами.

5. Разработан метод, позволяющий с помощью приближенных аналитических расчетов определить необходимые параметры узла или предварительно оценить его несущую способность в упругой стадии работы. Расчеты показали, что для принятых в работе параметров узла (со стволом бамбука диаметром 100 мм) несущая способность (по пределу текучести стали) составляет при растягивающей нагрузке 11.8 тс, а при сжимающей – 19.0 тс.

6. Проведена оценка податливости нового узлового соединения при растягивающих усилиях, которая соответствует величине предельных продольных деформаций для нагельных соединений, равных 2 мм.

7. Проведен расчет предложенного узла с помощью программы построения

конечно-элементарной модели ANSYS 15.0, а также его испытания на растягивающую и сжимающую нагрузки.

8. Проведены вспомогательные экспериментальные исследования. В результате испытаний установлено, что наиболее эффективным является использование для внутреннего и внешнего конусов из стали. Также сделан вывод о том, что наличие «суставов» в бамбуке не уменьшает его прочность.

9. Даны рекомендации для 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 шара-коннектора, болтов.

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.

IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Яо Вэй** Применение бамбука в строительстве [Текст] / Вэй Яо, А. Б. Шмидт // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – №2 (37). – С. 71–75 (0,44/0,22 п. л.).

2. **Яо Вэй** Экспериментальные исследования элементов узлового соединения стержневой конструкции из бамбука [Текст] / Вэй Яо, А. Б. Шмидт // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – №6 (47). – С. 77–83 (0,44 п. л./0,22 п. л.).

3. **Яо Вэй** Исследование узлов сопряжения элементов из бамбука в строительных стержневых конструкциях [Текст] / Вэй Яо // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – №31 (50). – С. 70–75 (0,44 п. л.).

4. **Яо Вэй** Анализ принципов и способов современного проектирования архитектурных сооружений из бамбука [Текст] / Вэй Яо // Современные пробле-

мы науки и образования. – 2015. – № 1. URL: <http://www.science-education.ru/121-18197>.

Публикации в других изданиях:

5. **Яо Вэй** Применение деревянных конструкций в строительстве зданий в современном Китае / Вэй Яо // Доклады: материалы 68–й Научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. / СПбГАСУ. – СПб, 2011. – С. 63–67 (0,19 п.л.).

6. **Яо Вэй** Развитие бамбука в качестве замены древесины в современных китайских домах / Вэй Яо // Актуальные проблемы современного строительства и пути их эффективного решения часть 1: Материалы международной научно–практической конференции 10–12 октября 2012г. СПбГАСУ. – СПб, 2012. –С. 147–150 (0,44 п. л.).

7. **Яо Вэй** Исследования узлов сопряжения элементов из бамбука в зданиях различного назначения / Вэй Яо // Актуальные проблемы строительства: материалы международной научно–практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. СПбГАСУ. – СПб, 2013. – С. 227–230 (0,12 п.л.).