

**ЛОСКУТОВА ДИАНА ВЛАДИМИРОВНА**

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ УЗЛОВЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ  
ПЛАСТИНАХ В СКВОЗНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ  
КОНСТРУКЦИЯХ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2009

**Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет»**

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Копаница Дмитрий Георгиевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Инжутов Иван Семенович**

кандидат технических наук, доцент  
**Подшивалов Иван Иванович**

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет»  
(«СИБСТРИН»)

Защита состоится 26 июня 2009 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.265.01 при ГОУ ВПО Томском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 634003 г. Томск, пл. Соляная, 2, корпус 5, аудитория 307.

Факс: (3822) 65-03-17

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

Автореферат разослан 25 мая 2009 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Копаница Н.О.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Строительство современных пространственных конструкций из древесины основано на применении новых технологий с максимальным использованием деталей и конструктивных элементов заводского изготовления.

Сквозные конструкции из древесины с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах (МЗП) обладают малым собственным весом, надежностью соединений, отсутствием выступающих деталей и высокой технологичностью изготовления. Они экономически эффективны и нашли широкое применение в малоэтажном строительстве и при реконструкции зданий.

Современные методы расчета соединений на МЗП основаны на общих принципах расчета строительных конструкций по предельным состояниям и базируются на результатах обширных экспериментальных исследований. С развитием методов расчета выполнены исследования по оптимизации форм и размеров зубьев и пластин. Исследованы различные варианты узловых соединений сквозных конструкций, и получены практические зависимости для инженерных расчетов. Экспериментально подтверждена высокая жесткость узловых соединений на МЗП, изучены факторы, влияющие на несущую способность и деформативность в условиях эксплуатации. Показано, что податливость узлового соединения существенным образом влияет на общую деформативность конструкции. По результатам экспериментально-теоретических исследований предложены методики определения податливости узловых соединений. Разработаны рекомендации по проектированию и изготовлению пространственных конструкций с узловыми соединениями на МЗП.

Между тем, возможность повышения точности расчета конструкций с узловыми соединениями на МЗП исчерпана не в полной мере. Исследования напряженно-деформированного состояния конструкций узловых соединений в стадии упругопластического деформирования и разрушения проведены в ограниченном объеме. В проведенных исследованиях отсутствуют сведения о влиянии напряжений на изменение прочности и деформативности древесины. Дальнейшее развитие методов, направленных на уточнение решений и выявление резерва прочности может быть получено на основе уточненных моделей, учитывающих особенности поведения древесины и изменения ее физико-механических свойств зоне контакта с МЗП.

Перспектива использования сквозных деревянных конструкций с узловыми соединениями на МЗП предполагает совершенствование существующих методов расчета и технологии проектирования. Это определяет актуальность задачи, решение которой отвечает современным запросам строительства.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы 1.1.03 «Разработка новых направлений в теории синтеза сооружений, позволяющих расширить область создания конструкций пониженной материалоемкости и повышенной несущей способности. Фундаментальное исследование» (Г №01200315117), 2003-2007 г., входящей в тематический план НИР ТГАСУ.

**Объект исследования** – узловые соединения на металлических зубчатых пластинах в сквозных деревянных конструкциях.

**Предмет исследования** – напряженно-деформированное состояние узловых соединений на металлических зубчатых пластинах в сквозных деревянных конструкциях.

**Цель работы** – совершенствование метода расчета напряженно-деформированного состояния узловых соединений на МЗП в сквозных деревянных конструкциях при статическом нагружении с учетом изменения физико-механических свойств древесины в зоне контакта.

**Задачи исследования:**

- выполнить экспериментальные исследования узловых соединений деревянных элементов на МЗП, обеспечивающие возможность определения напряжений при использовании физических моделей и выявить степень упрочнения древесины в зоне контакта;

- разработать метод расчета деревянных узловых соединений на МЗП с учетом упрочнения древесины в контактном слое и провести расчеты деревянной треугольной фермы с узловыми соединениями на МЗП на действие статической нагрузки;

- выполнить экспериментальные исследования узловых деревянных соединений на МЗП и деревянных ферм с узловыми соединениями на МЗП в упругой стадии работы, при упругопластическом деформировании и разрушении при статическом нагружении;

- разработать инженерный метод расчета узловых соединений на МЗП на действие статической нагрузки и получить совокупность научно обоснованных данных для их практического использования.

**Методология работы** основана на использовании классических положений теории расчета строительных конструкций. Физический эксперимент выполнялся с использованием современного измерительного оборудования в лаборатории кафедры металлических и деревянных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета и в лаборатории КБ «Радар» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Это обеспечило необходимую достоверность полученных результатов. Расчеты проведены на основе программного расчетного комплекса APM Civil Engineering Prof. (Steel-Concrete-Wood St).

**Научная новизна работы:**

- получены новые знания в определении уровня и характера напряжений в зоне контакта древесины и металлической зубчатой пластины;

- поставлена и решена задача о влиянии физико-механических свойств древесины в зоне контакта на прочность и деформативность узловых соединений на металлической зубчатой пластине;

- разработан метод расчета узловых соединений на МЗП из древесины на действие статической нагрузки с учетом упрочнения древесины в зоне контакта.

**Практическая значимость работы:**

- разработан метод расчета напряженно-деформированного состояния узловых соединений на МЗП с учетом упрочнения древесины в зоне контакта;

- определены значения коэффициентов постели в зависимости от направления действующей нагрузки к волокнам древесины и разработан инженерный

метод расчета для решения практических задач при проектировании деревянных конструкций с использованием МЗП.

**Достоверность результатов работы** обеспечена корректным использованием научных положений в области строительной механики и теории прочности, современных методов проведения экспериментальных исследований и применением прецизионного измерительного оборудования. О достоверности результатов свидетельствует удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных данных.

**Реализация работы.** Результаты исследований использованы ООО «Зеленый дом» (г. Томск) в расчетах при разработке проектной документации и строительстве пространственных и плоских сквозных конструкций из древесины на МЗП. Результаты исследований использованы в Научно-техническом центре «АПМ» (НТЦ АПМ, г. Москва) при разработке версии v.9.6 программного продукта APM Civil Engineering Prof. (Steel-Concrete-Wood), предназначенного для расчета деревянных конструкций узловых соединений на металлических зубчатых пластинах. Материалы диссертационной работы используются в Томском государственном архитектурно-строительном университете при подготовке инженеров и магистров по направлению 270100 «Строительство».

**Личный вклад диссертанта** состоит:

- в разработке программы экспериментальных исследований и проведении испытаний узловых соединений деревянных элементов на МЗП;
- в обосновании использования методов поверхностного зондирования для определения напряжений в зоне контакта древесины и МЗП;
- в проведении экспериментальных исследований деревянных треугольных ферм с узловыми соединениями на МЗП на действие статической нагрузки, и анализе полученных экспериментальных результатов;
- в разработке метода расчета напряженно-деформированного состояния при взаимодействии древесины и МЗП с учетом упрочнения древесины в зоне контакта;
- в разработке инженерного метода расчета прочности узловых соединений из древесины на МЗП на действие статической нагрузки.

**На защиту выносятся:**

- методология проведения эксперимента по установлению свойств древесины в зоне контакта с внедренным стержнем и метод расчета узловых соединений на металлических зубчатых пластинах с учетом полученных данных;
- совокупность экспериментальных и расчетных данных, характеризующих напряженно-деформированное состояние узловых соединений на МЗП при статическом нагружении;
- результаты натурных испытаний треугольных деревянных ферм с консольными свесами пролетом 7,6 м;
- инженерный метод расчета прочности узловых соединений из древесины на МЗП на действие статической нагрузки;

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 6 в журнале, входящем в перечень ВАК (4 статьи без соавторов, общим объемом 25 страниц журнального текста) и 2 статьи с соавторами (об-

щим объемом 13 страниц журнального текста). Остальные 5 работ, представлены в виде статей и докладов, из них без соавторов 3 работы и 2 работы с соавторами (общий объем 27 страниц журнального текста, вклад диссертанта составляет 30 до 50 процентов).

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы обсуждались и докладывались: на научных семинарах кафедры металлических и деревянных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета (2004 - 2008 гг.); на научно-технических конференциях НГАСУ(Сибстрин), Новосибирск, 2005, 2006, 2008 г.; на региональной научно-технической конференции «Проблемы строительства и архитектуры» КрасГАСА, Красноярск, 2006 г.; на межрегиональной научно-технической конференции «Строительство: материалы, конструкции, технологии», БрГУ, Братск, 2007 г.; на международной научно-технической конференции молодых ученых (аспирантов, докторантов) «Актуальные проблемы современного строительства», СПбГАСУ, Санкт-Петербург 2007 г.; на Международной IEEE-Сибирской конференции по управлению и связи (SIBCON-2009), Томск, 2009 г.

**Структура и объем работы.** Диссертация объемом 182 страниц машинописного текста состоит из пяти глав, заключения, списка литературы из 184 наименований, 16 таблиц, 139 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы и дается общая характеристика работы, формулируется цель и ставятся задачи исследования, излагается структура диссертации.

**В первой главе** проводится обзор работ, посвященных вопросам экспериментальных и теоретических исследований деревянных конструкций с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах и нагелях. Обсуждаются общие характеристики и опыт применения металлических зубчатых пластин в соединениях деревянных конструкций в строительной практике.

Соединения деревянных элементов на МЗП являются разновидностью нагельных соединений. Большой вклад в развитие теории и в разработку нагельных соединений внесли такие ученые, как: П.П. Ершов, Т. Гестеши, А.А. Гогешвили, О. Граф, А. Жаксон, В.Ф. Иванов, Ю.М. Иванов, И.С. Инжутов, П.А. Дмитриев, М.Н. Каган, Г.Г. Карлсен, В.Н. Квасников, В.М. Коченов, В.П. Коцегубов, А.В. Леняшин, Д.В. Мартинец, Л.Н. Мальцев, В.Н. Маслов, В.Г. Миронов, Б.Л. Николаи, Ю.В. Слицкоухов, Ю.Д. Стрижаков, С.Б. Турковский, И.А. Цыпленков, В.П. Ярцев и др. Стремление повысить несущую способность соединений деревянных конструкций привело к созданию новых видов нагельных соединений. В области исследований соединений на нагельных пластинах известны работы Е.В. Бурова, С.А. Исупова, В.А. Цапаева и др. Исследования деревянных элементов на МЗП на протяжении последних лет проведены: Д.К. Арлениновым, П.А. Дмитриевым, А.М. Дурновским, В.Г. Котловым, А.В. Крициным, А.К. Наумовым, В.В. Пуртовым, В.А. Цапаевым, Р.И. Хисамовым и др.

Полученные авторами теоретические зависимости использованы для практического применения с учетом деформаций узловых соединений во времени. Исследована работа древесины на смятие в отверстиях узкими прямоугольными штампами при действии кратковременных и длительных нагрузок. Установлены зависимости временных сопротивлений при смятии от ширины штампа и угла наклона древесины, определена величина коэффициента длительного сопротивления, получены выражения для определения длительной прочности древесины при смятии на заданный промежуток времени. Экспериментальные исследования позволили установить величины расчетных сопротивлений и нормативных коэффициентов постели чистой древесины при смятии под углом к волокнам. Исследованы процессы деформирования древесины при смятии в отверстиях вдоль и поперек волокон в условиях длительного нагружения. Экспериментально установлены значения предельных кратковременных нагрузок на соединение в зависимости от угла наклона волокон древесины. Экспериментально получены кривые длительного сопротивления соединений на МЗП вдоль и поперек волокон древесины. Установлено влияние влажности древесины на прочность и деформативность соединений на МЗП.

Результаты исследований использованы при разработке методов расчета и проектной документации для конструкций на МЗП. Помимо исследований плоских и пространственных конструкций было уделено внимание работе узловых соединений как в упругой стадии работы, так и при появлении пластических деформаций.

С развитием методов расчета были выполнены исследования по оптимизации форм и размеров пластин и зубьев МЗП. Получены результаты по взаимодействию штампов с древесиной, и получены практические зависимости для инженерных расчетов. Изучены факторы, влияющие на несущую способность и деформативность узловых соединений на МЗП в условиях эксплуатации.

Несмотря на то, что большое количество как теоретических, так и экспериментальных работ посвящено изучению нагельных соединений и МЗП, в литературе недостаточно данных об исследованиях напряженного состояния древесины в зоне контакта с нагелем. Вопрос о работе узловых соединений на МЗП в условиях упругопластических деформаций освещен недостаточно.

ИСПЫТАНИЕ НА ДЕЙСТВИЕ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ										
СХЕМА ИСПЫТАНИЙ	ПРОДОЛЬНОЕ СЖАТИЕ			ГЕОРАДАРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ КОНТАКТА ДРЕВЕСИНЫ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ НАГЕЛЕМ		ИЗГИБ			УЗЛОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ ВЕРХНЕГО ПОЯСА ФЕРМА С УЗЛОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ НА МЗП	
	УЗЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ НА МЗП И СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ НАГЕЛЯХ					УЗЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ НА МЗП				
				СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫЙ НАГЕЛЬ						
ШИФР ОБРАЗЦОВ	С-1.1... С-1.8	С-2.1... С-2.8	С-3.1... С-3.8	С-1... С-6	С-7... С-12	БЦ, БГ	С-1... С-6	С-7... С-12	Сд	Ф-1, Ф-2*
КОЛ-ВО ОБРАЗЦОВ	8	8	8	6	6	4	6	6	2	2

Рисунок 1 – Программа экспериментальных исследований

Обзор показал, что на сегодняшний день не существует методов расчета узловых соединений деревянных конструкций на МЗП, учитывающих изменение механических свойств древесины в зоне контакта с МЗП или нагелем.

Выполненный анализ состояния вопроса позволил сформулировать основные направления исследования, включая программу экспериментальных исследований (рис. 1). Программа экспериментов включает: испытания узловых соединений на МЗП и цилиндрических нагелях из стали и стеклопластика на продольное сжатие и изгиб; испытания узловых соединений с использованием методов поверхностного зондирования; исследования свойств древесины, модифицированной давлением.

**Вторая глава** посвящена исследованию узловых соединений из древесины на металлических зубчатых пластинах и цилиндрических нагелях из стали и стеклопластика с металлическими и деревянными накладками на продольное сжатие и изгиб. Методами поверхностного зондирования исследованы напряжения в зоне контакта древесины с нагелем и с заостренной частью гвоздя. Проведены экспериментальные исследования и выявлено влияние степени сжатия на прочность и модуль упругости древесины. В работе при изготовлении всех конструкций использовались МЗП фирмы Mitek Industries.

На продольное сжатие проведены испытания несущей способности и деформативности 24 узловых соединений. Показано, что на начальном этапе деформаций соединения на МЗП имеют более высокую, до 25%, жесткость по сравнению с соединениями на стальных цилиндрических нагелях. На рисунке 2 приведены диаграммы продольных перемещений элементов узлового соединения.

Экспериментальные исследования нагельных соединений показали зависимость напряжений от площади контакта, направления действующей силы и плотности древесины. Для выявления картины распределения напряжений в окрестности нагеля использованы методы поверхностного зондирования с применением георадара.

Зондирование осуществлялось путем излучения мощных наносекундных электромагнитных импульсов и приема, отраженных от диэлектрических неоднородностей сигналов. По измеренному времени распространения сигнала в зондируемой среде и известной скорости распространения электромагнитного сигнала в древесине определялось расстояние до диэлектрических неоднородностей, а по форме и амплитуде отраженного сигнала устанавливались их физические свойства.

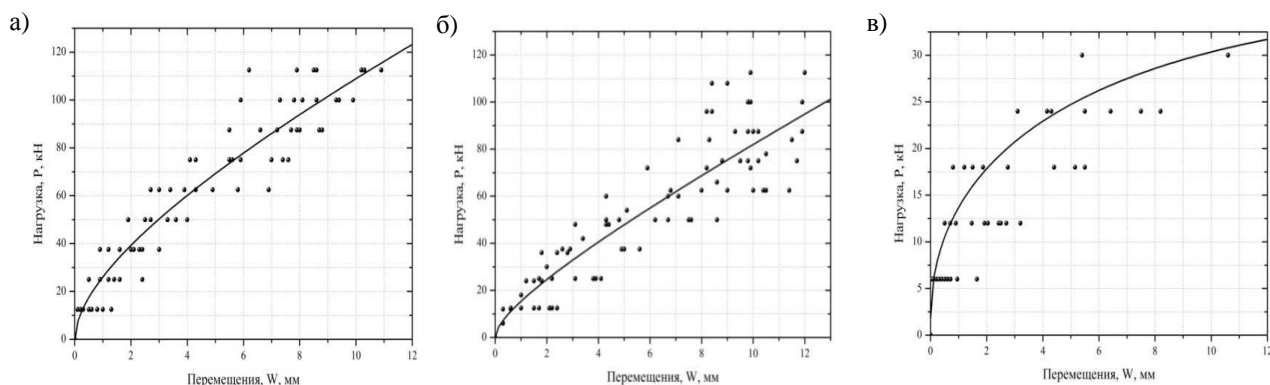


Рисунок 2 – Перемещение при сжатии узловых соединений на цилиндрических нагелях с металлическими накладками (а), с деревянными накладками (б), МЗП (в)

В исследуемых симметричных двухсрезных соединениях использован радиопрозрачный цилиндрический нагель диаметром 5,4 мм. Это позволило получить картину распределения напряжений в окрестности нагельного гнезда без искажений сигнала и определить максимальные значения напряжений в зоне контакта 21,3 МПа. На рисунке 3 приведены эпюры напряжений в древесине от действия нагеля по мере увеличения нагрузки.

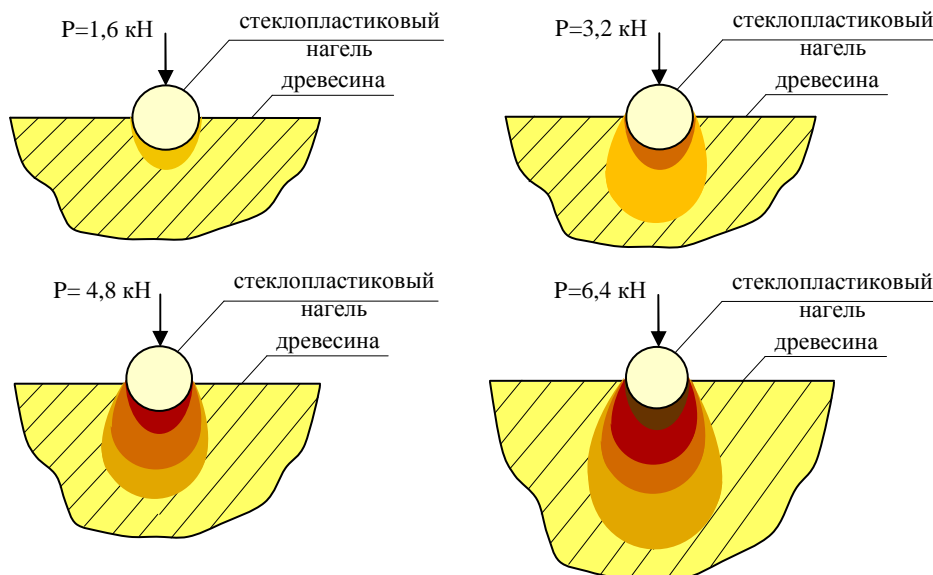


Рисунок 3 – Напряжения в древесине в зоне контакта с цилиндрическим нагелем в зависимости от нагрузки

Изменение площади контакта приводит к изменению картины напряжений. Гвоздевое соединение относится к гибким нагельным соединениям, и схема его работы может быть принята за основу при моделировании напряжений в древесине, контактирующей с зубом МЗП. При внедрении гвоздя в древесину образуется ограниченная область уплотнения. Изучение качественной и количественной картины распределения напряжений в окрестности заостренной части гвоздя проведено методом поверхностного зондирования с использованием георадара. На рисунке 4 показаны радарограммы деревянного бруса

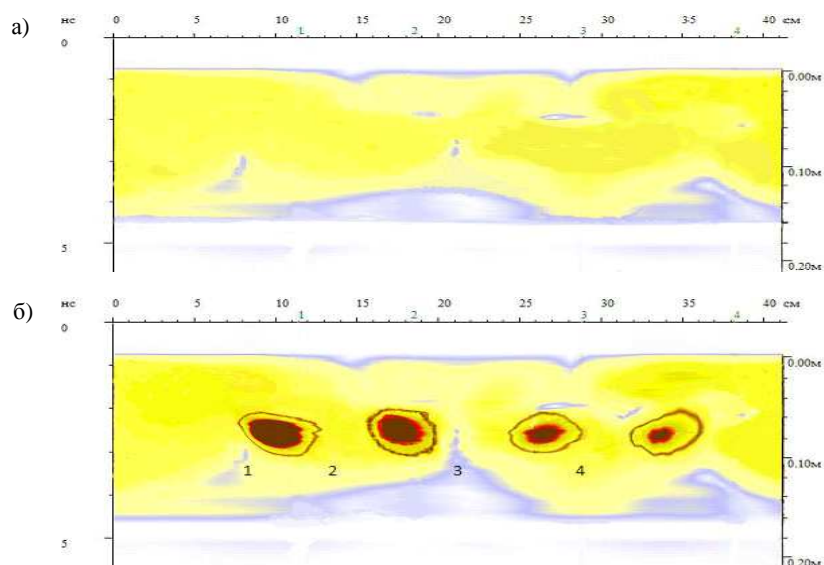


Рисунок 4 – Радарограммы бруса: а – брус без гвоздей; б – брус с гвоздями

без гвоздей и картины напряжений в древесине, выявленные по результатам сканирования бруса с внедренными гвоздями.

В области заостренной части гвоздя видны изменения плотности древесины, вызванные как сжимающими напряжениями под остриём, так и раскалывающими напряжениями поперек волокон. Сопоставление с радарограммами эталонных образцов показало, что максимальные значения напряжений смятия древесины достигли 25,0 МПа. Выявленные зоны разуплотнения протяженностью до 4...5 диаметров вдоль волокон соответствуют 1/3 от рекомендуемого нормами расстояния для гвоздевых соединений.

В деревянных фермах на металлических зубчатых пластинах наиболее ответственным и одновременно уязвимым является нижний пояс, в узлах которого помимо растягивающих и сжимающих сил действуют изгибающие моменты. Для изучения работы металлической зубчатой пластины, расположенной в сжатой зоне изгибаемого элемента, и влияния ее работы на податливость узлового соединения были проведены экспериментальные исследования 14 опытных образцов из сосновых досок сечением 50x150 мм на МЗП.

Соединение элементов по длине выполнено с зазором 12 мм. Эксперименты проведены на действие изгибающих сил по балочной схеме. В образцах I-го типа выполнен поперечный разрез МЗП на глубину 1/2 высоты сечения. В образцах II-го типа рабочая ширина пластины в растянутой зоне составила 1/3 высоты сечения. В зазор сжатой зоны узлового соединения устанавливалась пластина из оргстекла толщиной 12 мм. Нагрузка создавалась гидравлическим домкратом в двух третях пролета и увеличивалась с шагом 3,2 кН. Испытания проведены за 10 этапов.

Перемещения измерялись прогибомерами 6ПАО с ценой деления 0,01 мм. Относительные деформации деревянных элементов и металлической пластины определялись посредством тензодатчиков с базой 5 мм, наклеенных на металлической пластине, и с базой 20 мм – на деревянные элементы. Определение и обработка экспериментальных результатов осуществлялись программным комплексом автоматизации экспериментальных измерений АСТест.

Диаграммы прогибов образцов I-го и II-го типов показаны на рисунке 5, из которого видно, что элементы I-го типа менее деформативны.

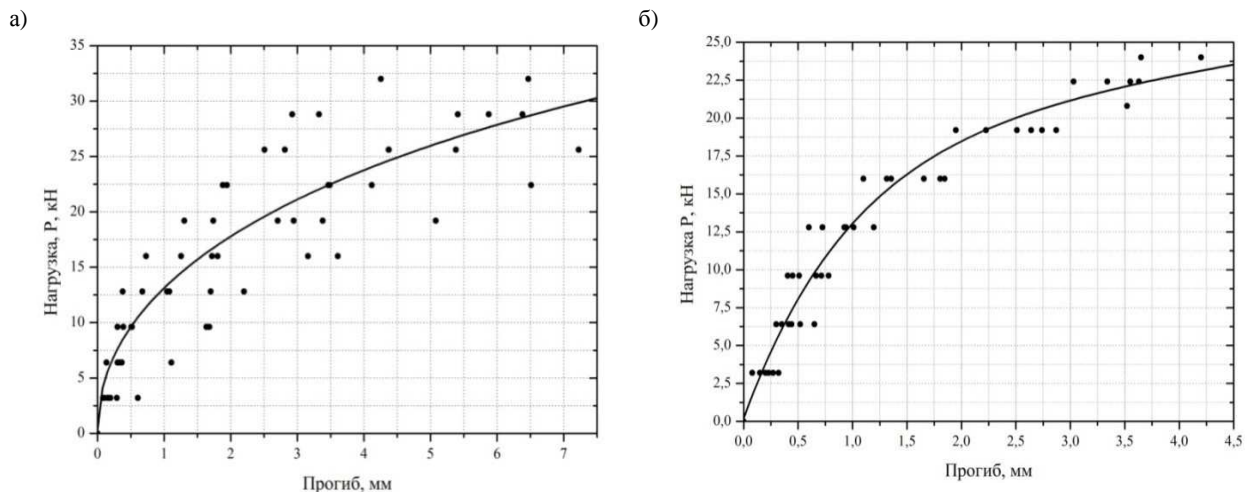


Рисунок 5 – Диаграмма прогибов образцов: а – I типа; б – II типа

Диаграммы упругих деформаций образцов I-го типа и схема расстановки тензорезисторов (Т) показаны на рисунке 6. Деформации крайних растянутых волокон древесины достигли у I-го и II-го типов  $0,42\text{‰}$  (Т-6). Соответствующие деформации сжатых волокон древесины не превысили  $0,8\text{‰}$  (Т-5). Деформации стальной пластины в растянутой зоне изменялись до  $1,0\text{‰}$  (Т-1).

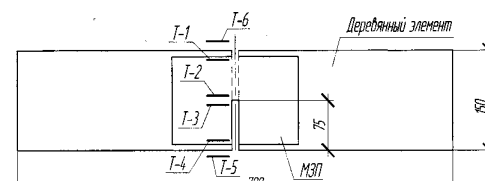
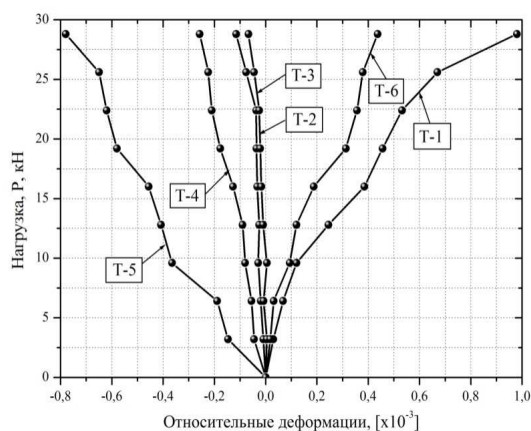


Схема расстановки тензорезисторов на образце I-го типа

Рисунок 6 – Диаграмма относительных деформаций образца I-го типа

Разрушение образцов происходило по пластине, с образованием шейки в растянутой зоне.

Появление больших напряжений в зоне контакта с нагелем или зубом МЗП приводит к изменению физико-механических свойств и структуры древесины. Проведенные эксперименты позволили выявить влияние степени сжатия на прочность и модуль упругости древесины. Для изготовления опытных образцов из сосны использована силовая установка, позволяющая создать всестороннее сжатие до 2,0 ГПа. Испытано две серии по 20 образцов. В первой серии образцы выполнены из обычной древесины. Образцы второй серии выполнены из древесины, модифицированной давлением до 2,0 ГПа.

Эксперименты на сжатие проведены на испытательной машине Instron 3382 при постоянной скорости деформаций 1 мм/мин. Сопоставление диаграмм деформаций на рисунке 7 показало, что разрушение образцов из обычной древесины происходило с выраженной ниспадающей ветвью на диаграмме.

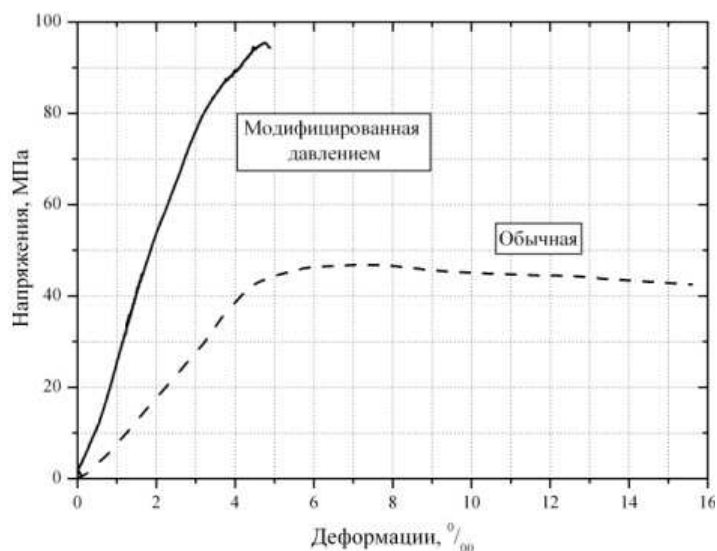


Рисунок 7 – Диаграммы деформаций образцов древесины при сжатии

Прочность на сжатие – 47,0 МПа, модуль упругости  $E= 9,6...10,5$  ГПа. Образцы из модифицированной древесины деформировались пропорционально напряжениям практически до разрушения. Предел прочности древесины, модифицированной давлением, равен 80,4 МПа, модуль упругости – 16,0 ГПа.

**В третьей главе** приводится методика и результаты экспериментальных исследований 2-х сблокированных деревянных натуральных ферм с узловыми соединениями на МЗП с консольными свесами пролетом 7,6 м. Высота в коньке – 2,74 м, уклон верхних поясов – 1:30. Решетка состоит из отдельных стержней – раскосов и стоек. Испытание ферм показано на рисунке 8.



Рисунок 8 – Испытание деревянных ферм с консольными свесами пролетом 7,6 м

Нагрузка создавалась грузами и прикладывалась к узлам верхнего пояса. Измерения перемещений узлов фермы проведено прогибомерами бПАО с ценой деления 0,01 мм. Относительные деформации древесины измерялись посредством тензодатчиков, наклеенных на поверхность деревянных элементов узлов фермы и на МЗП. Для измерения деформаций использован измерительно-вычислительный комплекс МИС-400.

Испытание ферм проведено в соответствии с рекомендациями по испытанию деревянных конструкций. Нагрузка на фермы изменялась в пределах от 0,46 кН/м до 5,0 кН/м. Обе фермы доведены до разрушения.

Результаты испытаний представлены в виде диаграмм перемещений нижних узлов (рис. 9) и относительных деформаций элементов, свидетельствующих об упругопластическом характере деформирования фермы. Схемы расстановки тензорезисторов в коньковом и нижнем приопорном узлах фермы и соответствующие диаграммы относительных деформаций показаны на рисунке 10. Упругие деформации элементов наблюдались в диапазоне нагрузок до 2,53 кН/м. Деформации МЗП конькового узла в упругой стадии изменялись при растяжении до 0,25 ‰, при сжатии – до 0,3 ‰. С увеличением нагрузки до 5,0 кН/м деформации пластины линейно увеличивались. В процессе разрушения фермы деформации сжатия и растяжения увеличились до 1,2 ‰. К началу разрушения на предпоследнем этапе значения продольных и поперечных относительных деформаций были близкими между собой. С увеличением нагрузки

тензорезистор Т-9 вышел из строя, а поперечные деформации (Т-8) увеличились до  $1,0 \text{ ‰}$ . В средней стойке наблюдались растягивающие деформации, изменяющиеся в пределах упругой работы древесины. В процессе разрушения фермы растягивающие деформации средней стойки увеличились и тензорезисторы вышли из строя. Деформации элементов нижнего приопорного узла линейно увеличивались и при нагрузке  $4,29 \text{ кН/м}$  составили  $0,24 \text{ ‰}$ . Значения деформаций увеличивались пропорционально растущим нагрузкам и не выходили за пределы упругих.

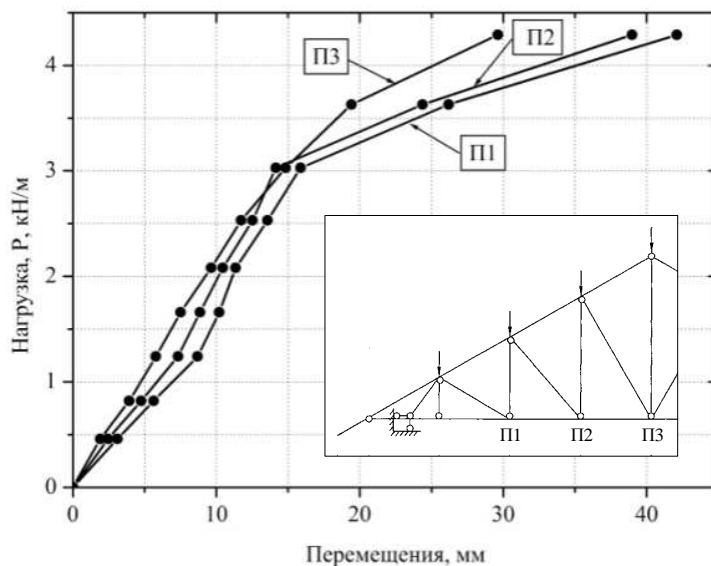


Рисунок 9 – Диаграмма перемещений нижних узлов фермы (П – прогибомер бПАО)

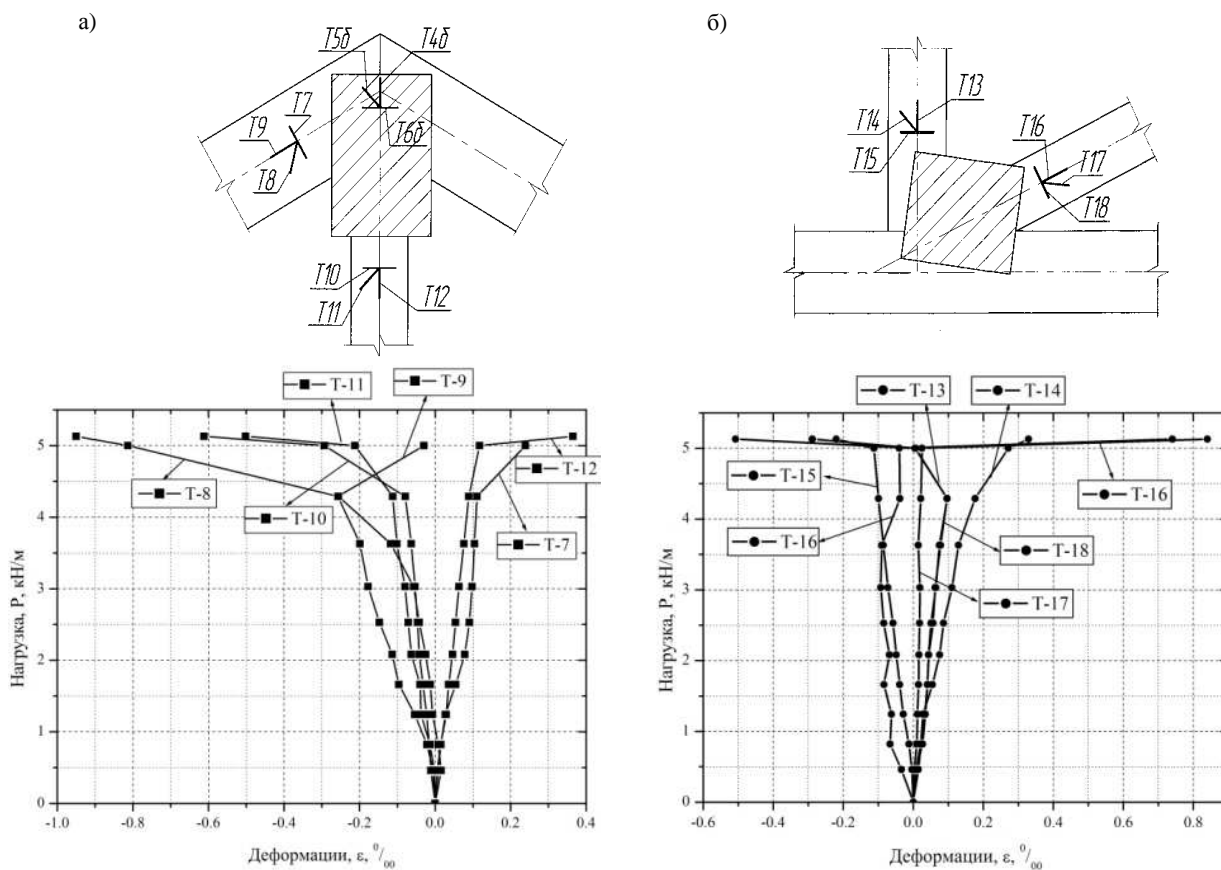


Рисунок 10 – Деформации в коньковом (а) и приопорном (б) узлах фермы

В процессе испытаний проводились измерения динамических параметров фермы и на основе анализа спектров ускорений колебаний определялась стадия напряженного состояния фермы, включая упругую, упругопластическую работу и разрушение (рис. 11). С увеличением нагрузки и с появлением пластических деформаций спектр расширялся, и форма его трансформировалась (рис. 11 б, в). Разрушение фермы произошло при нагрузке 5,0 кН/м. Общий вид конструкции после испытаний и фотография разрушенного нижнего приопорного узла показаны на рисунке 12. По излому верхнего пояса фермы видно разрушение верхнего промежуточного узла. Разрушение нижнего приопорного узла началось с разрыва крайних волокон цельной древесины и свидетельствует о наличии изгибающего момента.

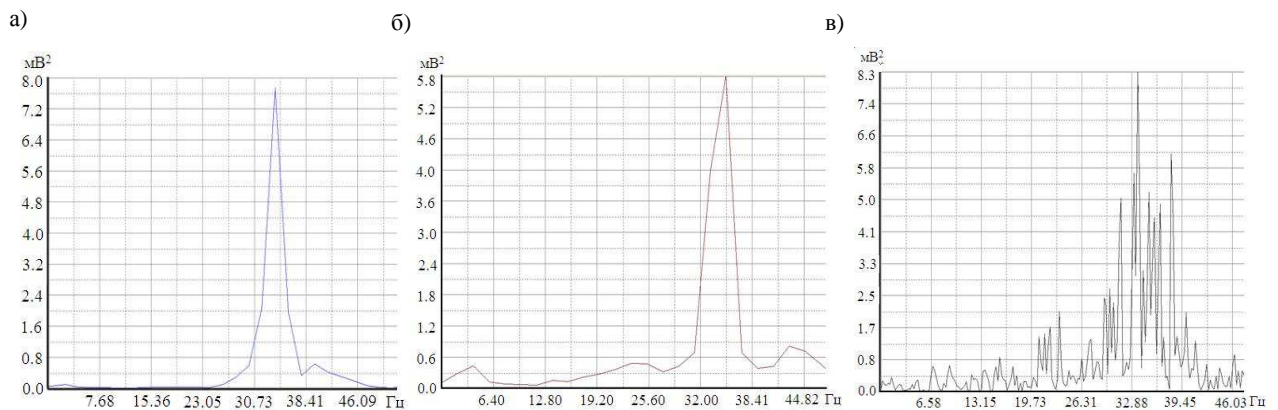


Рисунок 11 – Спектры колебаний фермы: а – упругая работа; б – пластические деформации; в – разрушение фермы



Рисунок 12 – Разрушение фермы и нижнего приопорного узла

**В четвертой главе** рассмотрена задача о взаимодействии зуба МЗП с древесиной. Решение выполнено на основе изотропной и ортотропной моделей. Для изотропной модели принята билинейная диаграмма сжатия, на первом отрезке которой предел пропорциональности  $\epsilon_c = 1,67\text{‰}$ , напряжение  $\sigma_{\text{пц}} = 15,0\text{ МПа}$ , модуль упругости  $E_1 = 9,0\text{ ГПа}$ . На втором отрезке деформации изменяются от  $\epsilon_c = 1,67\text{‰}$  до  $\epsilon_c = 5,71\text{‰}$ , соответствующие напряжения находятся в пределах от  $\sigma_c = 15,0\text{ МПа}$  до  $\sigma_c^{\text{max}} = 46,0\text{ МПа}$ , модуль упругости  $E_2 = 7,0\text{ ГПа}$ .

Диаграмма деформаций древесины при растяжении представлена отрезком прямой с модулем упругости  $E = 9,0$  ГПа. Модуль упругости стали МЗП  $E = 200,0$  ГПа.

Для ортотропной модели приняты следующие значения технических постоянных модулей Юнга, сдвига, коэффициентов Пуассона:

$$\begin{aligned} E_{11} &= 12537,0 \text{ МПа}; & E_{22} &= 373,0 \text{ МПа}; & E_{33} &= 620,0 \text{ МПа}; \\ G_{23} &= 23,6 \text{ МПа}; & G_{13} &= 506,0 \text{ МПа}; & G_{12} &= 632,0 \text{ МПа}; \\ \mu_{23} &= 0,8007; & \mu_{31} &= 0,4290; & \mu_{12} &= 0,0104; \\ \mu_{32} &= 0,4815; & \mu_{13} &= 0,0212; & \mu_{21} &= 0,3487. \end{aligned}$$

На рисунке 13 показан фрагмент МЗП, геометрические размеры зуба из стали марки 05кп ГОСТ 1050-88\*.

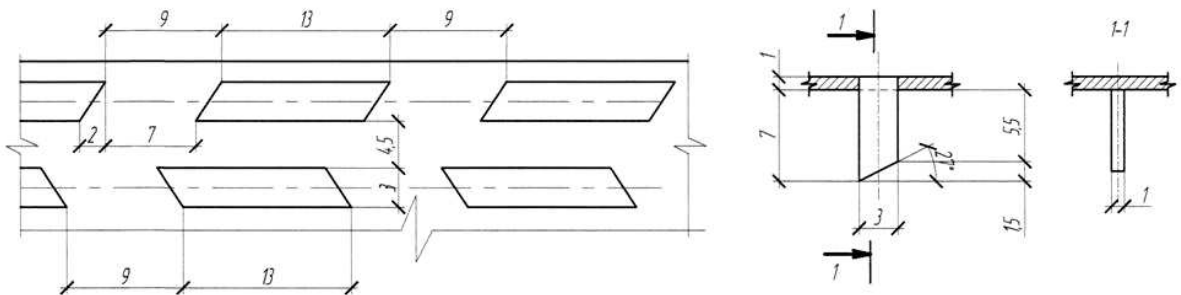


Рисунок 13 – Фрагмент МЗП, размеры зуба

Модель деревянного бруса с внедренным зубом МЗП приведена на рисунке 14. Зуб, имеющий прямоугольное сечение, расположен под углом к направлению действующей нагрузки. Фрагмент бруса закреплён от смещений, пластина может свободно перемещаться по оси  $Y$ , а остальные степени свободы запрещены. По торцу пластины приложено единичное усилие.

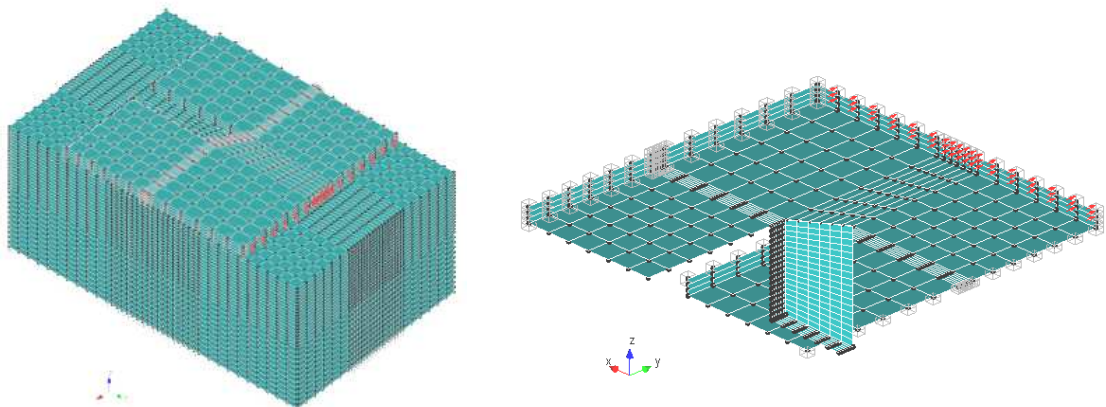


Рисунок 14 – Конечно-элементная модель деревянного бруса с внедренным зубом МЗП

Расчет проведен методом конечного элемента с использованием расчетного комплекса APM Civil Engineering. В основу реализации метода положен метод перемещений.

Связь напряжений  $\sigma(x)$  с деформациями  $\epsilon(x)$  для линейного поведения материала описывается уравнением

$$\bar{\sigma} = D\bar{\epsilon}, \quad (1)$$

где  $D$  – матрица упругости.

Полная потенциальная энергия системы получена суммированием по всем ее элементам:

$$\Pi = \sum_e \Pi^{(e)}, \quad (2)$$

где  $\Pi^{(e)}$  - полная потенциальная энергия элемента.

Минимизация функционала потенциальной энергии дает систему уравнений МКЭ

$$KU = F, \quad (3)$$

где  $K$  – глобальная матрица жесткости и  $F$  вектор узловых сил, полученные путем суммирования соответствующих членов матриц жесткости  $K^{(e)}$  и векторов узловых сил  $f$  отдельных конечных элементов.

Напряженно-деформированное состояние древесины в окрестности зуба МЗП определялось, рассматривая контактное взаимодействие металлической пластины с древесиной. Для решения такой задачи введено понятие «контактных» и «целевых» элементов на поверхности предполагаемого взаимодействия. В нелинейном расчёте контактного взаимодействия «фиктивные контактные» элементы имеют конфигурацию тетраэдра или пирамиды. Основанием для этих элементов служит «контактный» элемент, а вершиной – узел, принадлежащий одному из «целевых» элементов. В данной задаче создано 4 «фиктивных контактных» элемента, соединяющих узлы 1-5-7-3-8, 1-5-7-3-12, 1-5-7-3-14, 1-5-7-3-10. На рисунке 15 показаны номера узлов конечных элементов и расположение «контактного», «целевого» и «фиктивного» элементов.

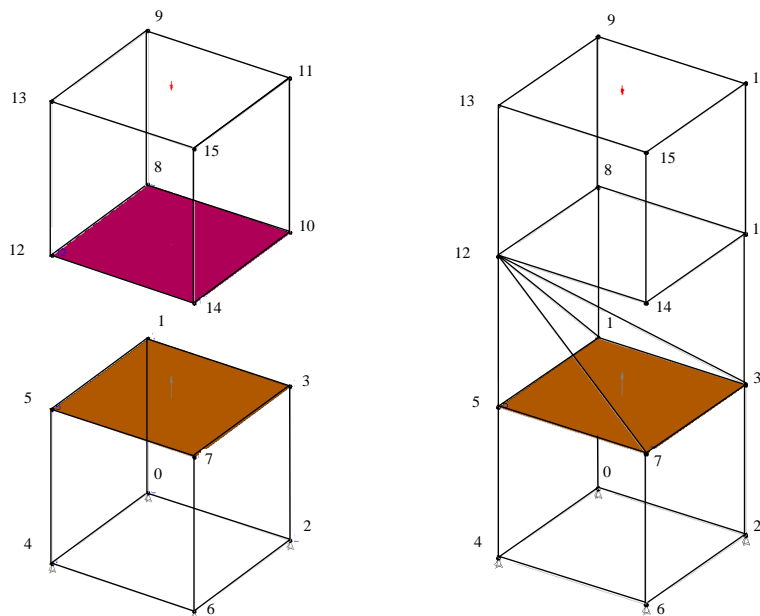


Рисунок 15 – Расположение и нумерация узлов конечных элементов: «контактный» – 1-3-5-7; «целевой» – 8-10-14-12; «фиктивный» – 1-5-7-3-12

На первой итерации жёсткость фиктивных элементов назначается в соответствии с жёсткостью одного из контактирующих элементов (древесины). Далее, на каждой итерации проводится статический расчёт и решается матричное уравнение вида  $[K]\{x\}=\{F\}$ , проверяется условие непроникновения вершины каждого «фиктивного контактного» элемента в его же основание и, в зависимости от расположения вершины, изменяется дополнительное внутреннее усилие в элементе. Критерием сходимости нелинейного расчёта является норма векто-

ра невязки внешних и внутренних усилий. Ранее показано, что в зоне контакта древесины с внедренным стержнем напряжения могут достигать значительных величин. При вдавливании МЗП в древесину на контактной поверхности образуется тонкий слой древесины с повышенным значением плотности и прочности.

Расчетом получено, что значения напряжений от контактной поверхности снижаются по экспоненте. Исходя из результатов расчета, толщина контактного слоя упрочненной древесины принята равной 0,5 мм. На рисунке 16 показана схема контактного взаимодействия зуба и пластины с древесиной. Прочность древесины на сжатие в контактном слое принята  $R^*=86,41$  МПа, модуль упругости  $E=15500$  МПа.

Для определения несущей способности деревянных конструкций в инженерных расчетах используют коэффициенты постели. В сквозных конструкциях угол наклона раскосных элементов может изменяться в широких пределах и решение задачи по определению коэффициента постели в зависимости от угла между действующей силой и направлением волокон представляет практический интерес. В связи с этим решена задача по определению коэффициентов постели, когда угол наклона изменяется от  $0^\circ$  до  $165^\circ$ .

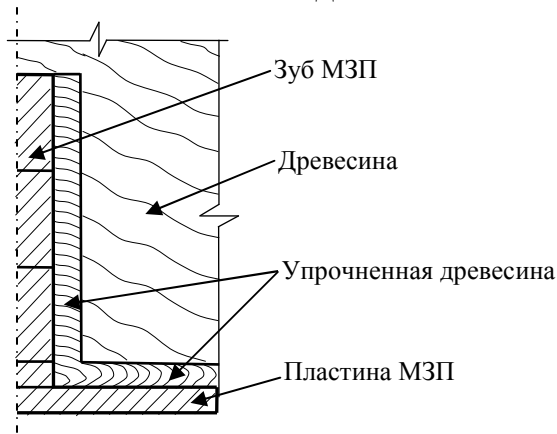


Рисунок 16 – Схема контакта зуба МЗП с древесиной

Для решения задачи использовано уравнение Фусса-Винклера:

$$\sigma_{см} = k_o y, \quad (4)$$

где:  $\sigma_{см}$  – напряжения смятия,  $k_o$  – коэффициент постели,  $y$  – смещение.

Полученные значения коэффициента постели приведены в табл. 1.

На основе полученных результатов разработан инженерный метод расчета прочности узловых соединений исследуемой фермы на МЗП. Для проведения расчета из уравнения 4 определим напряжения на поверхности зуба МЗП. При этом коэффициент постели принимается из табл.1, а значение перемещения по результатам численных исследований равно 0,02. Несущая способность одного зуба равна произведению значения напряжений на площадь поверхности зуба. Прочность соединения определяется умножением несущей способности одного зуба на общее количество зубьев, запрессованных в элемент стыка.

Рассмотрим несущую способность верхнего промежуточного и нижнего приопорного узлов фермы, геометрические размеры и маркировка которых показаны на рисунке 17. Конструкция зуба МЗП показана на рисунке 13, площадь поверхности его равна  $19 \text{ мм}^2$ .

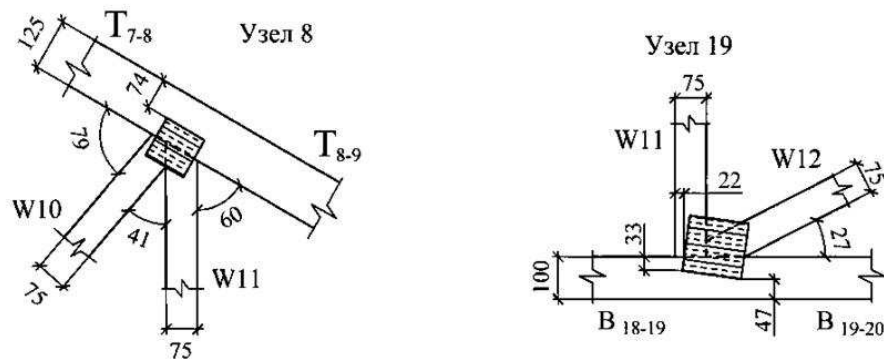


Рисунок 17 – Геометрия и маркировка верхнего промежуточного (№8) и нижнего приопорного (№19) узлов фермы

В узле верхнего пояса №8 сходятся сжатый раскос  $W10$  и сжатая стойка  $W11$ . Рассмотрим расчет стыка раскоса  $W10$ . Число зубьев МЗП, запрессованных в древесину раскоса  $W10$  равно 80. Зубья расположены под углом  $\alpha = 30^\circ$  к направлению волокон. Коэффициент постели по табл. 1,  $k_o = 195 \text{ Н/мм}^3$ . Для расчетов приняты средние значения коэффициентов постели. Несущая способность одного зуба:  $P_i = k_o \cdot y \cdot A_i = 195 \text{ Н/мм}^3 \cdot 0,02 \text{ мм} \cdot 19 \text{ мм}^2 = 74,1 \text{ Н}$ . Прочность стыка:  $P = n \cdot P_i = 80 \cdot 74,1 \text{ Н} = 5038,80 \text{ Н}$ . Продольная сжимающая сила в стойке, определенная расчетом, равна 4782,60 Н. Несущая способность стыка обеспечена.

Таблица 1 – Значение коэффициента постели в зависимости от направления волокон древесины к действующей силе

Угол наклона волокон древесины в градусах	Средняя величина коэффициента постели для каждой точки площадки, $\sum \frac{\sigma_i}{y_i}$	Отношение среднего напряжения к среднему перемещению, $\frac{\sum \sigma_i}{\sum y_i}$	Отношение среднего напряжения к перемещению края пластины, $\frac{\sum \sigma_i}{n \cdot y^*}$
0	322	241	137
15	259	216	136
30	203	195	133
45	152	165	115
60	100	114	82
75	71	79	58
90	61	67	49

Рассмотрим расчет нижнего приопорного узла. В узле №19 сходятся растянутый раскос  $W12$  и сжатая стойка  $W11$ .

Общее количество зубьев МЗП, запрессованных в древесину раскоса  $W12$  в узле равно 54. Зубья расположены под углом  $\alpha = 0^\circ$  к направлению волокон. Коэффициент постели по табл. 1,  $k_o = 241 \text{ Н/мм}^3$ . Несущая способность одного зуба:  $P_i = k_o \cdot y \cdot A_i = 241 \text{ Н/мм}^3 \cdot 0,02 \text{ мм} \cdot 19 \text{ мм}^2 = 91,58 \text{ Н}$ . Прочность стыка:  $P = n \cdot P_i = 54 \cdot 91,58 \text{ Н} = 8242,20 \text{ Н}$ . Продольная растягивающая сила в стойке, определенная расчетом, равна 6903,95 Н. Несущая способность стыка обеспечена.

Общее количество зубьев МЗП, запрессованных в древесину стойки W11 в стыке, равно 110. Зубья расположены под углом  $\alpha = 60^\circ$  к направлению волокон. Коэффициент постели по табл. 1,  $k_o = 114 \text{ Н/мм}^3$ . Несущая способность одного зуба:  $P_i = k_o \cdot y \cdot A_i = 114 \text{ Н/мм}^3 \cdot 0,02 \text{ мм} \cdot 19 \text{ мм}^2 = 43,32 \text{ Н}$ . Прочность стыка:  $P = n \cdot P_i = 110 \cdot 43,32 \text{ Н} = 4765,20 \text{ Н}$ . Продольная сжимающая сила в стойке, определенная расчетом, равна 3333,99 Н. Несущая способность стыка обеспечена.

Приведенный способ оценки несущей способности с использованием коэффициентов постели показал, что предложенный метод может быть использован в практических расчетах несущей способности сквозных деревянных конструкций с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах.

**В пятой главе** проведен расчет узлового соединения из древесины на МЗП при действии растяжения и изгиба. Выполнен расчет треугольной деревянной фермы с узловыми соединениями на МЗП. Моделирование физико-механических свойств древесины и МЗП и расчеты проведены в рамках расчетного комплекса APM Civil Engineering Prof. (Steel-Concrete-Wood St).

Расчет стыкового соединения на изгиб проведен при поэтапном увеличении нагрузки с шагом 3,2 кН. Нагрузка создавалась двумя силами, приложенными в двух третях пролета. Приняты шарнирные опоры. Результаты расчетов при нагрузке 1,47 кН/м узлового соединения I-го типа, показаны на рис. 18 а,б – поля перемещений и напряжений в древесине и на рис. 18 в – напряжения в пластине. Максимальный прогиб в средней части пролета равен 4,0 мм. Соответствующие напряжения в древесине растянутой зоны находятся в диапазоне 3,75...7,50 МПа. Напряжения в крайнем волокне сжатой древесины достигли 10,0 МПа. Напряжения в крайней растянутой фибре пластины равны 110,0 МПа. Вся пластина находится в растянутом состоянии.

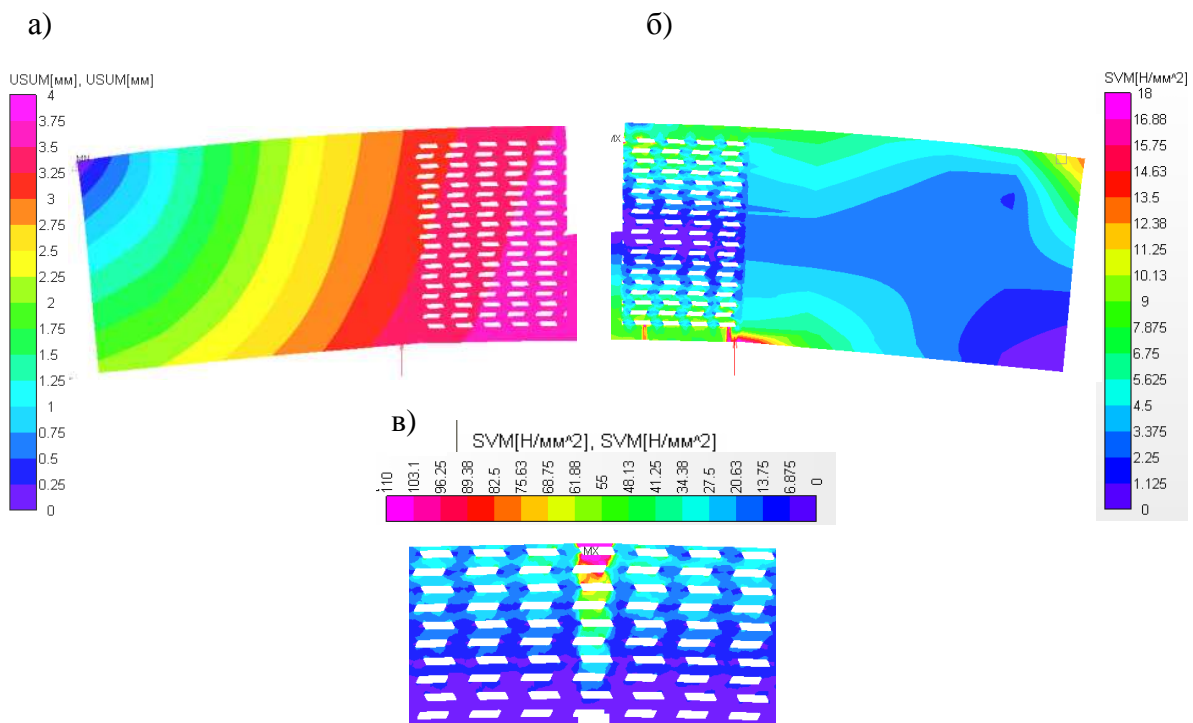


Рисунок 18 – Результаты расчетов узлового соединения I-го типа при нагрузке 1,47 кН/м: а – перемещения, б – напряжения в древесине, в – напряжения в металлической зубчатой пластине

При расчете треугольной деревянной фермы нагрузка увеличивалась поэтапно в соответствии со схемой эксперимента. В силу симметрии конструкции рассмотрено напряженно-деформированное состояние полуфермы.

Выполнено три расчета: 1 - на основе изотропной модели с билинейной диаграммой деформаций древесины при сжатии и линейной при растяжении; 2 - на основе ортотропной модели; 3 - на основе ортотропной модели с учетом слоя упрочненной древесины на контактной поверхности с МЗП.

Результаты расчета приведены для нагрузки 3,63 кН/м, когда в отдельных сечениях фермы появились пластические деформации. Деформированная схема с максимальным прогибом пролета 31,1 мм показана на рисунке 19.

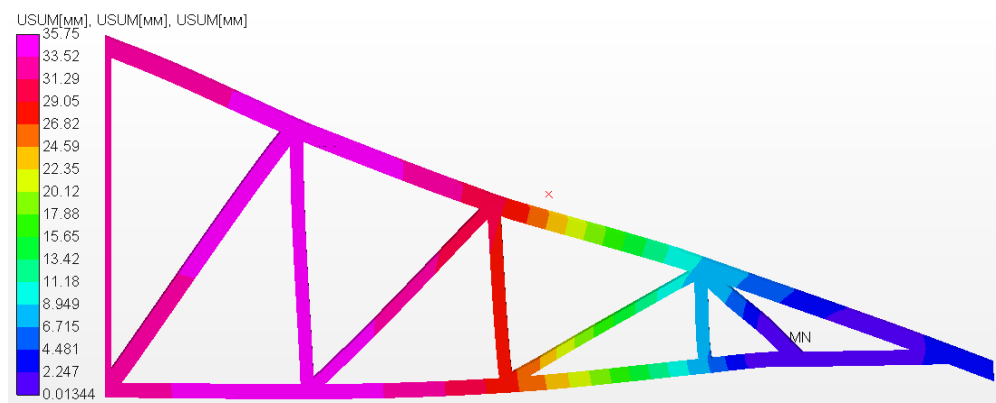


Рисунок 19 – Деформированная схема фермы при нагрузке 3,63 кН/м

Общая картина напряжений в древесине показывает, что наиболее напряженными являются элементы опорного узла. В меньшей степени нагружены узлы верхнего пояса. На рисунке 20 показано напряженное состояние в древесине и в МЗП конькового узла. Локальная зона с максимальными напряжениями в древесине до 20,00 МПа образовалась в зоне сопряжения верхнего пояса со стойкой. Наибольшие напряжения в пластине до 90,0 МПа определены по линии сопряжения верхнего пояса и стойки.

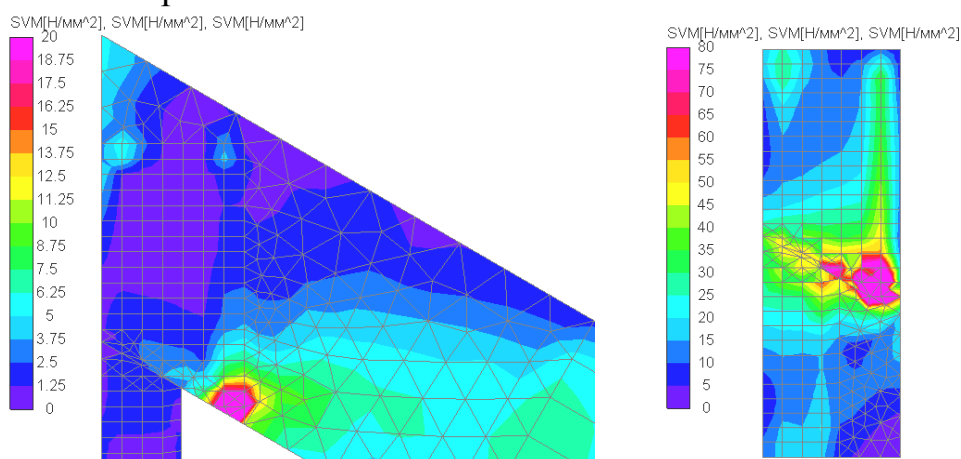


Рисунок 20 – Эквивалентные напряжения (по Мизесу) в древесине и МЗП конькового узла

Характер распределения напряжений в древесине опорного узла фермы и в МЗП показан на рисунке 21. В элементе нижнего пояса образовалась область концентрации напряжений, превышающих предел прочности древесины

и достигающих 52,5...60,0 МПа. Эти напряжения распределены на четверть высоты сечения. Достаточно большие напряжения от 33,75 до 56,25 МПа образовались и в раскосе по контуру верхнего угла МЗП.

В нижней части МЗП, закрепленной на элементе нижнего пояса, напряжения достигли 250,0 МПа. Очевидно, что с увеличением нагрузки разрушение произойдет по конструкции опорного узла.

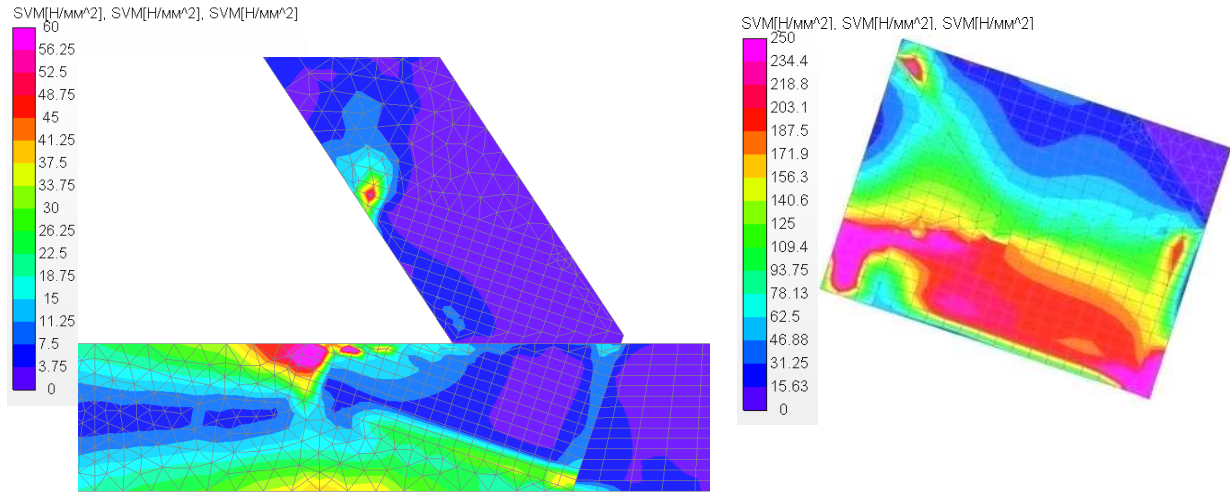


Рисунок 21 – Эквивалентные напряжения (по Мизесу) в древесине и МЗП опорного узла

Сопоставление результатов расчетов с данными экспериментов проведено для узловых соединений I-го типа и треугольной фермы. Для узловых соединений расчетные напряжения ниже экспериментальных в пределах 14,4%.

При сравнении результатов расчетов с данными экспериментов для треугольных ферм рассмотрены стадии упругого при нагрузке 1,24 кН/м и упруго-пластического деформирования при нагрузке 3,63 кН/м. Сравнение проведено по напряжениям в коньковом узле (табл. 2).

Таблица 2 – Сравнение результатов по напряжениям в коньковом узле фермы

Модель	Прогиб нижнего пояса фермы		Напряжения в древесине		Напряжения в МЗП	
	W, мм упруг.	W, мм неупруг.	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа упруг.	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа неупруг.	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа упруг.	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа неупруг.
Эксперимент	8,69	26,2	1,409	3,675	11,97	27,04
Расч. изотр.	1,60	4,43	0,750	2,31	7,50	16,88
Расч. ортотр. с погр. слоем.	10,55	31,10	1,500	3,18	9,38	32,10
Расчет, ортотр.	13,82	38,09	1,875	4,69	18,75	31,25

Сравнение расчетных величин показывает, что результаты наиболее близкие к экспериментальным, получены на основе ортотропной модели, учитывающей упрочненную древесину в контактном слое. Учет работы упрочненной древесины в контактном слое позволяет выявить резерв несущей способности узлового соединения.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Получены новые знания о влиянии изменения физико-механических свойств древесины в контактном слое на несущую способность узловых соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах.

Основные результаты и выводы состоят в следующем.

1. На модельных образцах экспериментально установлены значения напряженного состояния древесины, взаимодействующей с внедренным стержнем в зависимости от уровня нагрузки.

2. На основе полученных экспериментальных данных разработан метод расчета узловых соединений, учитывающий физико-механические свойства древесины в контактном слое с металлической зубчатой пластиной. Определены значения коэффициентов постели в зависимости от направления действующей нагрузки к волокнам древесины сосны, и разработан инженерный метод расчета, позволяющий с точностью, достаточной для решения практических задач, определять несущую способность узловых соединений.

3. Выполнены экспериментальные исследования треугольных деревянных ферм на МЗП на действие статической нагрузки. Установлено, что стадии НДС можно определять на основе анализа частот собственных колебаний в реальных конструкциях при заданном нагружении.

4. Установлено, что при определении напряженно-деформированного состояния деревянных узловых соединений на металлических зубчатых пластинах необходимо учитывать изменение физико-механических свойств древесины в зоне контакта. На примере треугольной фермы с консольными свесами пролетом 7,6 м показано, что расхождение экспериментальных данных с результатами расчетов, с учетом упрочнения древесины не превышает по напряжениям 15,6%, без учета – 27,6%.

### Публикации по теме диссертации

#### Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

1. **Лоскутова, Д.В.** Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния древесины в зоне контакта с нагелем / Д.В. Лоскутова // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 1. – С. 92–96.
2. Копаница, Д.Г. Исследование напряжений в древесине от действия забитого гвоздя на основе реконструктивной обработки данных поверхностного зондирования / Д.Г. Копаница, **Д.В. Лоскутова** // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 1. – С. 86–91. (вклад автора 50%).
3. **Лоскутова, Д.В.** Деформации узловых соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах и жестких нагелях с деревянными и металлическими накладками при действии сжимающих продольных сил / Д.В. Лоскутова // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 2. – С. 100–104.
4. **Лоскутова, Д.В.** Расчет напряженно-деформированного состояния древесины в зоне контакта с металлической зубчатой пластиной / Д.В. Лоскутова // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 3. – С. 149–156.

5. Копаница, Д.Г. Экспериментально-теоретические исследования треугольной деревянной фермы на металлических зубчатых пластинах / Д.Г. Копаница, Л.И. Офицера, **Д.В. Лоскутова** // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 3. – С. 164–170. (вклад автора 40%).
6. **Лоскутова, Д.В.** Экспериментальные исследования узловых соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах при изгибе / Д.В. Лоскутова // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 4. – С. 74–80.

#### Публикации в других печатных изданиях

7. Копаница, Д.Г. Прочность и деформации древесины сосны, модифицированной высоким давлением / Д.Г. Копаница, Д.В. Лычагин, Л.И. Офицера, **Д.В. Лоскутова** // Строительство: материалы, конструкции, технологии: материалы IV Межрегиональной науч.-техн. конф. – Братск : ГОУ ВПО «БрГУ», 2006. – 187 с. (вклад автора 20%).
8. **Лоскутова, Д.В.** Анализ разрушения деревянной фермы с соединением на металлических зубчатых пластинах / Д.В. Лоскутова // Строительство: материалы, конструкции, технологии: материалы V Межрегиональной науч.-техн. конф. – Братск : ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – 203 с.
9. **Лоскутова, Д.В.** Частотно-временной анализ деревянной фермы с соединениями на МЗП / Д.В. Лоскутова // Актуальные проблемы современного строительства: сб. материалов 60-й междунар. науч. - техн. конф. – СПб : СПбГАСУ, 2007. – С. 114 – 118.
10. **Лоскутова, Д.В.** Податливость узловых соединений деревянных элементов на МЗП и жёстких нагелях с деревянными и металлическими накладками / Д.В. Лоскутова // Строительство: материалы, конструкции, технологии: материалы VI Межрегиональной науч. - техн. конф. – Братск : ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – 198 с.
11. Копаница, Д.Г. Исследование напряжений в области контакта древесины с нагелем методом поверхностного зондирования. / Д.Г. Копаница, **Д.В. Лоскутова**, С.П. Лукьянов // Материалы Международной IEEE-Сибирской конференции по управлению и связи (SIBCON-2009). – Томск : ГОУ ВПО «ТУСУР», 2009. – С. 332 – 337. (вклад автора 30%).

**Лоскутова Диана Владимировна**

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ УЗЛОВЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ  
ПЛАСТИНАХ В СКВОЗНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

Изд. лиц. №021253 от 31.10.97 г.

Подписано в печать 22.05.09г. Формат 60x84/16.

Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Усл.-печ.л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ №217

Изд-во ГОУ ВПО «ТГАСУ», 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП ГОУ ВПО «ТГАСУ»,  
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.