

На правах рукописи



**Лисицкий Иван Иванович**

**ДЕРЕВЯННЫЕ ФЕРМЫ С УЗЛАМИ  
НА СТАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЯХ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Пенза – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Оренбургский государственный университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
**Жаданов Виктор Иванович**

Официальные оппоненты – **Рощина Светлана Ивановна**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный  
университет имени Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых»,  
заведующий кафедрой «Строительные  
конструкции»

– **Котлов Виталий Геннадьевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный  
технологический университет»,  
профессор кафедры «Строительные  
конструкции и водоснабжение»

Ведущая организация – **ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный архитектурно-  
строительный университет»**  
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 8 декабря 2022 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.356.01, созданного на базе Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/24-2-356-01/2-uncategorised/119-122-lisickiy-ivan-ivanovich>.

Автореферат разослан 8 октября 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Снежкина  
Ольга Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Техничко-экономическая эффективность и эксплуатационная надежность деревянных ферм во многом определяются конструктивными решениями их узловых сопряжений, которые решают при помощи стальных связей. В качестве связей используют гвозди, шурупы, винты, нагели, болты, зубчатые пластины и шайбы. Эти варианты имеют свои достоинства, при этом их общими недостатками являются ограниченная несущая способность и податливость. Способом устранения этих двух недостатков является применение в узлах клеенных арматурных стержней.

Вклеенные стержни, обычно, применяют для соединения элементов, выполненных из клееной древесины в случаях перекрытия больших пролетов (свыше 24 метров). В фермах из цельной древесины (при пролетах 18 и менее метров) из-за нормативных требований по вклейке стержней такой способ решения узлов зачастую неприменим. Представляется рациональным использовать для цельной древесины другие типы клеенных стальных элементов. Одним из решений этой проблемы является применение для соединения элементов ферменных конструкций из цельной древесины клеенных плоских стержней (пластин). Однако, в отечественной и зарубежной литературе какие-либо рекомендации по применению таких соединительных элементов в деревянных фермах отсутствуют.

**Степень разработанности темы.** Узловые соединения, реализованные при помощи стальных связей в виде гвоздей, нагелей, зубчатых пластин и шайб и т.п., в России теоретически и экспериментально исследовались в Москве (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, МГСУ), Санкт-Петербурге (СПбГАСУ), Новосибирске (НГАСУ), Владимире (ВлГУ), Красноярске (ИСИ СФУ), Нижнем Новгороде (ННГАСУ), Йошкар-Оле (ПГТУ), Архангельске (САФУ), Пензе (ПГУАС), такими учеными как Вдовин В.М., Инжутов И.С., Котлов В.Г., Лабудин Б.В., Линьков В.И., Наумов А.К., Орлович Р.Б., Погорельцев А.А., Пуртов В.В., Рощина С.И., Серов Е.Н., Турковский С.Б., Черных А.Г., Шапошников В.Н, Шмидт А.Б и другими. Внедрение в практику новых типов соединений позволяло повышать жесткость и несущую способность конструкций, а также расширяло область их применения.

Новый скачок в области узловых соединений деревянных ферм был достигнут за счет применения стальных клеенных арматурных стержней. Так называемая «система ЦНИИСК», разработанная С.Б. Турковским, обеспечивала жесткость и высокую прочность узловых соединений в сравнении с отечественными и зарубежными аналогами и позволила возвести множество зданий различного назначения на основе клееной древесины.

Конструктивные решения узловых соединений деревянных ферм на основе клеенных стальных пластин были предложены в 1964 году в СоюздорНИИ совместно с ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Однако проведенные испытания узлов показали их малую несущую способность из-за плохой адгезии клея к поверхности стальной пластины, в связи с чем исследования были остановлены.

В начале 2000-х годов российским ученым П.А. Дмитриевым было предложено обрабатывать поверхности клеиваемых частей. Это предложение было реализовано в Оренбургском государственном университете применением пластин с профрезерованными в них пазами. Но работа была выполнена с одним вариантом обработки поверхности пластин и при их работе только на выдергивание в направлении вдоль волокон, что и было заложено в методику расчета. Этот факт делает данную методику неприменимой к узлам деревянных ферм, в которых клеенные пластины работают на выдергивание-вдавливание под различными углами по отношению к волокнам древесины.

О дальнейших исследованиях деревянных ферм с узлами на клеенных стальных плоских стержнях сведения в технической литературе отсутствуют.

**Цель работы:** разработка и экспериментально-теоретические исследования деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях с совершенствованием методики их конструирования и расчета.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие взаимосвязанные **задачи**:

- выполнить анализ научно-технической и патентной литературы для обобщения отечественного и зарубежного опыта применения в строительстве деревянных ферм и определения путей совершенствования их узловых соединений;
- провести численные исследования и определить рациональные конструктивные мероприятия по увеличению несущей способности соединений на стальных плоских стержнях, клеенных в массив древесины, с экспериментальным подтверждением адекватности полученных результатов;
- провести опытно-конструкторские разработки деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях с определением их технико-экономических характеристик;
- подтвердить теоретическую степень прочности и жесткости разработанных конструкций ферм и их узлов экспериментальными методами;
- разработать методику расчета и конструирования ферм с узлами на стальных плоских стержнях и оценить их технико-экономическую эффективность;
- внедрить в строительную практику и учебный процесс результаты выполненной работы.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- разработаны новые конструктивные решения деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях с отверстиями, клееными на эпоксидный клей в пазы, выбранные в деревянных поясах и элементах решетки, что обеспечивает требуемую степень прочности и жесткости узловых соединений;
- предложены конечно-элементные модели узловых соединений деревянных ферм на стальных плоских стержнях с экспериментальным подтверждением их адекватности, позволяющие объективно оценивать напряженно-деформированное состояние как самих узлов, так и деревянных ферм в целом, разработанных на основе предложенного типа узловых соединений;
- доказано влияние на работу узловых соединений шага и диаметра отверстий, выполненных во клеиваемой в древесину части стальных плоских стержней с экспериментальным подтверждением полученных результатов, а

также перспективность применения разработанных типов деревянных ферм в строительной практике;

- введены новые расчетные формулы и коэффициенты в усовершенствованную методику расчета деревянных ферм с узлами на стальных клеенных плоских стержнях.

#### **Теоретическая значимость работы:**

- доказана возможность применения в строительстве деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях с отверстиями, отличающиеся от известных аналогов повышенной несущей способностью и технико-экономической эффективностью, как по расходу материалов, так и по трудоемкости изготовления;

- применительно к тематике диссертации эффективно использованы современные численные методы и высокоинформативные экспериментальные методики исследования деревянных ферм и их узловых сопряжений, в том числе методы статистической обработки экспериментальных данных и испытания натурных конструкций;

- изложены положения аналитического расчета рассматриваемого класса деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях с определением их деформативности и максимальной несущей способности;

- раскрыт принцип повышения прочности клеевого соединения стальных плоских стержней с древесиной, который заключается в высверливании по всей площади стержней сквозных отверстий диаметром 10-18 мм с общей площадью не менее 30 % от площади вклеиваемой части стержня и с расстояниями от оси отверстия не менее  $1d$  до продольных и поперечных кромок стержня и  $1,5d$  между осями отверстий, за счет чего обеспечивается прочность соединения по слою «клей-пластина» до разрушения древесины от скалывания;

- изучены закономерности влияния на работу узловых соединений шага и диаметра отверстий, выполненных во вклеиваемой в древесину части стальных плоских стержней, а также угла приложения силы по отношению к продольной оси стержня;

- проведена модернизация алгоритмов расчета деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях с высверленными в них отверстиями, выведены и доказаны экспериментально-теоретические аппроксимационные формулы, характеризующие влияние на соединение геометрических параметров стержней и угла приложения силы по отношению к продольной оси вклеенного стержня.

#### **Практическая значимость работы:**

- разработаны и внедрены в строительную практику новые типы деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях с высверленными в них отверстиями;

- обоснована методика конструирования и расчета деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях с отверстиями, позволяющая учитывать фактические параметры узлов и устраняющая недостаточность отечественных нормативных документов в части проектирования рассматриваемого класса конструкций;

- определены диапазоны варьирования геометрических параметров вклеиваемых плоских стержней и высверливаемых в них отверстий,

обеспечивающие их технико-экономическую эффективность и эксплуатационную надежность предложенных типов конструкций;

- создана практическая методика расчета и рекомендации по конструированию и изготовлению предложенных типов конструкций;

- представлена оценка технико-экономической эффективности применения в строительстве деревянных ферм, узловые сопряжения которых выполнены с применением клеенных стальных плоских стержней.

**Методология и методы диссертационного исследования.** В работе используется экспериментально-теоретический метод. В теоретических исследованиях использованы общие методы строительной механики и теории расчета деревянных конструкций. Физический эксперимент выполнен с использованием современного аттестованного измерительно-вычислительного оборудования в лаборатории проблемных испытаний Оренбургского государственного университета, что обеспечило необходимую достоверность полученных результатов.

**Положения, выносимые на защиту:**

- новые конструктивные решения деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях, клеенных в массив древесины;

- аналитическое решение задачи по определению несущей способности клеенных в массив древесины стальных плоских стержней;

- результаты исследования рациональных способов обработки поверхностей стальных плоских стержней, основанных на высверливании сквозных отверстий и обеспечивающих их эффективную работу и экономичность;

- оценка напряженно-деформированного состояния предложенных типов ферм с учетом влияния на работу узловых соединений шага и диаметра отверстий, выполненных во вклеиваемой в древесину части стальных плоских стержней, проведенная при помощи численных исследований;

- результаты экспериментальных исследований предложенных типов ферм и их узловых соединений при кратковременном и длительном действии нагрузок;

- методика расчета и рекомендации по конструированию и изготовлению узловых соединений деревянных элементов на стальных клеенных плоских стержнях, а также результаты их технико-экономической оценки.

**Степень достоверности полученных результатов работы** обеспечивается:

- для экспериментальных работ использованием сертифицированного оборудования, прошедшего метрологическую поверку;

- теория построена на использовании известных подходов теории упругости, строительной механики и теории расчета деревянных конструкций, сопоставлении теоретических данных с экспериментальными;

- идея базируется на анализе опыта применения в строительстве деревянных ферм с использованием различных типов соединительных элементов, а также на анализе контактных процессов взаимодействия древесины с клееными в нее стальными элементами;

- использовано сравнение авторских данных и данных других авторов, полученных ранее при разработке и исследовании узловых соединений с

вклеенными стальными элементами;

- установлено качественное и количественное совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях с отверстиями;

- использованы современные методики сбора и обработки исходной информации, аналитические решения и программные комплексы.

**Апробация полученных результатов.** Результаты выполненных исследований докладывались:

- на 2-ой Международной научно-технической конференции «Инновационные строительные технологии, теория и практика», Оренбург, ОГУ, 2015 г.;

- на Всероссийских научно-методических конференциях «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры», Оренбург, ОГУ, 2016 – 2022 г.г.;

- на IX-XV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства», Новосибирск, НГАСУ, 2016 – 2022 г.г.;

- на Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: перспект Свободный», Красноярск, СФУ, 2016 – 2017 г.г.;

- 74-ой Международной научно-технической конференции "Традиции и инновации в строительстве и архитектуре", Самара, СГАСУ, 2017 г.;

- на 4-ой Всероссийской конференции «Проблемы оптимального проектирования сооружений», Новосибирск, НГАСУ (Сибстрин), 2017 г.;

- на XIII Международной молодёжной научной конференции по естественно-научным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых», Йошкар-Ола, ПГТУ, 2018 г.;

- на Международной молодёжной научной конференции «Студенческие научные общества – экономике регионов», Оренбург, ОГУ, 2018 г.;

- на VII Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», Новосибирск, НГАСУ (Сибстрин), 2018 г.;

- на III Международной научно-технической конференции «Деревянные конструкции: разработка, исследование, применение», Москва, ЦНИИСК, 2019 г.;

- на III Международной научно-технической конференции “International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering”, (MPCPE-2022), Владимир, ВлГУ, 2022 г.

В законченном виде работа рассмотрена и одобрена на расширенном научном семинаре кафедры «Строительные конструкции» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, 2022 г.

#### **Внедрение результатов работы:**

- предложенные типы деревянных ферм нашли применение в проектах: малоэтажных жилых домов, зданий и сооружений производственного и сельскохозяйственного назначения, складских зданиях (всего шесть объектов);

- материалы исследований и альбомы рабочих чертежей разработанных ферм

переданы для внедрения по запросу Министерству строительства, жилищно-коммунального и дорожного хозяйства Оренбургской области;

- рабочие чертежи разработанных ферм переданы по запросам для внедрения в строительном комплексе России в строительные организации и проектные институты: ЗАО «Оренбурггражданпроект», ООО «НТЦ-Промтехнология», ООО «Альтитуда», ООО «Технология», АО «Оренбургский станкозавод», (г. Оренбург), АО «Механический завод» (г. Орск), АО «Марийскгражданпроект» (г. Йошкар-Ола) для внедрения в строительном комплексе России;

- материалы исследований включены в разделы курсов «Конструкции из дерева и пластмасс», «Инновационные конструкции из дерева и полимеров» и «Индустриальные деревянные конструкции для малоэтажного строительства», которые читаются студентам профилей ПГС и ГС ОГУ (г. Оренбург), ПГТУ (г. Йошкар-Ола), архитектурно-строительного института УГНТУ (г. Уфа).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе семь работ в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Получено семь патентов РФ на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 154 наименований и приложения. Общий объем работы – 204 страницы, в том числе 100 рисунков, 18 таблиц, семь страниц приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В первой главе** дан обзор работ, соответствующих теме диссертации, проанализированы известные типы узлов деревянных ферм на механических связях и клеенных элементах, разработанные отечественными и зарубежными учеными. Отмечено, что известные конструктивные решения узловых сопряжений элементов деревянных ферм не лишены ряда серьезных недостатков. На основе критического анализа широкого круга рассматриваемого класса конструкций, их узловых соединений и проведенных пилотных экспериментов определены пути их совершенствования, конкретизирована цель и задачи исследований.

Численным и экспериментальным исследованиям характера работы стальных плоских стержней в соединениях элементов ферменных конструкций посвящена **вторая глава** диссертации. Целью проведенных исследований являлось изучение фактического напряженно-деформированного состояния и его учет при расчете предложенного типа соединений. Для исследования работы узлов деревянных ферм в программном комплексе ANSYS были созданы конечно-элементные модели экспериментальных образцов, с геометрическими и механическими параметрами, идентичными параметрам натуральных образцов, на которых в дальнейшем и выполнялись экспериментальные исследования.

С целью выполнения расчета сборочной единицы в ПК ANSYS был задан тип физического анализа, тип расчета – статический расчет. Выбран тип конечного элемента – Solid 185 как описывающий деформации материала с

учетом пластичности, ползучести в условиях больших и малых перемещений. Общий вид импортированной модели в среде ANSYS Mechanical представлен на рисунке 1,а. Далее, в препроцессинге, была автоматически сгенерирована конечно-элементная сетка для сборочной единицы, показанная на рисунке 1,б.

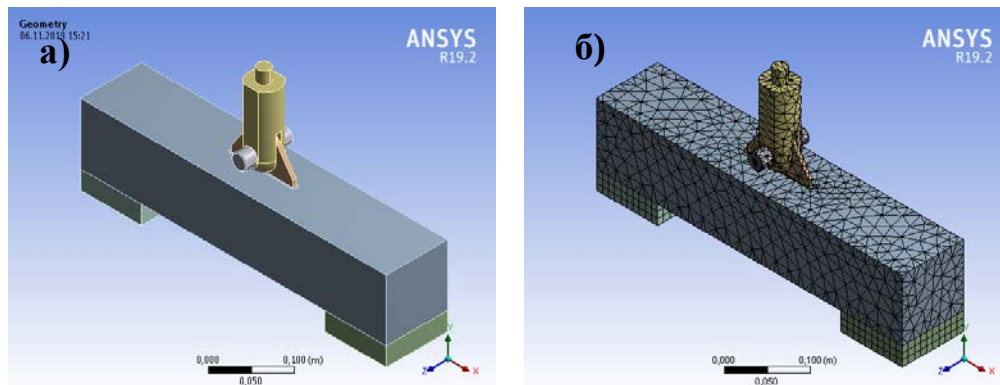


Рисунок 1 – Вид конечно-элементной модели для проведения численных исследований: а – общий вид модели; б – конечно-элементная сетка

С учетом проведенных опытно-конструкторских разработок ферм для пролетов 9-18 метров, из условия обеспечения равнопрочности составных элементов узлов при проведении численных исследований в качестве варьируемых параметров и их диапазонов принимали:

- характер работы вклеенного стержня – на выдергивание или вдавливание;
- ширина стержня  $b_{cm}$  – 50 – 100 мм при его толщине  $t_{cm}$  от 4 до 10 мм;
- длина стержня  $l_{cm}$  – 50 – 650 мм, длина фасонки  $l_{\phi}$  – 50 – 150 мм;
- поперечное сечение бруса от 100×100 мм до 225×225 мм с шагом 25 мм;
- угол приложения силы  $\alpha$  по отношению к волокнам древесины – 0°, 30°, 45°, 60°, 90° (0° в базовом варианте для сопоставления результатов с ранее проведенными исследованиями).

В результате проведенных численных исследований получены характерные картины распределения нормальных напряжений во вклеенном стержне при его работе на выдергивание при различных параметрах. Пример такой картины для стержня длиной 650 мм, шириной 100 мм, толщиной 4 мм при длине соединительной фасонки 150 мм и угле приложения силы 90° и действующей силе 91 кН показан на рисунке 2.

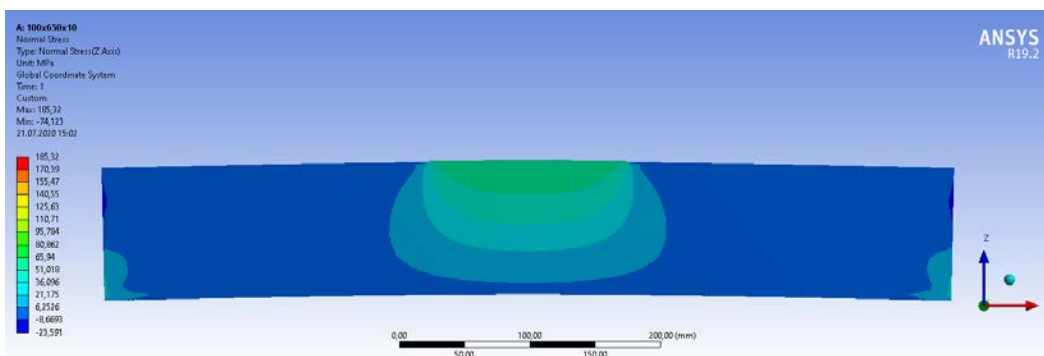


Рисунок 2 – Пример картины распределения нормальных напряжений во вклеенном стержне при его работе на выдергивание

Анализ полученных результатов позволил констатировать следующее.

1. Качественные картины распределения нормальных и касательных напряжений во всех исследуемых моделях при варьировании вышеперечисленными параметрами при работе на выдергивание или вдавливание практически совпадали.

2. Усилия от раскосов или стоек фермы передаются на вклеенный стержень при помощи фасонки, длина которой в несколько раз меньше длины самого стержня. В связи с этим за счет изгибной жесткости стержня нормальные напряжения в нем распределяются неравномерно (рисунок 2). При этом, картины распределения этих напряжений зависят от соотношения длины стержня  $l_{ст}$  к длине фасонки  $l_{ф}$ , а также от ширины  $b_{ст}$  и толщины  $t_{ст}$  вклеиваемого стержня.

3. Анализ картин, аналогичных приведенной на рисунке 2, показал, что наибольшее влияние на степень неравномерного распределения нормальных напряжений по длине вклеенного стержня оказывает соотношение  $l_{ст} / l_{ф}$ , а также ширина стержня  $b_{ст}$ . При изменении толщины стержня от 4 мм до 10 мм величина неравномерности распределения напряжений изменяется не более чем на 6 %. Аналогичная неравномерность проявляется и в характере распределения касательных напряжений в древесине в зоне контакта «клей-древесина». Это связано с тем, что нормальные напряжения для вклеенного плоского стержня и вызывают скалывание по упомянутому шву.

Степень неравномерности распределения касательных напряжений по плоскости стержня можно оценить при помощи коэффициента неравномерности  $k_n$ , значение которого можно определить из соображения, что при условии равномерного распределения максимальных касательных напряжений обеспечивалась та же доля участия стержня при работе его в узле, какую он имеет при действительном неравномерном распределении напряжений. Эту зависимость можно записать в виде:

$$2 \cdot \tau_{max} \cdot l_{ст} \cdot k_n \cdot b_{ст} = N = 2 \cdot b_{ст} \cdot \int_0^l \tau \cdot d_y, \quad (1)$$

где 2 – две площадки скалывания у вклеенного плоского стержня;

$\tau_{max}$  – максимальные касательные напряжения, действующие в стержне.

Тогда:

$$k_n = \frac{\int_0^l \tau \cdot d_y}{\tau_{max} \cdot l_{ст}}. \quad (2)$$

В результате анализа работы вклеенных стержней при различных варьируемых параметрах определены числители в выражении (2) и найдены фактические величины коэффициента неравномерности  $k_n$  (рисунок 3). При анализе результатов численных расчетов также выявлено, что в случае варьирования угла приложения силы по отношению к волокнам древесины от 30° до 90° значения коэффициента  $k_n$  практически не изменялись. Величина изменения не превышала 4 % в сравнении с результатами, приведенными на рисунке 3 для случая выдергивания поперек волокон.

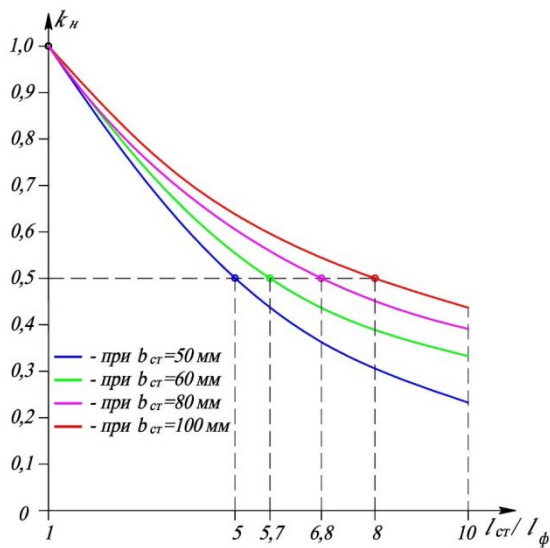


Рисунок 3 – Графики зависимости коэффициента  $k_n$  от соотношения  $l_{cm} / l_\phi$  и  $b_{cm}$

4. Проведенные численные расчеты показали высокую жесткость предложенного способа соединения элементов в узлах ферменных конструкций. При этом величины смещения вклеенных стержней относительно массива древесины существенно зависят от угла приложения силы по отношению к волокнам древесины. Например, при расчётных нагрузках смещение стержня относительно массива древесины при его выдергивании в направлении вдоль волокон составило 0,004 мм, а при выдергивании в направлении поперек волокон 0,082 мм. Под углами  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  такие смещения составили 0,015 мм, 0,029 мм и 0,053 мм соответственно, что значительно ниже предельно допускаемых величин для известных типов соединения.

Для подтверждения адекватности численных исследований, определения значений разрушающих нагрузок были проведены их экспериментальные исследования. Для натурного эксперимента было подготовлено 6 серий образцов, которые отличаются параметрами плоских стальных стержней (рисунок 4). Количество образцов принималось равным пяти для каждой серии.

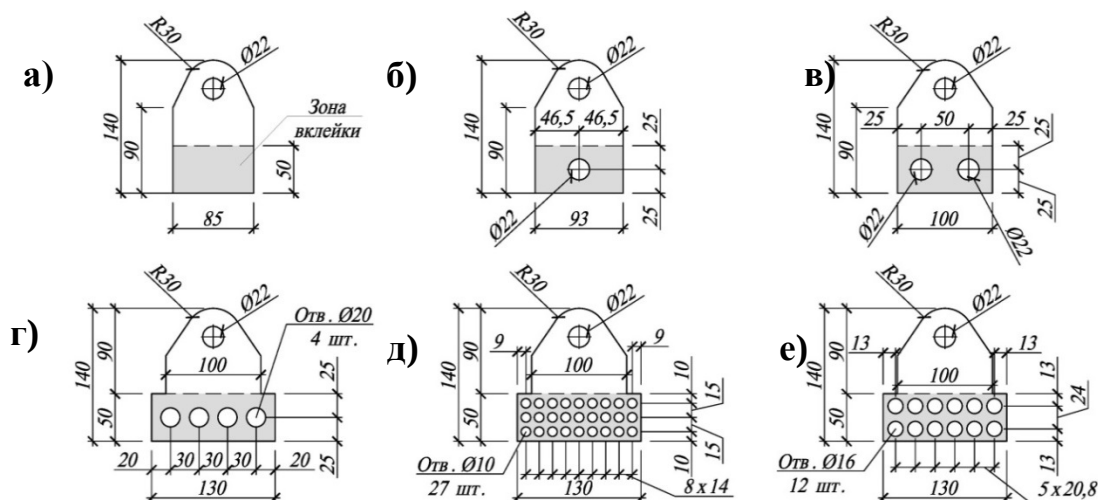


Рисунок 4 – Схемы плоских стальных стержней для серий натурных образцов

Анализ графиков по рисунку 3 показал, что для повышения эффективности работы вклеенных стержней целесообразно ограничивать длину вклейки в зависимости от длины фасонки. Принимая по аналогии с вклеенными арматурными стержнями и пластинами, работающими на выдергивание в направлении вдоль волокон древесины, ограничение на коэффициент  $k_n$ , равный 0,5, при ширине стержня 50 мм его длину рекомендуется принимать не более  $5l_\phi$ , при ширине стержня 100 мм – не более  $8l_\phi$ . При промежуточных значениях ширины стержня рекомендуемые величины длин стержней определять по интерполяции.

На боковые грани бруса устанавливали индикаторы часового типа для измерения перемещения вклеенного плоского стержня относительно бруса с ценой деления 0,001 мм (рисунок 5).

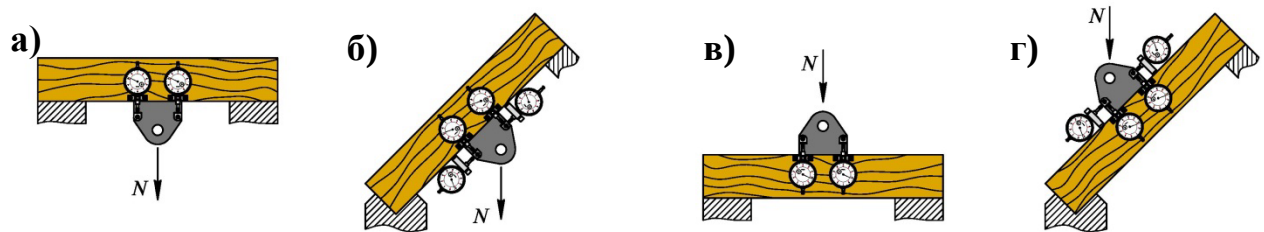


Рисунок 5 – Схемы нагружения образцов и расстановка приборов при испытании:

а – выдергивание поперек волокон; б – выдергивание под углом к волокнам;  
в – вдавливание поперек волокон; г – вдавливание под углом к волокнам

Эксперименты проводились на испытательной машине ИР 5082-100. Испытание образцов выполнялось в режиме непрерывного нагружения с постоянной скоростью 0,01 кН/с. Величина ступеней составляла 2 кН (0,1 от ожидаемой величины разрушающего усилия). Время выдержки на снятие показаний было одинаково для всех ступеней.

Анализ результатов, полученных в процессе испытаний, позволил выявить эффект влияния отверстий на несущую способность соединений. При хрупком характере разрушения всех образцов выявлены различия в площадках скалывания. Так, в образцах первых трех серий (рисунок 4, а-в) разрушение от скалывания произошло в основном по шву «клей-металл», а в образцах четвертой-шестой серий по шву «клей-древесина» (рисунок 6). Аналогичный характер наблюдался и при выдергивании стержней под углом  $45^\circ$ .

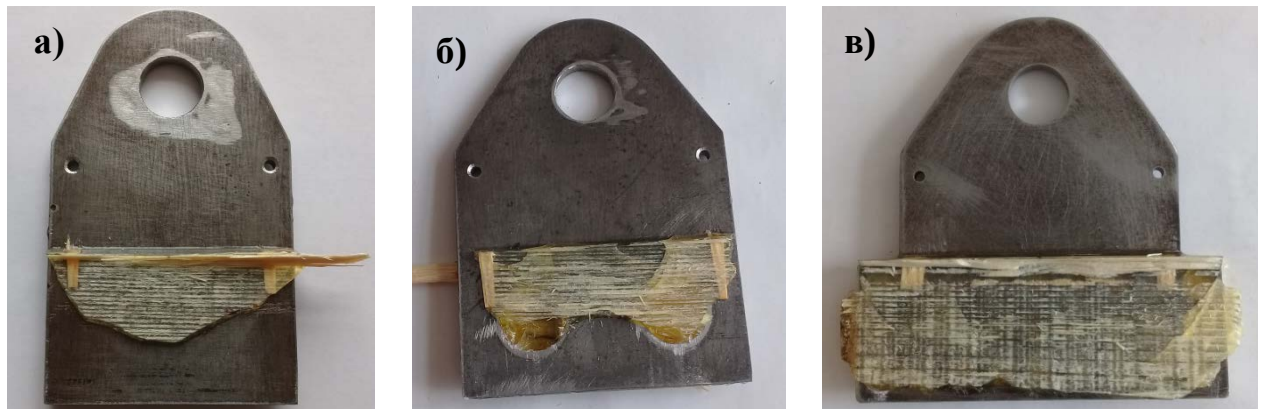


Рисунок 6 – Характер разрушения образцов при выдергивании стержней под углом  $90^\circ$  первой (а), третьей (б) и шестой серий (в)

С повышением величины отношения площади отверстий к общей площади вклеиваемого плоского стержня увеличивается несущая способность соединения (рисунок 7,а). Следует отметить, что на несущую способность вклеенного плоского стержня также влияет и плотность заполнения поверхности стержня отверстиями, измеренная в штуках на единицу площади, например, штук/мм<sup>2</sup>. Как видно из рисунка 7,б, для пятой серии при показателе плотности отверстий 0,004 штук/мм<sup>2</sup> разрушающая нагрузка составила 31,30 кН, а для аналогичной по

площади шестой серии при рассматриваемом показателе  $0,002$  штук/ $\text{мм}^2$  значение разрушающей нагрузки падает до  $28,62$  кН или на  $9\%$ .

Повышение несущей способности одновременно сопровождается снижением деформативности соединения. Например, при нагрузке  $4$  кН величина смещения стержня относительно массива древесины составила  $0,360$  мм для первой серии,  $0,064$  мм – для третьей серии и  $0,045$  мм – для пятой серии.

Выявлено, что в случаях приложения силы под углом к волокнам древесины наибольшая несущая способность соединения достигается при центрации узла по геометрическому центру клеенной части стержня. Также результаты проведенного эксперимента показали, что значение разрушающей нагрузки уменьшается с увеличением угла приложения силы по отношению к продольной оси клеиваемой части стержня прямо пропорционально изменению расчетного сопротивления древесины скалыванию под углом к волокнам древесины  $R_{\text{ск}}^{\alpha}$ . Этот факт позволяет применить это расчетное сопротивление при практическом расчете узлов ферм на стальных клеенных плоских стержнях с учетом соответствующих корректировочных коэффициентов.

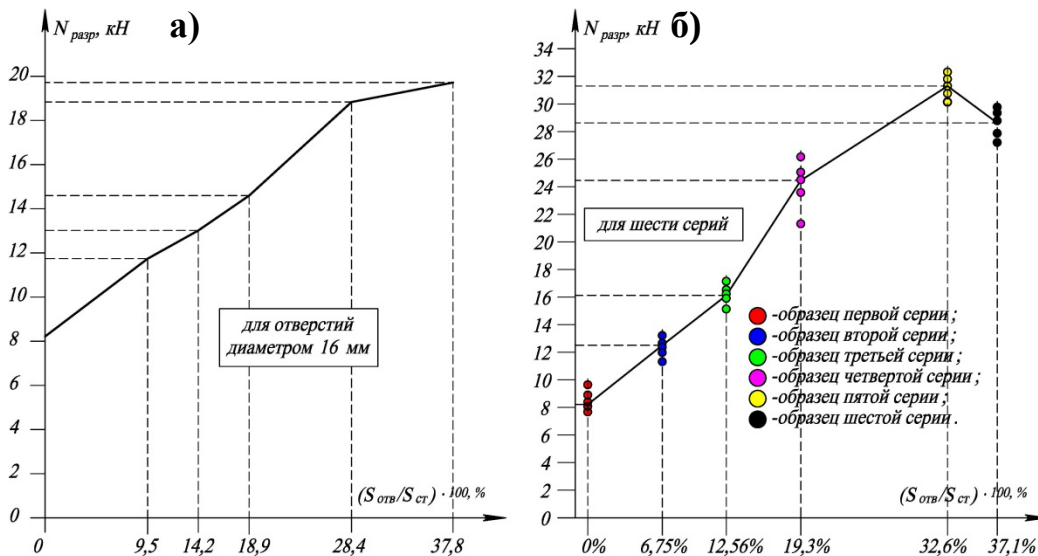


Рисунок 7 – Зависимость разрушающей нагрузки от отношения площади отверстий к площади клеенной части стержня

Анализ сравниваемых теоретических и экспериментальных значений напряжений показал, что расхождение не превышает  $7\%$ . Расхождение данных по перемещениям плоских стержней относительно массива древесины для численных исследований и эксперимента не превысило  $20\%$ , что говорит о хорошей сходимости величин, получаемых разными способами в условиях натурного эксперимента.

Оценка влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние соединений клеенных стальных плоских стержней с массивом древесины проведена при помощи полного многофакторного эксперимента. Способами воздействия на объект исследования являются следующие количественные факторы:  $X_1$  – длина плоского стержня ( $l_{\text{см}}$ ), мм;  $X_2$  – ширина плоского стержня ( $b_{\text{см}}$ ), мм;  $X_3$  – плотность заполнения поверхности стержня отверстиями, шт./ $\text{мм}^2$ . Все выбранные факторы являются совместимыми,

однозначными, управляемыми и независимыми. В каждой серии количество дублей – 3, количество опытов – 8. Всего наблюдений – 24. Воспроизводимость экспериментальных данных проверяли по критерию Кохрена, адекватность регрессивной модели проверяли при помощи критерия Фишера. Значения уровней факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения уровней факторов

| Воздействие на объект |                                                      | Значения факторов, соответствующие уровням |                 |
|-----------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------|
| Обозначение           | Фактор                                               | Нижний уровень                             | Верхний уровень |
| $X_1$                 | длина плоского стержня                               | 100                                        | 300             |
| $X_2$                 | ширина плоского стержня                              | 40                                         | 100             |
| $X_3$                 | плотность заполнения поверхности стержня отверстиями | 0,002                                      | 0,004           |

Уравнение регрессии с рассчитанными коэффициентами примет вид:

$$Y = 58,37 + 28,82X_1 + 25,83X_2 + 8,98X_3 + 13,15X_1X_2 + 4,36X_1X_3 + 3,94X_2X_3 + 2,28X_1X_2X_3. \quad (3)$$

Итоговое уравнение регрессии с значимыми коэффициентами имеет вид:

$$Y = 58,37 + 28,82X_1 + 25,83X_2 + 8,98X_3 + 13,15X_1X_2 + 4,36X_1X_3 + 3,94X_2X_3. \quad (4)$$

Для наглядности визуализация графических зависимостей выполнена с использованием программы «Microsoft Office Excel 2010» (рисунок 8).

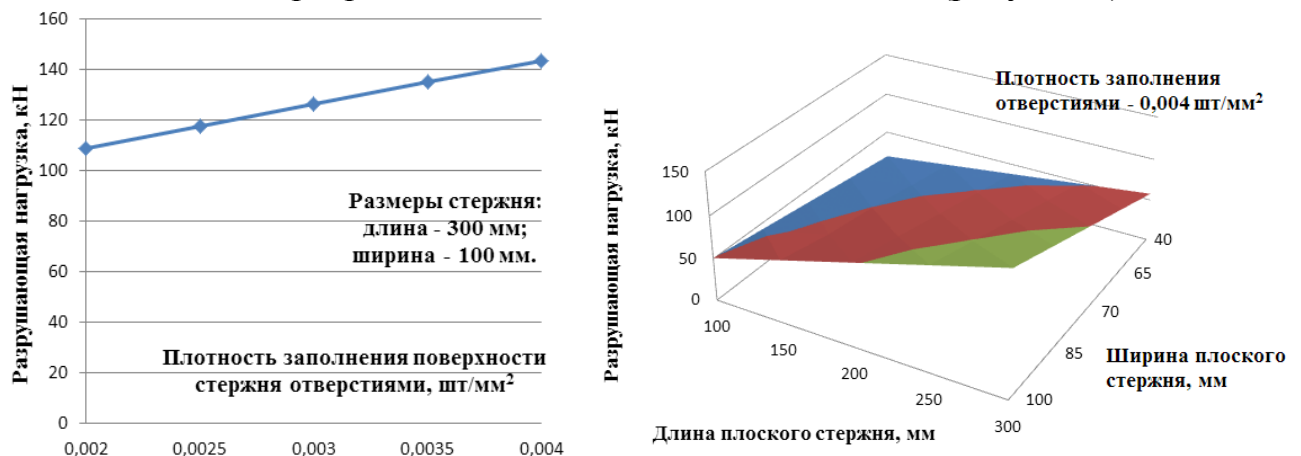


Рисунок 8 – Визуализация полученных графических зависимостей

В третьей главе выполнена разработка деревянных ферм с узловыми соединениями на стальных плоских стержнях и рассмотрены алгоритмы их расчета. Новизна конструктивных форм защищена семью патентами РФ на изобретение. Предлагаемые соединения выполнены в разъемном и неразъемном вариантах. К неоспоримым достоинствам неразъемных соединений относятся малая материалоемкость и полная заводская готовность. Такие соединения снижают общую стоимость конечной продукции.

Пример наиболее характерного неразъемного К-образного узла соединения стойки и раскоса с нижним поясом фермы приведен на рисунке 9. Узел формируется при помощи вклеенных плоских стержней, по очертанию совпадающих с сопрягаемыми деревянными элементами. В зависимости от угла наклона раскоса выполняют соответствующий запил его торца.

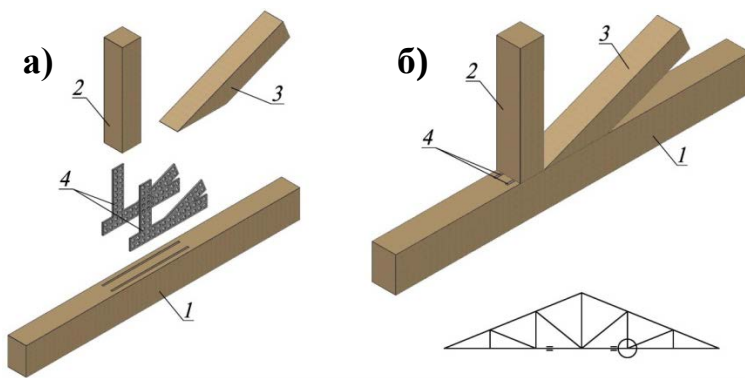


Рисунок 9 – Соединение стойки и раскоса с нижним поясом в разобранном (а) и собранном (б) виде:  
1 – нижний пояс; 2 – стойка;  
3 – раскос; 4 – плоский стержень

Из-за имеющихся у неразборных соединений недостатков, связанных, в основном, с проблемами транспортировки, область их применения ограничена. Для расширения области применения конструкций с предлагаемыми соединениями также разработаны узлы ферм в сборно-разборном варианте. К основным достоинствам сборно-разборных соединений относятся удобство транспортировки, возможность унификации деталей, полная заводская готовность элементов. Пролет ферм с предлагаемыми сборно-разборными соединениями может достигать 18 м. Вариант опорного узла показан на рисунке 10.

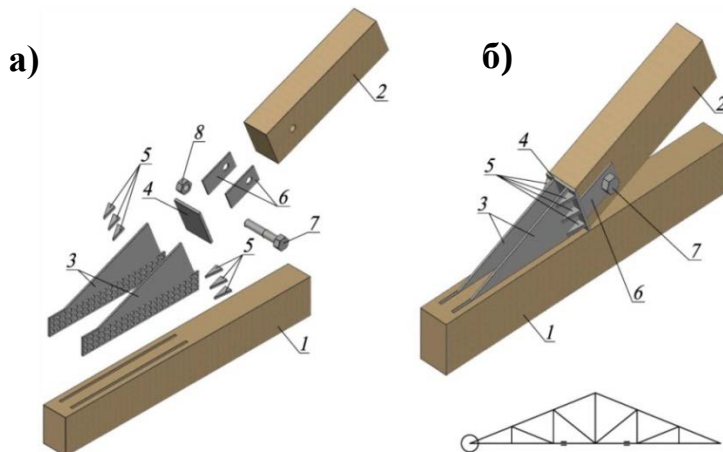


Рисунок 10 – Опорный узел фермы в разобранном (а) и собранном (б) виде:  
1 – нижний пояс;  
2 – верхний пояс;  
3 – плоский стержень;  
4 – опорная плита;  
5 – подкрепляющие ребра;  
6 – ограничительные пластины; 7 – болт; 8 – гайка

При изготовлении сборно-разборных соединений упрощается процесс установки плоских стержней и последовательной заливки клея в связи с тем, что отдельные детали имеют меньшую длину и габариты в сравнении с неразборными узлами. Еще одним немаловажным фактором является то, что при использовании традиционных узловых соединений ширина сечений элементов решетки принимается равной ширине поясов. В предлагаемых узлах ширина сечения элементов решетки не зависит от ширины сечения поясов и может быть уменьшена по результатам расчета.

На основе предлагаемых узлов разработана серия деревянных ферм различных типов. В отечественной практике строительства наибольшее распространение получили фермы с треугольным очертанием верхнего пояса. В связи с этим, при разработке было уделено особое внимание треугольным фермам с разными типами решеток для различных пролетов. Также предлагаемые соединения можно применять в деревометаллических фермах.

Поиск алгоритмов расчета узлов деревянных ферм с клееными стальными стержнями, работающими на выдергивание-вдавливание, проведен с целью

установления аналитических зависимостей, характеризующих напряженно-деформированное состояние рассматриваемого класса соединений и разработки на их основе надежного инженерного метода расчета.

Для удобства практических расчетов представляется целесообразным определить приведенное значение длины стержня для рассчитываемого варианта узла, когда фактическая эпюра неравномерного распределения напряжений по боковой поверхности плоского стержня будет заменена на условную эпюру при условии одинаковых значений внутренних силовых факторов. При таком подходе теоретический расчет предложенного типа узлов ферм должен быть построен на следующем алгоритме:

- определение вида функции распределения напряжений по ширине стержня;
- поиск вида функции распределения напряжений по длине стержня;
- расчет приведенных значений длины стержня при максимальном значении напряжений и расчетных напряжений на приведенной длине;
- определение величины коэффициента приведения.

Рассмотрен способ реализации вышеприведенного алгоритма на примере работы вклеенного плоского стержня на выдергивание под углом  $90^\circ$  по отношению к волокнам древесины. На рисунке 11 приведены эпюры распределения напряжений и получены значения для вертикальных и горизонтальных сечений плоского стержня для рассматриваемого случая.

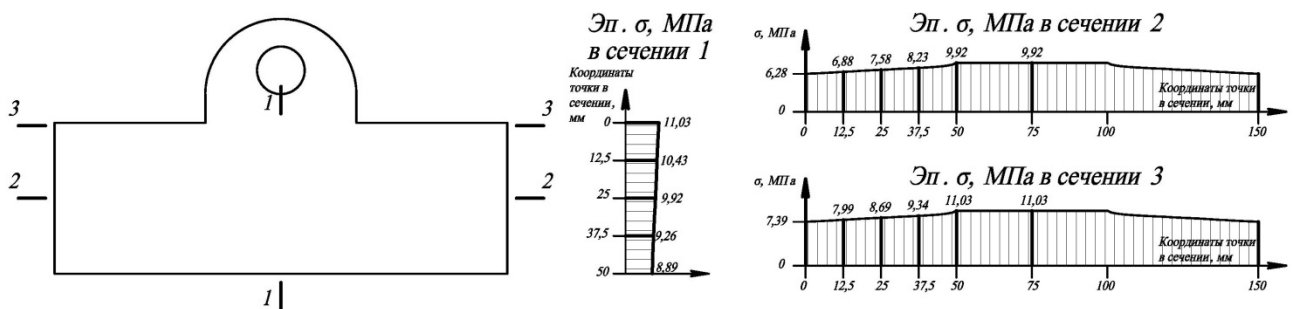


Рисунок 11 – Схема исследуемого стального плоского стержня и эпюры распределения напряжений по сечениям

Распределение напряжений по длине плоского стержня удобно представить в виде кусочной функции. На участке распределительной фасонки – константная. На концах плоского стального стержня – гиперболическая:  $y = \frac{a}{x} + b$ . (5)

Линейное распределение напряжений по ширине плоского стержня описывается функцией:  $z = ky + m$ . (6)

Для определения приведенной длины выполним расчет площади эпюры напряжений по длине плоского стержня в средней части:

$$S = \int_{-x_{\max}}^{x_{\max}} f(x) dx = 2 \int_0^{x_{\max}} f(x) dx = 2 \left( \int_0^{x_1} z_{\max} dx + \int_{x_1}^{x_{\max}} \left( \frac{a}{x} + b \right) dx \right). \quad (7)$$

$$\text{Тогда приведенная длина равна: } x_{\text{пр}} = \frac{S}{\sigma_{\max}}. \quad (8)$$

Выполним расчет объема эпюры напряжений на поверхности плоского стального стержня:  $V = \iint_D z(x, y) dx dy = \int_0^{y_{\max}} dy \int_{-x_{\max}}^{x_{\max}} z(x, y) dx$ . (9)

Определим величину расчетного напряжения при приведенной длине стержня, считая распределение напряжений по ширине стержня равномерным:

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{V}{x_{\text{пр}} \cdot y_{\text{max}}}. \quad (10)$$

Переход к условной равномерно-распределённой эпюре напряжений при их максимальном значении от фактической неравномерной эпюры в верхнем сечении 3-3 для рассматриваемого примера выполним при помощи коэффициента приведения  $k_{\text{пр.1}}$ , который определим как:

$$k_{\text{пр.1}} = \frac{x_{\text{пр}}}{l_{\text{ст}}}. \quad (11)$$

Учет неравномерности распределения напряжений по ширине стержня с сохранением их максимального значения в сечении 3-3 выполним при помощи коэффициента приведения  $k_{\text{пр.2}}$ , который можно определить по формуле:

$$k_{\text{пр.2}} = \frac{\sigma_{\text{расч}}}{\sigma_{\text{max}}}. \quad (12)$$

Переход к равномерно-распределенной эпюре скалывающих напряжений по площади стержня, эквивалентной фактической неравномерно-распределенной эпюре как по длине, так и по ширине стержня можно осуществить при помощи общего коэффициента приведения  $k_{\text{пр}}$ , который определим как:

$$k_{\text{пр}} = k_{\text{пр.1}} \cdot k_{\text{пр.2}}. \quad (13)$$

Тогда при расчете несущей способности узла ферм должна быть учтена приведенная длина клеенного плоского стержня:  $l_{\text{пр}} = l_{\text{ст}} \cdot k_{\text{пр}}. \quad (14)$

Расчетная несущая способность соединения на клеенных плоских стержнях при выдергивании/вдавливании может быть определена по формуле:

$$T = 2 \cdot R_{\text{ск}}^{90} \cdot b \cdot l \cdot k_t \cdot k_{\text{пр}} \cdot n, \quad (15)$$

где  $T$  – расчетная несущая способность клеенных плоских стержней, кН;

$R_{\text{ск}}^{90}$  – расчетное сопротивление древесины скалыванию поперек волокон, МПа;

$b_{\text{ст}}$  – ширина клеиваемого стержня, м;

$l_{\text{ст}}$  – длина клеенной части стержня, м;

$k_t$  – корректировочный коэффициент, учитывающий влияние толщины стержня на прочность соединения;

$k_{\text{пр}}$  – коэффициент приведения, вводимый к площади стержня при определении ее несущей способности и учитывающий степень неравномерного распределения напряжений;

$n$  – количество клеенных стержней в расчётном поперечном сечении.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований узлов и конструкций с узлами на клеенных стальных плоских стержнях при действии кратковременных и длительных нагрузок с целью определения их фактической прочности и жесткости. Эксперименты проведены на натурных образцах опорного узла фермы, а также на конструкции цельнодеревянной фермы пролетом 4,5 м. Перед проведением испытаний были выполнены численные расчеты испытываемых конструкций. Испытаниям подлежали два опытных образца опорного узла и один образец фермы.

Испытания опорных узлов проведены на специальном стенде, при этом каждый треугольный опытный образец с углом наклона верхних элементов  $30^\circ$  к нижнему поясу фактически включал в себя два опорных узла (рисунок 12). По продольной оси вклеиваемых стержней между отверстиями располагали тензодатчики ПКС-12-200, подключаемые к тензосистеме ММТС 64.01. После наклейки на все тензодатчики наносился защитный слой парафина для обеспечения адекватности работы датчиков в среде клеевого шва. На каждом опытном образце было установлено 35 тензорезисторов, 10 индикаторов с ценой деления 0,01 мм и шесть индикаторов с ценой деления 0,001 мм. Величина нагрузки контролировалась динамометром и тарированным манометром. Нагружение опытных образцов производили до расчетных нагрузок ступенями, равными  $0,2N_{\text{расч}}$ . На каждой ступени время приложения нагрузки составляло одну минуту, время выдержки 15 минут. После завершения первых испытаний образец разгружали и выдерживали перед проведением следующих не менее трех суток. После трехкратного испытания расчетными нагрузками узлы доводили до разрушения. Всего в ходе проведения кратковременных экспериментальных исследований опорных узлов было проведено 12 зачетных испытаний.

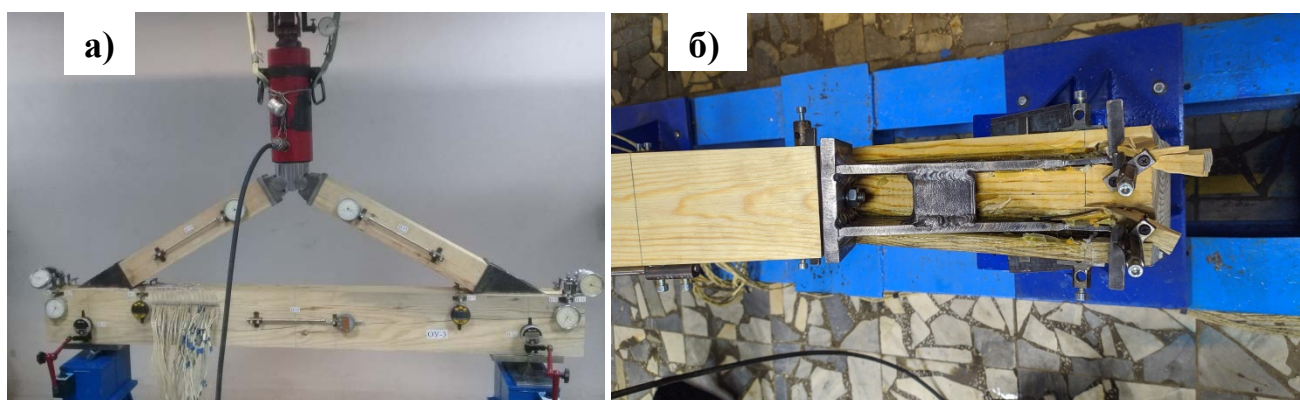


Рисунок 12 – Общий вид установки для испытания опорного узла фермы (а) и характер разрушения опытного образца (б)

В результате испытаний выявлено, что максимальные значения нормальных напряжений в плоском стержне находились в его центральной зоне, что объясняется приложением силы в середине длины стержня. Характер деформирования всех четырех вклеенных стержней был идентичен, причем прямо пропорциональная зависимость между нагрузкой и сдвигом пластин относительно массива древесины наблюдалась до величины нагрузки, равной  $1,5N_{\text{расч}}$  (при этой нагрузке механические приборы были сняты с образца). Максимальная величина смещения вклеенного стержня в горизонтальном направлении при действии расчётной нагрузки составила 0,153 мм, в вертикальном – 0,026 мм, что свидетельствует о высокой жесткости опытных опорных узлов ферм. Следует отметить, что экспериментальные данные соответствовали результатам численных расчетов, при этом разница между теоретическими и экспериментальными величинами не превышала 12 %, что для условий натурного эксперимента является приемлемой величиной.

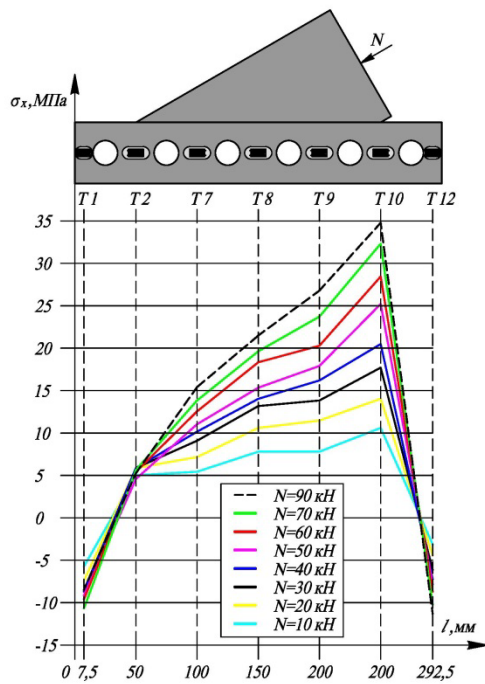


Рисунок 13 – Напряжения во вклеенном стержне по показаниям тензорезисторов

Характерные и качественные количественные картины распределения нормальных напряжений во вклеенных плоских стержнях по их продольной оси, построенные по результатам выполненного тензометрирования, показаны на рисунке 13. Отметим, что полученные картины в четырех опорных узлах двух образцов были полностью идентичными. В целом, распределение нормальных напряжений по длине вклеенного стержня характеризуется значительной степенью неравномерности, что хорошо коррелируется с результатами численных исследований и обосновывает неравномерный характер распределения скалывающих напряжений по линии контакта «клей-древесина».

В ходе испытаний была определена также разрушающая нагрузка. Разрушение соединений происходило хрупко в результате скалывания по граничному слою клей-древесина. После скалывания на поверхности пластин имелся клеевой слой с остатками древесины (рисунок 12,б). Два опытных образца разрушились при нагрузке 159 кН и 164 кН. Усредненный коэффициент безопасности составил 2,78 при требуемом коэффициенте 2,69, что подтверждает высокую эксплуатационную надежность испытанного типа узла.

Для исследования особенностей работы деревянных ферм с предложенными типами узлов были проведены их кратковременные и длительные испытания. Экспериментальные исследования проведены на фермах пролетом 4500 мм с высотой в коньке 1125 мм. Пространственная неизменяемость была обеспечена за счет дублирующей фермы, расположенной от экспериментальной на расстоянии 2,0 м и связанной с ней шарнирно прогонами. Все узлы фермы выполнены на вклеенных стальных плоских стержнях и запроектированы на расчетную нагрузку  $2,7 \text{ кН/м}^2$  (погонная нагрузка  $5,4 \text{ кН/м}$ ). Поверх прогонов были закреплены распределительные щиты, не связанные друг с другом. Для исследования работы именно вклеенных стержней сечений поясов и раскосов были определены из условия обеспечения их прочности и устойчивости с запасом 20-30 %.

Нагружение осуществлялось при помощи тарированных грузов массой 50 Н, укладываемых поверх щитов. Нагрузка распределялась равномерно и передавалась через прогоны в узлы ферм. Общий вид испытательного стенда и загрузки опытных конструкций показан на рисунке 14,а.

Основные деформации фермы измеряли прогибомерами 6ПАО и индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм. Смещение вклеенных стержней относительно древесины поясов в вертикальном и горизонтальном направлениях измеряли электронными индикаторами с ценой деления 0,001 мм.

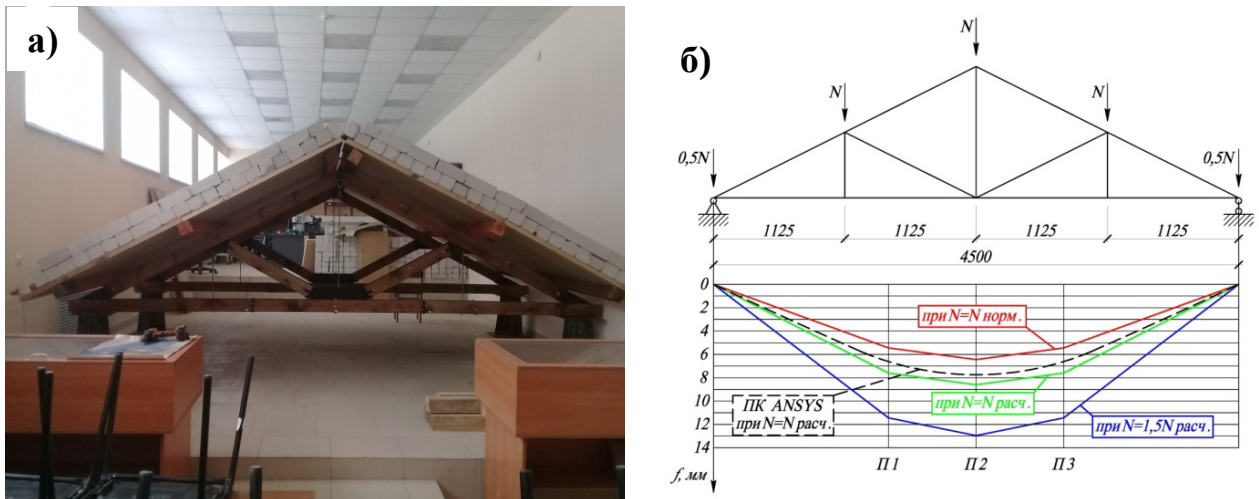


Рисунок 14 – Процесс испытания фермы кратковременными нагрузками (а) и график общих деформаций фермы по ступеням загрузки (б)

Тензометрирование выполняли на участках клеенных в древесину плоских стержней в опорном узле, узле сопряжения подкоса с верхним поясом и в растянутом стыке нижнего пояса. На экспериментальной ферме всего было установлено четыре прогибомера, четыре индикатора с ценой деления 0,01 мм, 20 индикаторов с ценой деления 0,001 мм, 62 тензодатчика.

Максимальные прогибы фермы в середине пролета находились в пределах норм. Их значения при нормативной нагрузке не превышали 6,38 мм или  $1/705L$ , при расчётной нагрузке 8,61 мм или  $1/523L$  (рисунок 14,б), при этом увеличение прогибов происходило строго пропорционально прикладываемой нагрузке. Также пропорционально увеличению нагрузки увеличивались деформации в узлах ферм и величины смещения клеенных стержней относительно массива древесины. Максимальные смещения стержней относительно древесины выявлены в опорном узле. При действии расчётной нагрузки их величины составили вдоль и поперек оси нижнего пояса 0,123 мм и 0,032 мм соответственно (рисунок 15).

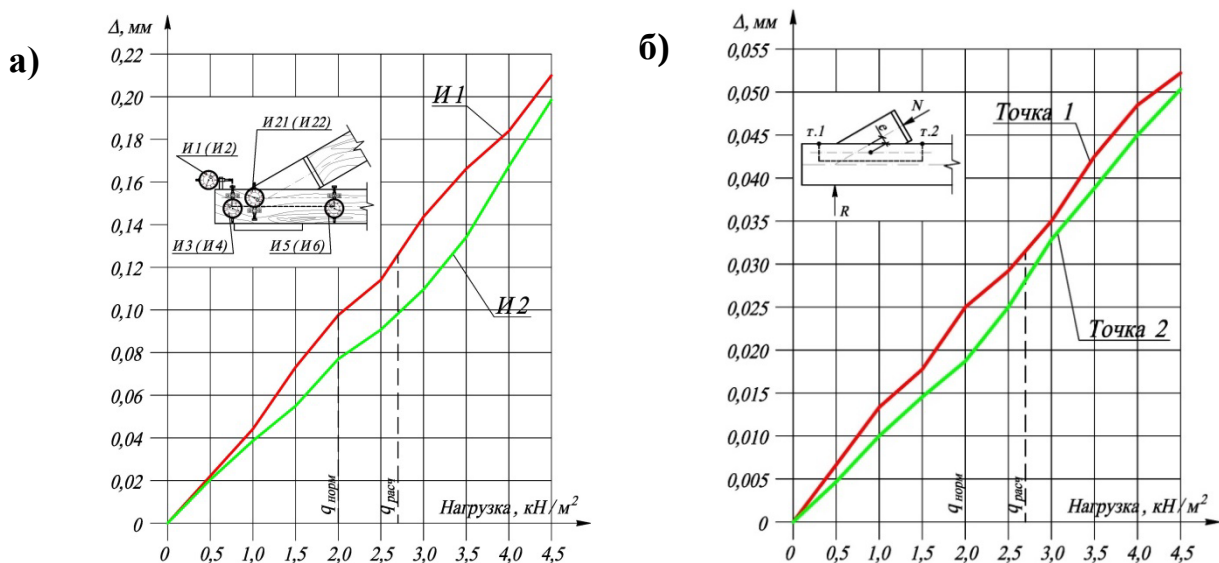


Рисунок 15 – Величины смещения стержней относительно массива древесины в опорном узле вдоль (а) и поперек (б) оси нижнего пояса

В результате проведенных испытаний также были установлены действительные картины распределения напряжений во вклеенных стальных плоских стержнях. Эти картины полностью качественно соответствовали эпюрам, полученным в результате численных исследований отдельных узлов, при этом расхождения теоретических и экспериментальных данных не превышали 11 %.

Опытная ферма после трехкратных испытаний до расчетных нагрузок, была выдержана в течение 10 суток и поставлена на длительные испытания (27.11.2019г.). Опытная конструкция была выдержана под расчетной нагрузкой  $q = 2,7 \text{ кН/м}^2$  в течение 90 суток (рисунок 16,а).

Наиболее интенсивное нарастание прогиба фермы в середине и третях пролета (рисунок 16,б) наблюдалось в первые 30 суток, а в следующие 60 суток испытаний значение его практически не изменялось (приращение в пределах 5 %). Аналогичный характер наблюдался и в величинах смещения вклеенных стержней относительно массива древесины.

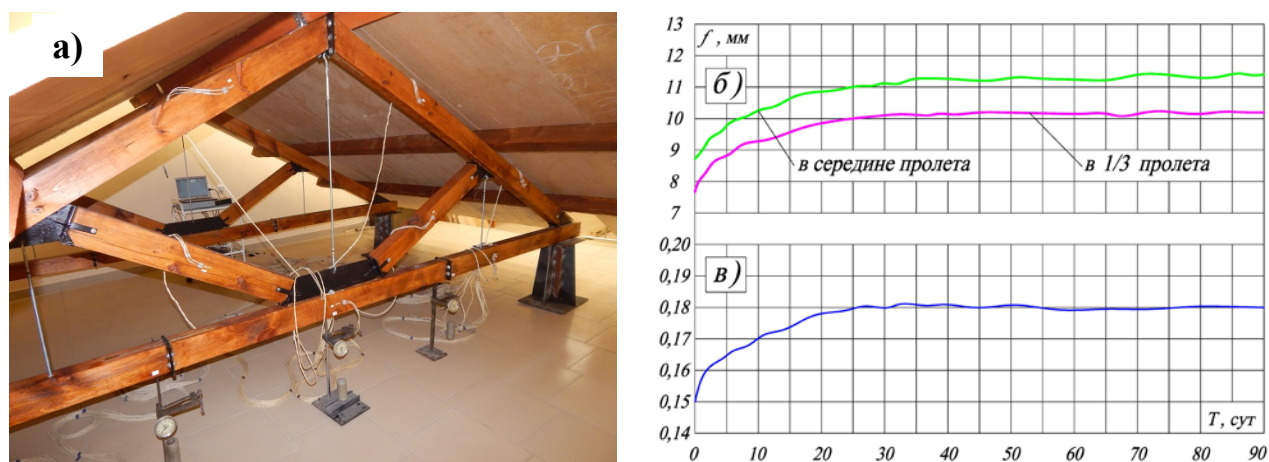


Рисунок 16 – Общий вид фермы при проведении длительных испытаний (а), график прогибов фермы в середине и третях пролета (б), смещения вклеенных стержней относительно древесины нижнего пояса в направлении вдоль волокон (в) во времени

Максимальный прогиб в середине пролета за период наблюдений составил 11,37 мм или 1/396 пролета, таким образом, он возрос по сравнению с кратковременным в 1,32 раза. Среднее значение деформации сдвига стержней в направлении вдоль волокон древесины в опорном узле было равно 0,181 мм при значении кратковременной деформации 0,149 мм (увеличение в 1,21 раза). В целом характеристики деформативности опытной конструкции не превысили предельно допустимых значений и хорошо сопоставимы с результатами выполненных численных исследований. Характер изменения деформаций, полученных в ходе эксперимента (рисунок 16,б), позволяет сделать вывод о том, что ползучесть экспериментальных соединений имела установившийся характер в период первых 30 суток испытаний, а в последующее время – ограниченный. Деформативность соединения подчиняется обычным временным закономерностям изменения прочности древесины при длительном действии нагрузок, которые могут быть записаны затухающей экспонентной

зависимостью. За время наблюдений каких-либо признаков разрушений соединений по древесине, по металлу или по клеевой прослойке не обнаружено. Данные факты подтверждают надежность разработанного типа конструкций при длительно действующих нагрузках. Отметим, что длительные испытания проведены при расчетном значении нагрузки, а не при нормативном. Этот факт также подтверждает эксплуатационную надежность предложенных ферм.

**В пятой главе** изложены рекомендации по конструированию и расчету ферм с предложенным типом соединений, а также оценка их технико-экономической эффективности. Приведен пошаговый алгоритм проектирования исследованного класса соединений, включающий в себя статический расчет деревянной фермы с определением расчетных усилий в её элементах, компоновку узлов с расстановкой стержней и определением размеров крепежных деталей, назначение ширины стержней по конструктивным требованиям, определение толщины стержня из условия его прочности с учетом наличия ослаблений, назначение диаметра соединительных болтов и проверку стержней на смятие в местах их расположения, определение длины клейки плоского стержня.

С учетом этого расчетную несущую способность  $T$ , МН, соединения на клеенных стальных плоских стержнях следует определять по формуле:

$$T \leq 2 \cdot R_{\text{ск}}^{\alpha} \cdot b_{\text{ст}} \cdot l_{\text{ст}} \cdot k_{\text{н}} \cdot k_t \cdot n, \quad (16)$$

где  $R_{\text{ск}}^{\alpha}$  – расчетное сопротивление древесины скалыванию под углом  $\alpha$  к волокнам, МПа, определяемое по СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции»;

$\alpha$  – угол приложения силы к оси стержня, градусы;

$b_{\text{ст}}$  – ширина клеиваемого стержня, м, в диапазоне от 0,04 м до 0,1 м;

$l_{\text{ст}}$  – длина клеиваемого стержня, м, которую следует принимать по расчету в пределах рекомендуемых величин по отношению к длине узловой фасонки;

$n$  – количество плоских стержней в соединении;

$k_t$  – корректировочный коэффициент, определяемый по формуле:

$$k_t = 0,85 + 30 \cdot t_{\text{ст}} \quad (17)$$

где  $t_{\text{ст}}$  – толщина клеенной части плоского стержня, м;

$k_{\text{н}}$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений в древесине по площади клейки стержня от соотношения  $l_{\text{ст}} / l_{\text{ф}}$  и  $b_{\text{ст}}$ , определяемый по таблице, приведенной в главе пять.

Даны рекомендации по конструированию, изготовлению и монтажу предложенного типа ферм, базирующиеся на фактических картинах напряженно-деформированного состояния узловых соединений, установленных численными методами и экспериментальными исследованиями.

Выполненный сравнительный технико-экономический анализ подтвердил целесообразность применения в строительной практике деревянных ферм с узлами на стальных клеенных плоских стержнях, при этом достигается снижение стоимости материалов на 27-30 %, общего веса конструкций – на 17-25 % при незначительном увеличении трудоемкости изготовления ферм на 10-11 % в зависимости от величины перекрываемого пролета, шага ферм и действующих усилий в сравнении с известными аналогами. Например, в

сравнении с треугольными фермами на стальных цилиндрических нагелях в ценах I квартала 2022 года сокращение стоимости на каждую стропильную ферму пролетом 12,0 м составляет 8837 рублей или 245,5 руб/м<sup>2</sup>, на стропильную ферму пролетом 18,0 м – 19180 рублей или 355,2 руб/м<sup>2</sup>. Дополнительную экономию возможно получить за счет уменьшения габаритной высоты фермы с 1/5 от расчетного пролета до 1/6L (сокращение расходов на отопление и вентиляцию).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Итоги выполненного исследования

1. Разработаны новые типы деревянных ферм с узловыми соединениями на основе стальных клеенных плоских стержней с высверленными отверстиями, отличающиеся от известных аналогов сниженной материалоемкостью, повышенной жесткостью и прочностью, простотой изготовления. Новизна разработок подтверждена семью патентами РФ на изобретение.

2. Численными методами выполнено исследование напряженно-деформированного состояния стальных плоских стержней, клеенных в массив древесины, в зависимости от различных конструктивных параметров самих стержней и угла приложенной к ним нагрузки. Подтверждена целесообразность применения в узловых соединениях цельнодеревянных ферм предлагаемых соединительных элементов. Значения напряжений во клеенной части стержня, полученные численными и экспериментальными методами, совпали с усредненной точностью 5-7 %, что подтверждает адекватность построенных конечно-элементных моделей и возможность выполнять практические расчеты предложенного класса соединений в программных комплексах на основе метода конечных элементов.

3. Выявлено, что устройство отверстий во клеиваемой части плоского стержня способствует повышению несущей способности соединения за счет полноценного использования работы древесины на скалывание. При этом, на несущую способность соединения влияют неравномерное распределение касательных напряжений в древесине по её контакту с клеевой прослойкой, длина и ширина клеенной части стержня, а также угол передачи усилия на стержень по отношению к волокнам древесины. Определены численные значения коэффициента  $k_n$ , учитывающего степень неравномерности распределения скалывающих напряжений по поверхности стержня, а также наиболее рациональные параметры клеиваемого стержня, которые составили: толщина  $t_{cm} = 4-8$  мм, ширина  $50 \text{ мм} \leq b_{cm} \leq 100 \text{ мм}$ , длина  $l_{cm}$  по отношению к длине узловой фасонки  $l_{фас}$ , выполняющей функцию объединения соединяемых стержней фермы в единый шарнирный узел:  $l_{фас} \leq l_{cm} \leq 5,0l_{фас}$  при ширине стержня  $b_{cm}=50$  мм и  $l_{фас} \leq l_{cm} \leq 8,0l_{фас}$  при ширине стержня  $b_{cm}=100$  мм, определяя промежуточные значения по интерполяции. Экспериментальными исследованиями, выполненными с применением методики планирования эксперимента, выявлено, что площадь отверстий

должна составлять 30–40 % от площади поверхности клеиваемого стержня вне зависимости от угла приложения силы к оси клеиваемого стержня. Также определено, что при передаче нагрузки на клеенный плоский стержень под углом к его оси несущая способность соединения изменяется прямо пропорционально изменению расчётного сопротивления древесины на скалывание, определяемого по рекомендациям СП 64.13330.2017.

4. Определены теоретические функции распределения скалывающих напряжений по площади стержня, позволяющие учесть характер их неравномерного распределения, как по длине, так и по ширине клеенного элемента, а также предложен общий вид расчетной формулы, позволяющей определять несущую способность предложенного типа узлов ферм с учетом их фактического напряженно-деформированного состояния в инженерных расчетах. Подтверждено, что за счет жесткости узловых соединений расчетная высота ферм в середине пролета может быть уменьшена до  $1/6L$  вместо рекомендуемой высоты в  $1/5$  от её пролета.

5. В результате проведенных экспериментальных исследований разработанных вариантов соединений деревянных элементов с применением стальных клеенных плоских стержней выявлены:

- удовлетворительная сходимость результатов экспериментальных и численных исследований, что подтверждает адекватность разработанных конечно-элементных моделей соединений;
- достаточная степень эксплуатационной надежности предложенного типа деревянных ферм, в том числе при действии длительных нагрузок;
- необходимость выполнения центрации промежуточных узлов ферм по оси клеенных плоских стержней, а опорных узлов по оси нижнего пояса для обеспечения его работы только на растяжение.

6. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований при действии кратковременных и длительных нагрузок усовершенствована методика расчета и разработаны рекомендации по конструированию и расчету деревянных ферм с узловыми соединениями на стальных клеенных плоских стержнях. Достоверность основных положений методики и рекомендаций базируется на достаточном объеме экспериментальных данных, полученных с использованием современных измерительных приборов, испытательных машин и оснастки; на рациональной методике планирования эксперимента, позволившей получить более полные по количественным и качественным параметрам результаты исследований.

7. Выполненный сравнительный технико-экономический анализ на примере традиционных стропильных треугольных ферм на нагелях подтвердил целесообразность применения в строительной практике деревянных ферм с узловыми соединениями на стальных клеенных плоских стержнях, при этом достигается снижение стоимости материалов на 27–30 %, общего веса конструкций на 17–25 % при незначительном увеличении трудоемкости изготовления на 10–11 % в зависимости от типа проектируемых конструкций и действующих усилий в сравнении с известными аналогами.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволяют сформулировать перспективы дальнейшей разработки темы диссертации:

- исследование влияния различных условий эксплуатации на прочность и жесткость узловых соединений деревянных ферм с узловыми соединениями на стальных клеенных плоских стержнях;
- поиск новых способов обработки поверхности плоских стальных стержней, обеспечивающих как эксплуатационную надежность разрабатываемых конструкций, так и снижение материальных и трудовых ресурсов;
- совершенствование технологии заводского изготовления деревянных ферм с предложенным типом узловых соединений;
- исследование узловых соединений деревянных ферм на клеенных плоских стержнях, выполненных на основе конструкционных пластмасс;
- разработка номенклатуры деревянных ферм из цельной древесины, в том числе пространственных, с узловыми соединениями на стальных клеенных плоских стержнях для пролетов 9...18 м.
- исследование возможности применения стальных стержней в узлах других типов деревянных конструкций, в том числе пространственных.

### **Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных изданиях**

*Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:*

1. Способы повышения несущей способности соединений деревянных конструкций на стальных клеенных пластинах / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.В. Руднев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 5 (713). – С. 31 – 43 (ИФ РИНЦ – 0,330; 1,63 печ. л. / 0,57 печ. л.).

2. Деревянные фермы с узловыми соединениями на стальных клеенных пластинах / И.И. Лисицкий, И.И. Яричевский, В.И. Жаданов [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 11. – С. 9 – 14 (ИФ РИНЦ – 0,663; 0,75 печ. л. / 0,26 печ. л.).

3. Техничко-экономический анализ способов усиления деревянных конструкций / М.А. Аркаев, И.И. Лисицкий, М.М. Соболев [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 11. – С. 15 – 21 (ИФ РИНЦ – 0,663; 0,88 печ. л. / 0,25 печ. л.).

4. Узловые соединения ферменных конструкций на основе клеенных плоских стержней / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 3 (11). – С. 59 – 68 (ИФ РИНЦ – 0,273; 1,25 печ. л. / 0,81 печ. л.).

5. Деревянные фермы с узловыми соединениями на клеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.В. Руднев // Промышленное и

гражданское строительство. – 2020. – № 4. – С. 9 – 15 (ИФ РИНЦ – 0,663; 0,88 печ. л. / 0,31 печ. л.).

6. Длительные испытания деревянной фермы с соединениями элементов на клеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2020. – № 1 (733). – С. 34 – 45 (ИФ РИНЦ – 0,330; 1,5 печ. л. / 0,98 печ. л.).

7. Численные исследования узлов цельнодеревянных ферм на стальных клеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2020. – № 4. – С. 64 – 77 (ИФ РИНЦ – 0,273; 1,75 печ. л. / 1,14 печ. л.).

*Публикации в других изданиях:*

8. Лисицкий, И.И. О целесообразности применения клеенных стальных пластин в стыках изгибаемых элементов деревянных конструкций / И.И. Лисицкий, И.В. Руднев, В.И. Жаданов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург, 2016 февраль 3–5. – С. 602 – 606.

9. Лисицкий, И.И. Узлы сквозных деревянных конструкций. Проблемы. Существующий опыт. Новые разработки / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции; Оренбургский гос. ун-т. 1–3 февраля 2017. Оренбург. – С. 830 – 835.

10. Лисицкий, И.И. Исследование новых типов узловых соединений конструкций из цельной древесины для объектов культурного наследия / И.И. Лисицкий, К.В. Юкова, П.И. Веккер // Студенческие научные общества – экономике регионов. Материалы Международной молодежной научно-технической конференции; Оренбургский гос. ун-т. 31 октября – 2 ноября 2018. Оренбург. – С. 49 – 52.

11. Руднев, И.В. Восстановление элементов деревянных конструкций зданий и сооружений культурного наследия клееными стальными пластинами (монография) / Руднев И.В., Жаданов В.И., Лисицкий И.И. // Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018. – 144 с. ISBN 978-5-7410-2153-8.

12. Лисицкий, И.И. Деревянные фермы с узлами на клеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Эффективные строительные конструкции: теория и практика. Сборник статей XIX Международной научно-технической конференции. 28–29 марта 2019. – Пенза: Приволжский дом знаний. – С. 83 – 91.

13. Лисицкий, И.И. Клеенные плоские стержни в соединениях деревянных элементов. Состояние и пути совершенствования / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. Сборник статей. Самарский государственный технический университет. – Самара. – 2019. – С. 133 – 140.

14. Жаданов, В.И. Новые типы узлов сквозных конструкций с соединениями на стальных вклеенных пластинах / В.И. Жаданов, И.И. Лисицкий, В.А. Пересыпкина // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием); Оренбургский гос. ун-т. 23–25 января 2020. Оренбург. – С. 129 – 132.

15. Лисицкий, И.И. Деревянные фермы с узлами на стальных плоских стержнях // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции; Оренбургский гос. ун-т. 26-27 января 2022. Оренбург. – С. 2571-2580.

*Патенты РФ на изобретение:*

16. Патент на изобретение №2633897 Российская Федерация, МПК: E04B 1/58. Узловое сборно-разборное соединение деревянных стержней / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.В. Руднев, М.А. Аркаев, С.В. Лисов; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет. – Оpubл. 19.10.17. М.: Бюлл. № 29.

17. Патент на изобретение №2705118 Российская Федерация, МПК: E04B 1/58. Узловое соединение деревянных стержней / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.В. Руднев, Е.А. Чайкин; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет. – Оpubл. 05.11.19. М.: Бюлл. № 31.

18. Патент на изобретение №2693984 Российская Федерация, МПК: E04B 1/58, E04C 3/16. Опорный узел деревянной фермы / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.П. Пинайкин; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет. – Оpubл. 08.07.19. М.: Бюлл. № 19.

19. Патент на изобретение №2733232 Российская Федерация, МПК: E04B 1/58. Узловое соединение деревянных стержней плоских и пространственных конструкций / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, Б.В. Лабудин; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет. – Оpubл. 30.09.20. М.: Бюлл. № 28.

20. Патент на изобретение №2727977 Российская Федерация, МПК: E04B 1/38. Шарнирный опорный узел деревянной фермы / И.И. Лисицкий, А.О. Эрзяйкина, Р.В. Жабасова; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет. – Оpubл. 28.07.20. М.: Бюлл. № 22.

21. Патент на изобретение №2763280 Российская Федерация, МПК: E04B 1/14. Узловое соединение элементов деревянных и металлодеревянных конструкций / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.И. Лисицкий; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет. – Оpubл. 28.12.2021 М.: Бюлл. №1.

22. Патент на изобретение №2763279 Российская Федерация, МПК: E04B 1/14. Узел соединения элементов деревянных и металлодеревянных конструкций / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.И. Лисицкий; заявитель и патентообладатель Оренбургский государственный университет. – Оpubл. 28.12.2021 М.: Бюлл. №1.

Подписано к печати 29.09.2022 г.  
Формат 60х84/16, Объем 1,5 п.л.  
Тираж 100 экз. Заказ № 0104

---

Цена свободная  
Отпечатано с готового оригинал-макета  
в Оренбургском государственном университете  
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13,  
ауд. 170001, тел. 8(3532) 91-22-21, e-mail: 912221@bk.ru