

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

**Лисицкий Иван Иванович**

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

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
профессор В.И. Жаданов

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ДЕРЕВЯННЫЕ ФЕРМЫ И ИХ УЗЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	17
1.1 Общие сведения о деревянных фермах и способах соединения их элементов.....	17
1.2 Отечественный и зарубежный опыт применения ферм на основе древесины в строительной практике.....	19
1.3 Особенности расчета узлов ферм на основе древесины.....	30
1.4 Пути совершенствования узловых соединений деревянных ферм.....	38
1.5 Выводы по первой главе. Постановка задач исследования.....	41
2 ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА РАБОТЫ СТАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЕЙ В СОЕДИНЕНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ..	43
2.1 Особенности напряженно-деформированного состояния стальных плоских стержней, работающих в узлах ферм.....	43
2.2 Цель и задачи численных и экспериментальных исследований.	46
2.3 Методика численных исследований соединений на стальных плоских стержнях.....	46
2.4 Анализ результатов численных исследований.....	53
2.5 Методика и результаты экспериментальных исследований опытных соединений.....	59
2.6 Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований.....	74
2.7 Оценка влияния различных факторов на напряженно- деформированное состояние соединений вклеенных стальных плоских стержней с массивом древесины.....	77
2.8 Выводы по второй главе.....	87

3	КОНСТРУКЦИИ ДЕРЕВЯННЫХ ФЕРМ С УЗЛОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ НА СТАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЯХ И АЛГОРИТМЫ ИХ РАСЧЕТА.....	89
3.1	Общие положения, принятые при разработке опытных конструкций.....	89
3.2	Технические решения узловых соединений на стальных плоских стержнях.....	91
3.2.1	Неразборные узловые соединения.....	91
3.2.2	Сборно-разборные узловые соединения.....	96
3.3	Разработка конструкций с узлами на стальных плоских стержнях.....	106
3.4	Алгоритмы расчета предложенных конструктивных форм.....	109
3.5	Выводы по третьей главе.....	123
4	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЗЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ С УЗЛАМИ НА СТАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЯХ.....	124
4.1	Цель и задачи исследований.....	124
4.2	Методика испытания.....	124
4.2.1	Опытная конструкция опорного узла фермы.....	125
4.2.2	Опытная конструкция фермы пролетом 4,5 м.....	133
4.2.3	Длительные испытания фермы пролетом 4,5 м.....	138
4.3	Анализ результатов кратковременных испытаний.....	140
4.3.1	Результаты испытаний опорного узла фермы.....	141
4.3.2	Результаты испытаний фермы пролетом 4,5 м.....	145
4.4	Результаты длительных испытаний фермы пролетом 4,5 м.....	149
4.5	Выводы по четвертой главе.....	152
5	РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ, РАСЧЕТУ И ИЗГОТОВЛЕНИЮ ДЕРЕВЯННЫХ ФЕРМ С УЗЛАМИ НА СТАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЯХ И ИХ ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	153
5.1	Общие положения.....	153

5.2	Материалы.....	154
5.3	Конструирование и расчет.....	154
5.3.1	Указания по конструированию.....	155
5.3.2	Указания по расчету.....	157
5.4	Технология изготовления ферм с узлами на стальных плоских стержнях.....	165
5.5	Оценка технико-экономической эффективности применения ферм с узлами на стальных плоских стержнях .....	169
5.6	Выводы по пятой главе.....	175
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	176
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	180
	ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты о внедрении результатов диссертации.....	198

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность избранной темы.** Деревянные фермы относятся к наиболее широкому классу строительных конструкций, которые применяют в покрытиях зданий различного назначения – производственных, общественных, жилых. Это объясняется общеизвестными преимуществами как сквозных конструкций – легкость, простота монтажа, низкая стоимость в сравнении с балочными элементами, надежный водоотвод с покрытия [7, 16, 22, 33, 49, 53, 57, 96], так и преимуществами древесины как строительного материала.

Общеизвестно, что эффективность и надежность сквозных конструкций в основном определяются конструктивными решениями их узловых сопряжений, которые в деревянных фермах, как правило, решают при помощи стальных связей, выполненных в виде гвоздей, шурупов, нагелей или нагельных болтов, разнообразных когтевых шайб или зубчатых пластин [12, 13, 46, 53, 61, 78, 84, 96, 137, 138, 139]. Каждый из этих вариантов имеет свои характерные достоинства, однако их общими главными недостатками являются малая несущая способность и податливость (деформативность), особенно при длительном действии нагрузки. Наиболее удачным путем устранения этих двух характерных недостатков является применение в узлах вклеенных арматурных стержней, за счет чего обеспечивается жесткость соединений и их высокая прочность [32, 101, 131, 132]. Эффективность такого способа соединения элементов деревянных конструкций подтверждена как исследованиями отечественных и зарубежных ученых, так и практикой строительства многочисленных объектов различного назначения, причем арматурные стержни вклеивают в древесину вдоль волокон, поперек волокон и под углом к волокнам (система ЦНИИСК).

Необходимо отметить, что вклеенные стержни, как правило, применяют для соединения элементов, выполненных из клееной древесины в случаях перекрытия значительных пролетов (более 24 метров). В ферменных конструкциях из цельной древесины (при пролетах 18 и менее метров) из-за

нормативных требований по вклейке стержней такой способ решения узлов зачастую неприменим. Представляется целесообразным применить для цельной древесины другие типы клеенных стальных элементов, которые позволили бы достаточно легко выполнять узловые сопряжения с одновременным сохранением всех достоинств узлов на основе клеенных арматурных стержней. Одним из вариантов решения этой проблемы является применение для соединения элементов ферменных конструкций из цельной древесины клеенных плоских стержней (пластин). Пилотные опытно-конструкторские разработки и экспериментально-теоретические работы, проведенные российскими учеными в этом направлении [105, 106, 107], показали большой потенциал таких соединений. Выполненные исследования подтвердили целесообразность и перспективность широкого применения стальных клеенных плоских стержней в вопросах повышения жесткости и несущей способности деревянных конструкций в целом. В случае адаптации результатов проведенных работ и сформулированных рекомендаций к применению в узлах деревянных ферм возможно ожидать существенный технико-экономический эффект.

Таким образом, решение вопросов совершенствования узловых соединений деревянных ферм на основе клеенных стальных плоских стержней и разработки методики их расчета для повышения технико-экономической эффективности и эксплуатационной надежности рассматриваемого класса конструкций является актуальной проблемой.

Диссертационная работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы кафедры строительных конструкций Оренбургского государственного университета «Проблемы проектирования и усиления строительных конструкций» (номер гос. рег. №АААА-А16 116032410045-5, код темы по ГРНТИ: 67.11.37, 67.11.35) с использованием средств гранта Оренбургской области в сфере научной и научно-технической деятельности (Соглашение № 19 от 31.07.2018г.), утвержденного постановлением Правительства Оренбургской области от 19.07.2018 №444-п (номер гос. рег. №АААА-А16 116032410045-5, код темы по ГРНТИ: 67.11.37, 67.11.35).

**Степень разработанности темы.** История развития, совершенствования и применения деревянных ферменных конструкций в строительстве неразрывно связана с совершенствованием их узловых соединений и базируется на разработках русских инженеров XVII-XIX веков Д.И. Журавского, И.П. Кулибина, И.К. Коробова, А.Д. Захарова и др. Эволюционный переход деревянных ферм с узлами в виде традиционных врубок и упоров к соединениям с механическими стальными связями был обоснован трудами таких институтов, как ЦНИИСК, ЦАГИ, ВИАМ, ЦНИИМОД, ВИА, АН УССР, МИСИ, ЛИСИ, Сибстрин. В этой области широко известны труды советских ученых В.В. Большакова, В.Ф. Иванова, Г.Г. Карлсена, В.М. Коченова, М.А. Курышева, А.В. Ляяшина, В.Н. Маслова, Б.О. Николаи, и позднее В.Ф. Бондина, В.С. Деревягина, П.А. Дмитриева, Е.М. Знаменского, М.Е. Кагана, С.В. Колпакова, Н.Ф. Котова, Ю.В. Слицкоухова, Ю.Д. Стрижакова, Г.А. Цвигмана, В.А. Цапаева, В.Ю. Щуко [9, 10, 11, 33, 36, 46, 50, 55, 78, 116, 137, 138, 140, 141].

В дальнейшем 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), Архангельске (САФУ), Йошкар-Оле (ПГТУ), Пензе (ПГУАС) такими учеными как Вдовин В.М., Инжутов И.С., Лабудин Б.В., Линьков В.И., Котлов В.Г., 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 [12, 16, 57, 63, 81, 82, 131, 140]. Конструкторские предложения и внедрение в практику новых типов соединений позволяло повышать жесткость и несущую способность конструкций, а также расширяло область их применения.

Качественно новый скачок в области узловых соединений деревянных ферменных конструкций был достигнут за счет применения стальных клеенных арматурных стержней. Эффективность армирования деревянных конструкций

стальными арматурными стержнями была подтверждена многочисленными исследованиями как клеевых композиций на основе эпоксидных смол и их адгезионных свойств с древесиной, так и армированных балочных конструкций [2, 21, 44, 76, 80, 83, 102-104, 117-119, 142-145, 148, 150]. Группой ученых-исследователей под руководством С.Б. Турковского в 80-х годах на базе проведенных экспериментальных исследований ими предложены алгоритмы расчета узлов на клеенных арматурных стержнях, в том числе расположенных под углом к волокнам древесины [32, 75, 101, 127, 132]. Так называемая «система ЦНИИСК» [131, 132] обеспечивала жесткость и высокую прочность узловых соединений в сравнении с известными отечественными и зарубежными аналогами и позволила возвести множество уникальных большепролетных общественных и производственных зданий различного назначения на основе клееной древесины [33, 35, 49, 79, 82, 110, 111, 112, 131]. Также группой С.Б. Турковского было предложено и испытано соединение на основе арматурных стержней, сваренных в пластину переменной толщины и клеенных в древесину. Были получены высокие показатели прочности предложенного узла за счет пластинчатой формы соединительного элемента, но из-за технологических сложностей дальнейшего применения эта идея не получила.

Стальные пластины как клеенные в массив древесины соединительные элементы для узлов были предложены СоюздорНИИ совместно с ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко в 1964 году. Однако главной причиной остановки исследований в этом направлении явилась плохая адгезия клея к поверхности стальной пластины и, соответственно, незначительная несущая способность предложенного типа соединения.

В начале 2000-х годов российским ученым П.А. Дмитриевым в развитие идеи вклеивания в массив древесины стальных плоских стержней для повышения несущей способности узловых сопряжений было предложено дополнительно обрабатывать поверхности вклеиваемых частей. Это предложение было реализовано в Оренбургском государственном университете путем применения пластин с профрезерованными в них пазами [105]. Экспериментально-



теоретические исследования подтвердили жизнеспособность предложения П.А. Дмитриева и показали как высокую степень адгезии клеевой композиции к металлу, так и гораздо бóльшую несущую способность испытанных узлов в сравнении с вариантами из необработанных пластин. Однако выполненная работа базировалась лишь на одном варианте обработки поверхности пластин, который и был заложен в разработанную методику расчета [106]. Это делает предложенную методику очень узконаправленной и неприменимой к узлам деревянных ферм с другим типом обработки пластин.

О каких-либо дальнейших исследованиях в области совершенствования деревянных ферм с узловыми соединениями на основе клеенных стальных плоских стержней и о работах, связанных с изучением способов обработки поверхности пластин для улучшения адгезии клея с металлом, в технической литературе и других доступных источниках сведения 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 вклеиваемой 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 натуральных 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 клеиваемой 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-стержень» 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 клеиваемых 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 испытательном центре «Оренбургстройиспытания», а также 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 вклеенных 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 вклеенными 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 (Сибстрин), 2016 - 2022 г.г.;

- на Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: проспект Свободный-2016», «Молодежь и наука: проспект Свободный-2017», 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», «Поволжский государственный технологический университет», 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, 2019г.;

- на III Международной научно-технической конференции “International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in

Construction, Industrial and Production Engineering”, (МРСРЕ-2022), Владимир, ВлГУ, 2022г.

В законченном виде работа рассмотрена и одобрена на расширенном научном семинаре кафедры «Строительные конструкции» Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, 2022 г., а также на научном семинаре кафедры «Строительные конструкции» ПГУАС (г. Пенза, 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 конструкций 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);

- акты о внедрении результатов диссертации приведены в Приложении А.

**Личный вклад автора** заключается в решении задач настоящего исследования, проведении экспериментов, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировке и разработке всех основных положений, определяющих научную новизну работы и ее практическую значимость.

К числу наиболее важных результатов, полученных лично автором, относятся: выполнение разработок деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях с отверстиями; определение их технико-экономических характеристик; разработка алгоритма аналитического расчета по определению несущей способности вклеенных в массив древесины стальных плоских стержней; определение рационального способа обработки поверхностей вклеенных стальных плоских стержней, основанного на высверливании сквозных отверстий; разработка конечно-элементной модели узловых соединений деревянных ферм на стальных плоских стержнях с отверстиями; экспериментальные данные, полученные при статических испытаниях разработанных соединений и узлов; установление закономерностей влияния на работу узловых соединений угла приложения силы по отношению к продольной оси стержня и его геометрических параметров, шага и диаметра отверстий, выполненных во вклеиваемой в древесину части стальных плоских стержней; формулировка основных положений методики расчета деревянных ферм с узлами на стальных вклеенных плоских стержнях.

**Публикации.** По теме диссертационного исследования 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 (акты о внедрении результатов диссертации).



# **1 ДЕРЕВЯННЫЕ ФЕРМЫ И ИХ УЗЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

## **1.1 Общие сведения о деревянных фермах и способах соединения их элементов**

Фермы как класс несущих строительных элементов относятся к сквозным конструкциям и находят применение в покрытиях зданий и сооружений различного назначения [23]. В состав ферменных конструкций входят стержневые верхний и нижний пояса, а также элементы решетки. Все стержневые элементы ферм работают, как правило, на продольные усилия сжатия или растяжения. Благодаря концентрации материала в верхнем и нижнем поясах, т.е. в зонах, где усилия имеют максимальные значения, достигается технико-экономическая эффективность ферм в сравнении с плоскостными конструкциями. В связи с этим в строительстве находят широкое применение фермы, выполненные из различных конструкционных материалов – железобетона, металла, дерева. Их изготавливают, как правило, с различными типами решеток с параллельными поясами, треугольного, трапециевидного или сегментного очертаний. В этом значительном номенклатурном ряде особое место занимают деревянные фермы, что объясняется рядом причин.

В частности, деревянные ферменные конструкции широко применяют в зданиях различного назначения (рисунок 1.1), что объясняется их легкостью, простотой монтажа, низкой стоимостью в сравнении с балочными элементами, надежным водоотводом с покрытия. Перечисленные преимущества многократно подтверждены при возведении и эксплуатации различных зданий и сооружений в России и зарубежом. Деревянным фермам также присущи все общеизвестные преимущества древесины как строительного материала – большие запасы и возобновляемость ресурсов, низкая энергоемкость изготовления, высокая относительная прочность элементов, легкая обрабатываемость, эстетичный вид, экологическая чистота и т.п.



Рисунок 1.1 – Монтаж треугольных деревянных ферм  
покрытия сельскохозяйственного здания

Из-за того, что ферменные конструкции состоят из стержневых элементов поясов и решетки, возникает необходимость устройства узловых соединений. Общеизвестно, что эксплуатационная надежность ферм, особенно деревянных, определяется прочностью и жесткостью их узлов, которые являются самой ответственной частью конструкции. Типы узловых соединений деревянных ферм непосредственно связаны с геометрической схемой конструкции. Во всем многообразии способов соединения деревянных стержней в узлах ферм условно можно выделить четыре основные группы:

- контактные соединения (упоры, врубки);
- соединения с применением механических связей (гвозди, винты, нагели, шпонки, шайбы, металлические зубчатые пластины);
- клеевые соединения дерева с деревом и дерева с металлом;
- комбинированные соединения (контактно-механические, клеємеханические, контактноклеевые).

Каждая из этих групп имеет свои неоспоримые преимущества и недостатки, которые принципиально влияют на технико-экономические показатели проектируемых конструкций. Например, гвоздевые соединения просты в изготовлении, но обладают существенной податливостью и невысокой несущей способностью; лобовые упоры обеспечивают надежную работу соединения на сжатие, но их нельзя применять в растянутых стыках; клеевые сопряжения обеспечивают жесткость узлов, но их производство возможно только в заводских условиях и т.д. Перечисленные факты предопределяют и делают актуальным поиск наиболее эффективных и совершенных способов соединения деревянных элементов в узлах ферм.

## **1.2 Отечественный и зарубежный опыт применения ферм на основе древесины в строительной практике**

Добиться существенного улучшения технико-экономических характеристик проектируемых конструкций невозможно без комплексного критического анализа и синтеза наиболее успешных примеров-аналогов, без обзора разработок ведущих специалистов в исследуемой области строительных конструкций. В связи с этим проанализируем путь эволюции деревянных ферм, который неразрывно связан с развитием конструктивных решений узловых сопряжений их элементов. Типы конструкций узлов ферм в основном определяются материалом верхнего и нижнего поясов, в связи с чем представляется целесообразным анализ путей эволюции ферм, выполненных на основе древесины, провести с учетом следующей классификации: цельнодеревянные фермы, фермы на основе клееной древесины, деревометаллические ферменные конструкции и блочные сквозные конструкции на основе древесины.

Эволюция деревянных ферм занимает достаточно длительный период, начиная с эпохи Возрождения, когда благодаря своему прозрению архитектор и строитель Андреа Палладио разработал деревянные фермы для мостовых

переходов (рисунок 1.2). Из чертежей, приведенных в его книге «Четыре книги об архитектуре», видно, что все узлы ферм выполнены при помощи соединений на врубках и лобовых упорах, что было доступно на тот период развития строительной техники (**первый этап эволюции** деревянных ферм).

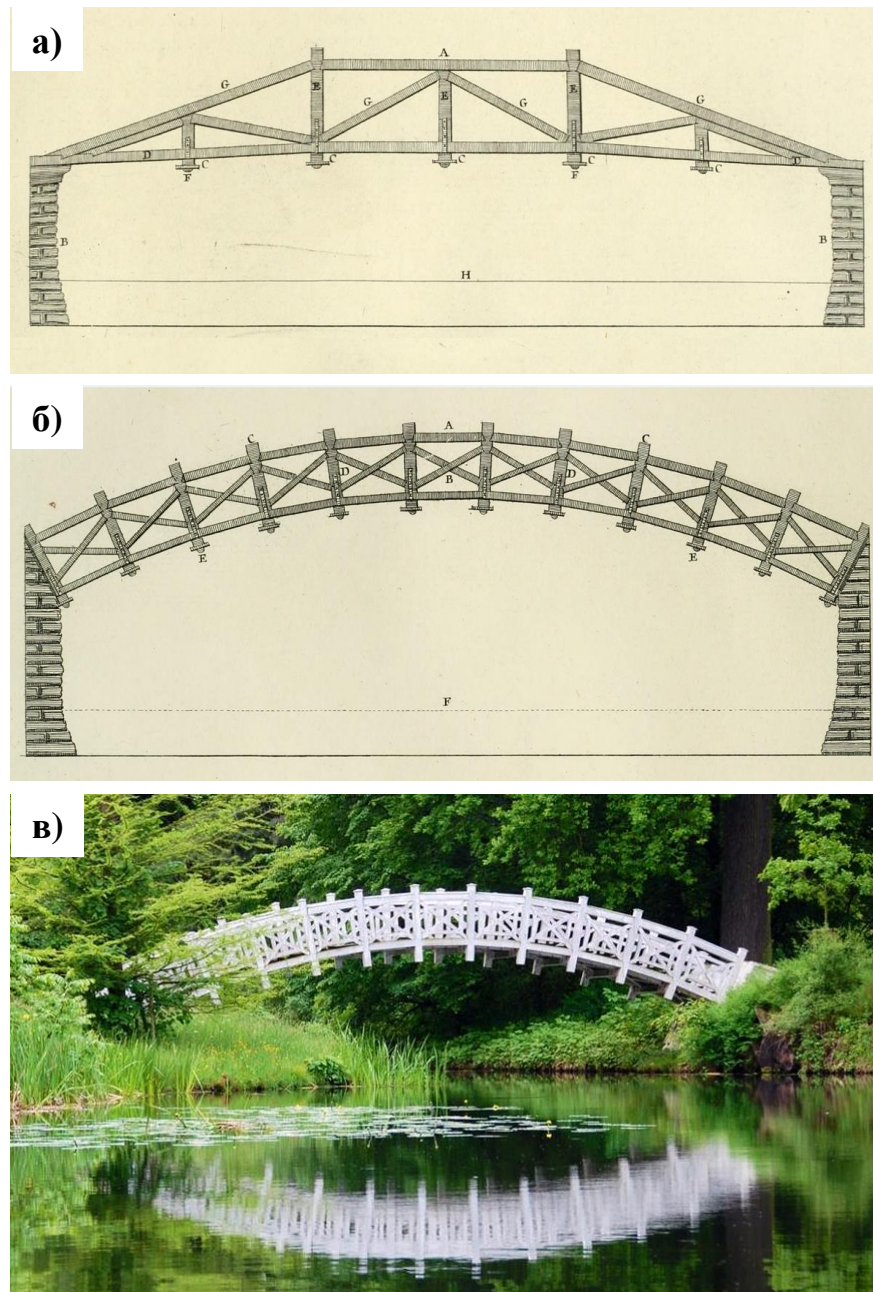


Рисунок 1.2 – Деревянные фермы Палладио балочного (а) и арочного (б) типов; пешеходный мостик с несущими конструкциями из ферм Палладио (в)

Удивление вызывает тот факт, что идеальные геометрические схемы конструкций ферм и способов соединения их элементов были определены

Палладио при отсутствии какой-либо теории их расчета, а также то, что предложенные им фермы послужили аналогами конструктивных решетчатых систем, применяемых в современном строительстве.

Узлы на врубках и упорах широко применялись на всем пути развития деревянных ферм от наслонных стропил к подвесным системам. Такие конструкции использовали в покрытиях зданий с пролетами 12-18 м, а в сочетании со стяжными болтами и тяжами даже до 50 м (**второй этап эволюции** деревянных ферм). Характерным примером являются фермы Бетанкура пролетом 48 метров, установленные в 1817 году в здании Московского манежа. Они простояли до наших дней и лишь в 2004 году были уничтожены пожаром.

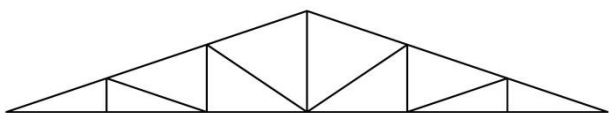
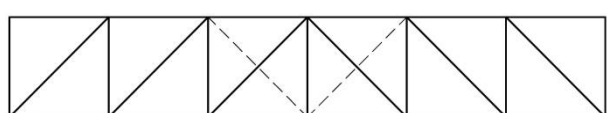
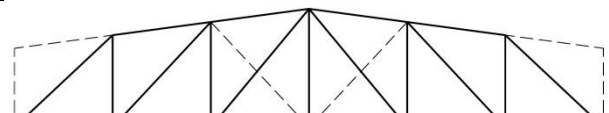
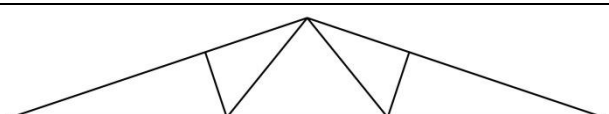
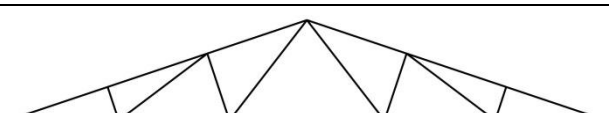
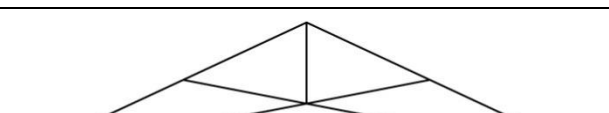
В массовом строительстве наслонные и подвесные (ферменные) стропильные системы с соединениями на врубках, упорах с использованием стальных болтов и хомутов широко применяли как в России, так и за рубежом при перекрываемых пролетах до 18,0 м. Практически при одинаковых конструкциях узлов русские зодчие отдавали предпочтение подвесным системам с М-образной решеткой, канадские – с вспарушенным нижним поясом (фермы-ножницы), шведские – с W или WW-образной решеткой, что по своей сути не имело принципиального значения с точки зрения прочности и жесткости возводимых конструкций. При всем многообразии геометрических схем решеток цельнодеревянных ферм на врубках (таблица 1.1) длина панелей их верхнего и нижнего поясов, как правило, не превышала 3,0 м.

При всех своих достоинствах, главным недостатком ферм на врубках являлась сложность выполнения узловых соединений, их потенциальная опасность хрупкого разрушения от скалывания. Кроме этого, ограничивала область применения таких ферм как недостаточная несущая способность узловых сопряжений, так и их чрезмерная податливость.

Существенно расширить область применения цельнодеревянных ферм на врубках позволила замена конструкции опорного узла на лобовой врубке (рисунок 1.3, а) на узел с применением стальных тяжей и цилиндрических нагелей (рисунок 1.3, б). Однако и этот вариант отличался существенной

податливостью во времени из-за работы древесины на смятие под углом к волокнам во вкладыше и изгиба нагелей в соединении накладок и нижнего пояса.

Таблица 1.1 – Геометрические схемы основных типов цельнодеревянных ферм и их оптимальные перекрываемые пролёты

№ п/п	Геометрическая схема	Пролет, м	Примечание
1		9-12	Стойка-подвеска – стальная или брусчатая
2		12-18	Фермы с М-образной решеткой. Россия
3		12-18	С дублирующими раскосами в средних панелях
4		12-18	С дублирующими раскосами в средних панелях
5		9-12	Шведская система. Фермы с W-образной решеткой.
6		12-18	Шведская система. Фермы с WW-образной решеткой.
7		6-12	Канадская система. Фермы-ножницы со впарушенным нижним поясом

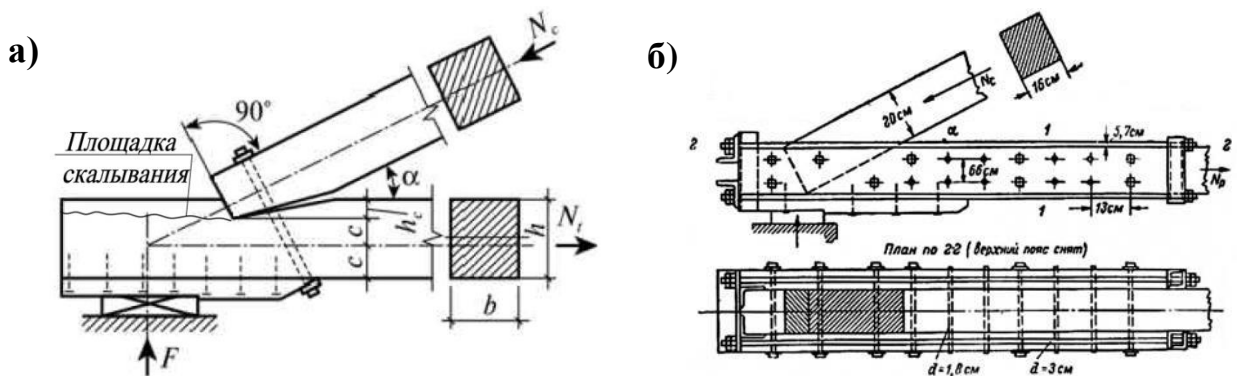


Рисунок 1.3 – Варианты опорных узлов цельнодеревянных ферм:

а – на лобовой врубке; б – на стальных тязях и цилиндрических нагелях

Отметим, что при всех своих недостатках цельнодеревянные фермы на врубках, являясь конструкциями построечного изготовления, в сочетании со стальными соединительными элементами позволили возвести покрытия не одной тысячи зданий, особенно в послевоенное время во второй половине XX века, когда требовалось резко увеличить объемы ввода жилых и производственных зданий с перекрываемыми пролетами до 18,0 м. В качестве примера приведем фермы покрытия первого учебного корпуса ОГУ (г. Оренбург) пролетом 15,0 м (рисунок 1.4). На сегодняшний день применение таких конструкций нецелесообразно ввиду наличия более эффективных и надежных конструкторских решений. Однако во многих существующих зданиях фермы на врубках успешно эксплуатируются, соответственно требуя постоянного наблюдения для обеспечения эксплуатационной надежности.

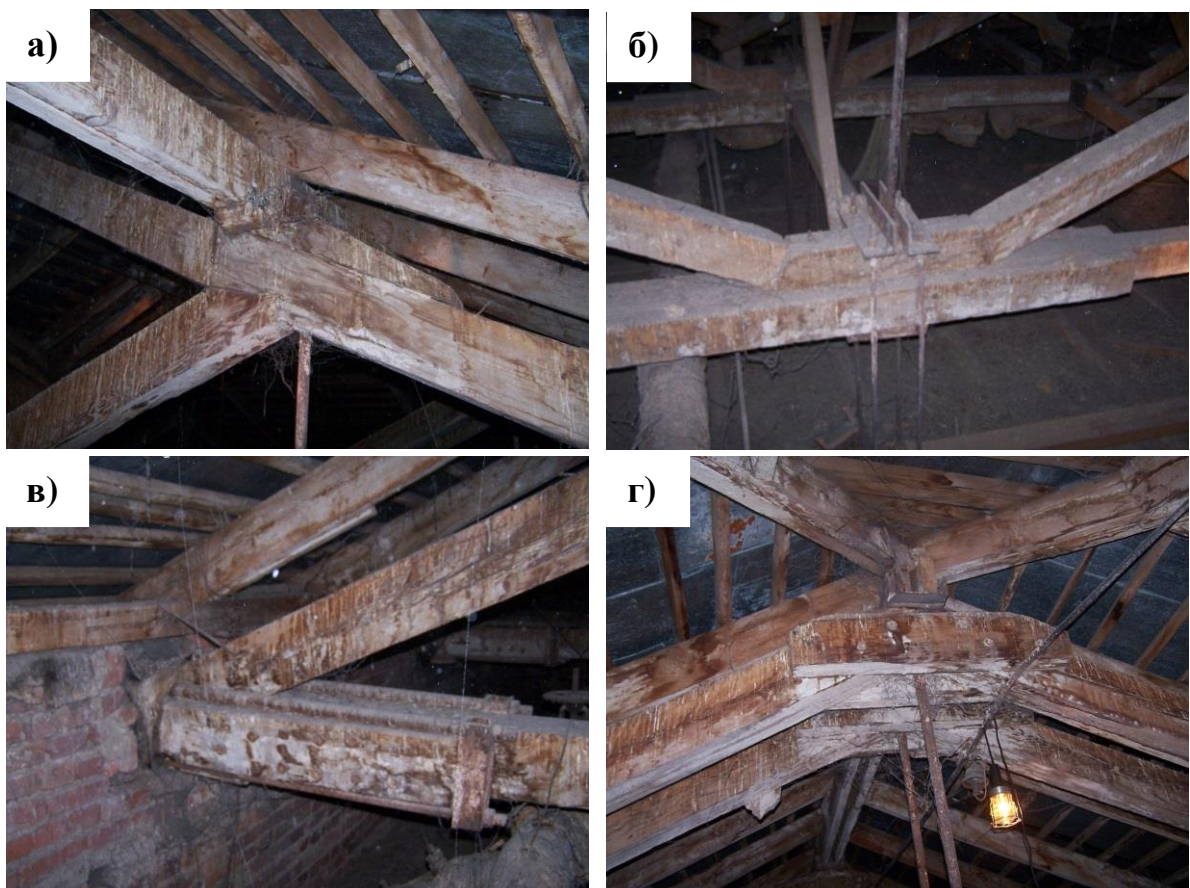


Рисунок 1.4 – Узлы деревянных ферм покрытия первого учебного корпуса ОГУ:

а - узел соединения раскоса и растянутой стойки с верхним поясом; б - узел соединения двух раскосов и растянутой стойки с нижним поясом; в - опорный узел; г - коньковый узел

Развитие в XIX веке деревообрабатывающей промышленности, а также разработка всё более точных методов расчёта решетчатых конструкций (А. Навье, И.В. Шведлер, К. Кульман, Л. Эйлер, Д.И. Журавский и др.), послужили предпосылками для создания новых форм ферменных конструкций. В 20 – 40-х годах XX столетия большое распространение получили дощатые фермы с узлами на шпонках, когтевых шайбах, гвоздях и нагелях. Разработка таких конструкций явилась **третьим этапом** на пути эволюции деревянных ферм. Методика их расчета базировалась на трудах таких известных ученых как В.Н. Маслов, В.Ф. Иванов, Г.Г. Карлсен, А.В. Леняшин, Б.О. Николаи, М.А. Курышев, В.М. Коченов и позднее Е.М. Знаменский, В.В. Большаков, М.Е. Каган, Н.Ф. Котов, В.Г. Леннов, Г.А. Цвигман, В.С. Деревягин, Ю.В. Слицкоухов, П.А. Дмитриев [8, 17, 34, 38, 43, 46, 50, 54, 55, 56, 60, 61, 71, 78, 116, 137]. Соединения на шпонках и когтевых шайбах прошли свой путь эволюции, начиная от деревянных призматических шпонок и до широкой номенклатуры стальных когтевых шпонок и шайб (рисунок 1.5), применение которых актуально и в настоящее время [1, 90, 94, 100].

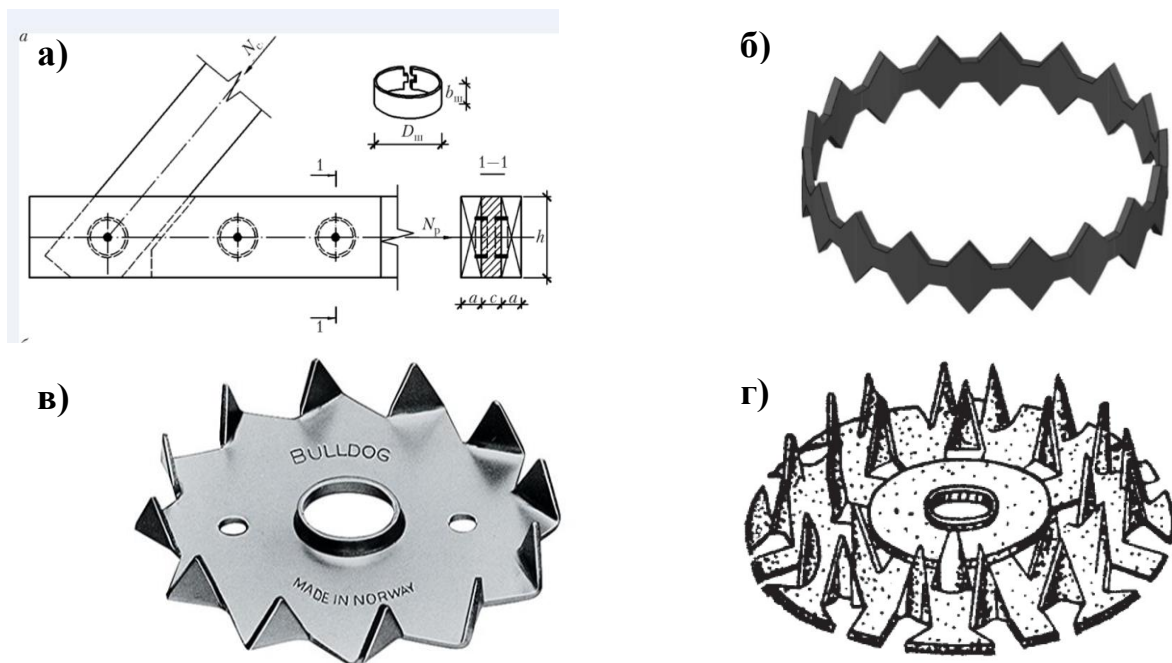


Рисунок 1.5 – Когтевые шпонки и шайбы для применения в узлах деревянных ферм: а – пример опорного узла на шпонках; б – шпонка «Аллигатор»; в – когтевая шайба «Бульдог»; г – когтевая шайба Леннова



В частности, в России в 2021 году введен в действие ГОСТ Р 58933-2020 «Шпонки металлические кольцевые для деревянных конструкций. Технические условия» [31].

Ферменные конструкции на когтевых шпонках и шайбах выполняли чаще всего двускатными в две, три и четыре панели по поясам с закреплением между ними дощатых или брусчатых элементов решетки. Дощатые несущие конструкции отличались от брусчатых более рациональным расходом материала. В разработке таких конструкций принимали участие М.Д. Анненков, П.А. Букреев, И.Я. Иванин, Г.Г. Карлсен, К.П. Кашкаров, Б.А. Освенский, В.Г. Писчиков, Г.В. Свенцицкий, Г.В. Скворцов. Также в дощатых конструкциях достаточно удачно решались узлы с применением стальных цилиндрических нагелей (рисунок 1.6). Находят применение и витые нагели крестообразного сечения, в том числе и при усилении деревянных конструкций [4].



Рисунок 1.6 – Дощатые фермы с соединениями на нагельных болтах

Соединения на зубчатых шпонках и цилиндрических нагелях характеризуются высокой несущей способностью и вязкостью. К недостаткам таких узлов относятся высокая трудоемкость изготовления и точность сборки. Кроме этого к недостаткам зубчатых шпонок относится образование трещин в сопрягаемых элементах и уменьшение несущей способности из-за неравномерности запрессовки шпонок в многорядовых соединениях. Нагельные соединения отличает высокая металлоемкость и деформативность.

Достичь уменьшения трудоемкости нагельных соединений позволил новый тип узлов ферм, выполненный при помощи металлических зубчатых пластин (МЗП), широко применяемый как в нашей стране, так и за рубежом. В России изучению и совершенствованию соединений на МЗП посвящены работы П.А. Дмитриева, В.Г. Котлова, В.Г. Миронова, А.К. Наумова, Ю.В. Пискунова, В.В. Пуртова, С.В. Федосова, Р.И. Хисамова, В.А. Цапаева и других [37, 53, 73, 77, 93, 97, 133, 136, 138]. Многочисленные исследования, проведенные в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, ВНИИдрев, Марийском ПИ, Горьковском ИСИ позволили разработать «Рекомендации по проектированию и изготовлению дощатых конструкций с соединениями на МЗП», благодаря которым фермы с узлами на МЗП (рисунок 1.1) быстро получили широкое распространение в покрытиях сельскохозяйственных и производственных зданий, а также в гражданском строительстве. Пролёт их составляет 9-24 м.

При всем многообразии МЗП их главным недостатком является низкая несущая способность, что существенно ограничивает область применения, в том числе в большепролетных конструкциях. Частично этот недостаток устраняется за счет применения в качестве зубьев дюбелей [96, 97, 146, 152, 153]. Также использование для элементов ферм с соединениями на МЗП бруса неэффективно вследствие нерационального расхода конструкционного материала.

Существенно расширить область применения деревянных ферм позволило применение для их изготовления клееной древесины (**четвертый этап эволюции**). Выполнение поясов ферм из массивных элементов предопределило и необходимость разработки новых типов соединений. К таким соединениям можно отнести соединения на клеенных шайбах, клеевинтовые и клеерезьбовые соединения, применение гвоздевого прижима при склеивании отдельных деревянных элементов ферм [12, 13, 14, 15, 101, 137].

Особо следует отметить узловые сопряжения элементов ферм, выполненные на основе клеенных в древесину арматурных стержней, что явилось скачком в разработке большепролетных ферм, выполненных на основе клееной древесины. Опорный узел большепролетной клееной фермы приведен на рисунке 1.7.

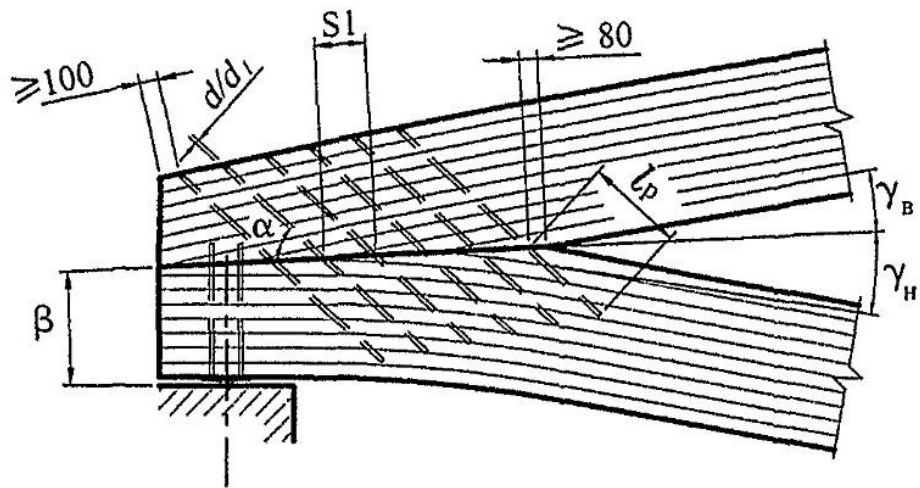


Рисунок 1.7 – Опорный узел клееной фермы, выполненный на вклеенных арматурных стержнях

Применение узловых соединений ферм на основе вклеенных элементов обеспечивает высокую жесткость, как самих узлов, так и ферменных конструкций в целом, что при проектировании особенно большепролетных конструкций является определяющим достоинством.

Разработкой нормативной базы по проектированию конструкций из клееной древесины в России занимается ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. За многие годы работы сотрудниками института было разработано и исследовано множество новых конструкций и их узлов [101, 130, 131, 132]. Особого внимания заслуживает уникальная «система ЦНИИСК», основу которой составляют арматурные стержни периодического профиля, вклеенные в массив клееной древесины под углом к волокнам. Предложенная система, предназначенная для узловых соединений различных типов деревянных конструкций, применена более чем в тысяче зданий и сооружений. Примеры таких зданий с покрытиями из большепролетных ферм показаны на рисунках 1.8 и 1.9.

Отметим, что в соединениях на вклеенных стержнях можно применять композиционные материалы, например стеклопластиковую арматуру или углепластиковые связи. Такие связи предпочтительнее стальных в условиях химически агрессивных сред. Исследования в этом направлении ведутся Г.Г. Кашеваровой, М.А. Водяниковым [18, 51].

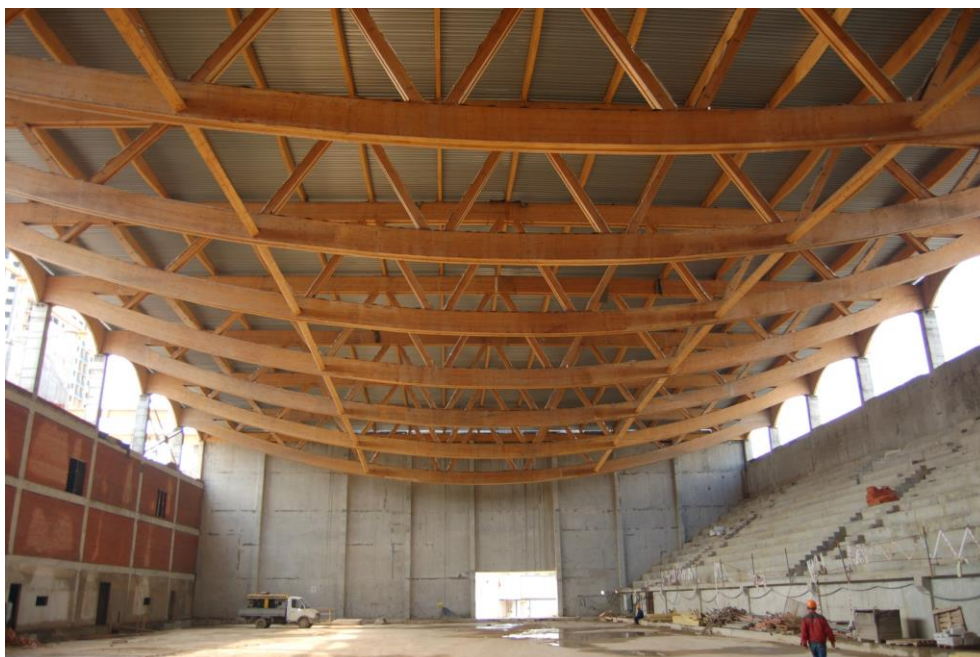


Рисунок 1.8 – Фермы с соединениями на вклеенных стержнях пролетом 48 м в главном зале центра фигурного катания (г. Москва)



Рисунок 1.9 – Покрытие бассейна «Невская волна» из клееных ферм пролетом 45 м (г. Санкт-Петербург)

Необходимо отметить, что вклеенные арматурные стержни периодического профиля по системе «ЦНИИСК» с успехом применяются и в большепролетных

деревометаллических фермах, в которых растянутый нижний стальной пояс органично сочетается с клеодошатым верхним поясом (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Применение деревометаллических ферм с узлами на клеенных стержнях для покрытий конькобежного центра в Крылатском

Вместе с тем, универсальная «система ЦНИИСК», основанная на клеенных под углом к волокнам древесины стальных арматурных стержнях, при всех своих достоинствах имеет и ряд условных недостатков, в частности:

- недостаточная степень технологичности стыков и унификации из-за использования в стыках разнородных элементов из стали (пластин, арматурных стержней), что приводит к увеличению стоимости изготовления стыков и ферм в целом;

- область применения рассматриваемого типа стыков снижает их неразъемность;

- в сквозных конструкциях из цельной древесины из-за особенностей клейки и расстановки клеенных арматурных стержней в узлах система «ЦНИИСК» практически не применима.

Для устранения последнего недостатка были предложены и экспериментально-теоретически исследованы узловые соединений элементов из

цельной древесины, выполненные на основе вклеенных в древесину стальных плоских пластин. В работах И.В. Руднева [106, 107, 108] была доказана перспективность такого типа узлов. Варианты конструктивных решений узлов с применением стальных вклеенных пластин приведены на рисунке 1.11.

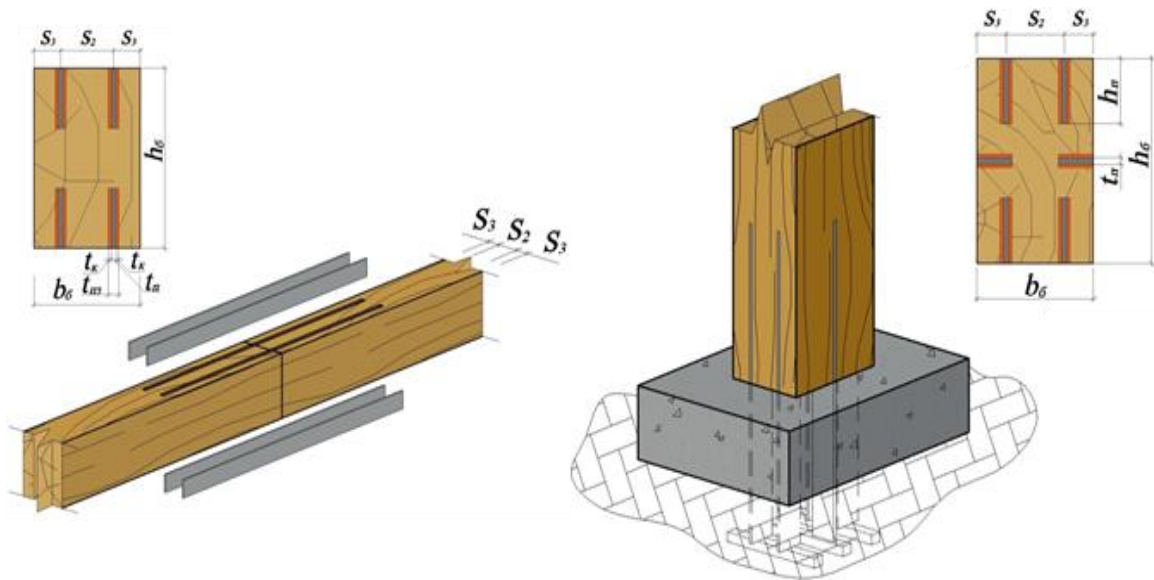


Рисунок 1.11 – Варианты конструктивного решения узлов с применением стальных вклеенных пластин [108]

Отметим, что в проведенных И.В. Рудневым экспериментально-теоретических исследованиях рассматривалась работа вклеенных пластин на выдергивание только в направлении вдоль волокон древесины, что не позволяет применить сформулированные рекомендации к узлам деревянных ферм, в которых такие соединительные элементы работают также на выдергивание в направлении поперек волокон древесины и под углом к ним.

### 1.3 Особенности расчета узлов ферм на основе древесины

Расчет узлов ферм выполняют по различным алгоритмам, которые определяют типы примененных соединительных элементов (врубki, нагели, МЗП, вклеенные арматурные стержни и т.п.). В частности, в узлах ферменных конструкций на нагелях методика расчета построена на расчете нагельных соединений, которая предусматривает и учет угла действия расчетной силы по

отношению к волокнам. Нормативный расчет соединений ферм на МЗП также позволяет учесть угол наклона оси пластины к действующему усилию и угол наклона оси пластины к направлению волокон древесины. В работах [32, 101, 106, 107, 108, 131, 132] доказано, что в случае применения в узлах ферм вклеенных элементов (стержни, пластины) имеет случай неравномерного распределения скалывающих напряжений по их длине. Рассмотрим наиболее характерные теоретические подходы к расчету узлов ферм с привязкой к теме исследования.

С неравномерным распределением напряжений по площадке скалывания мы сталкиваемся при расчете ферм на лобовых врубках (рисунок 1.12).

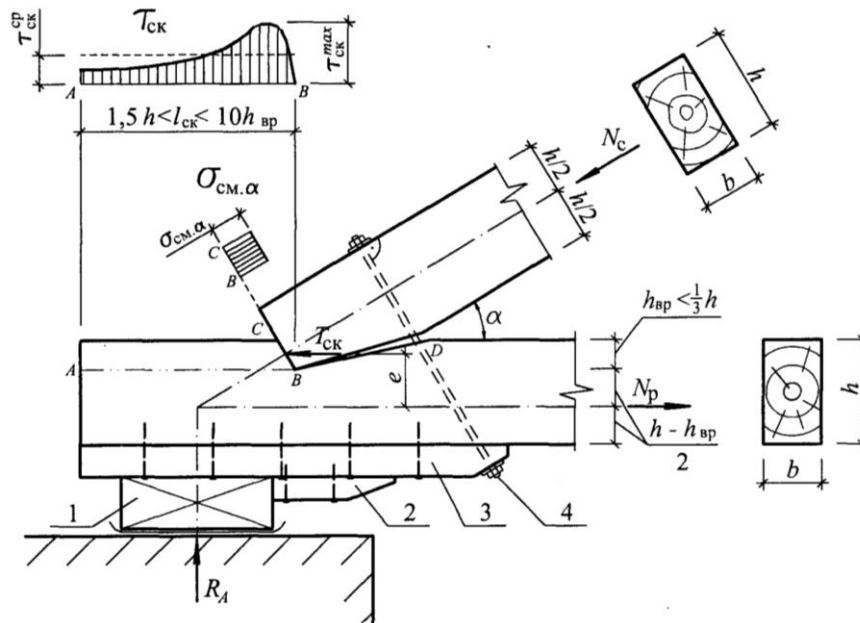


Рисунок 1.12 – Опорный узел фермы на лобовой врубке

Оригинальный подход к учету такой неравномерности предложен составителями строительных норм (СП 64.13330.2017, СНиП II-25-80 и ранее). Эта оригинальность заключается в том, что при сохранении стандартной формулы определения касательных напряжений в предположении их равномерного распределения по длине площадки скалывания в расчет вводится уменьшенное значение расчётного сопротивления древесины на скалывание. Такое уменьшение учитывают коэффициентом  $\beta$ . По предложенной методике расчет соединения на скалывание производится по формуле:

$$\tau_{\text{СК}}^{\text{ср}} = \frac{T_{\text{СК}}}{F_{\text{СК}}} \leq R_{\text{СК}}^{\text{ср}}, \quad (1.1)$$

где  $T_{\text{СК}}$  – расчетная сила скалывания;

$F_{\text{СК}}$  – расчетная площадь скалывания;

$R_{\text{СК}}^{\text{ср}}$  – расчетное среднее по площадке скалывания сопротивление древесины скалыванию вдоль волокон, определяемое как:

$$R_{\text{СК}}^{\text{ср}} = \frac{R_{\text{СК}}}{1 + \beta \frac{l_{\text{СК}}}{e}}, \quad (1.2)$$

где  $R_{\text{СК}}$  – расчетное сопротивление скалыванию вдоль волокон при расчете по максимальному напряжению;

$l_{\text{СК}}$  – расчетная длина плоскости скалывания;

$e$  – плечо сил скалывания;

$\beta$  – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение напряжений скалывания по длине площадки скалывания.

Отметим, что в соединениях на лобовой врубке скалывание происходит только вдоль волокон древесины и, соответственно, значения коэффициента  $\beta$  приведены для этого случая. Для применения вышеприведенной методики для расчета узлов ферм на клеенных плоских стержнях, когда скалывание происходит поперек или под углом к волокнам, использовать предложенный способ расчета нельзя до проведения дополнительных исследований. Однако рассмотренный методический подход можно трансформировать на расчет узлов ферм на стальных клеенных плоских стержнях, в том числе с учетом неравномерной степени распределения скалывающих напряжений по длине клеиваемого стержня.

Узловые соединения деревянных ферм на нагелях рассчитывают с учетом нормативных формул, приведенных в СП 64.13330.2017 [124] на смятие древесины в нагельном гнезде и по изгибу самого нагеля. При этом разрушение стыка от скалывания и раскалывания древесины исключается за счет соответствующей расстановки нагелей, когда расстояния между ними вдоль  $S_1$  и



поперёк волокон  $S_2$  и  $S_3$  принимаются при конструировании узла больше минимально допустимых величин (рисунок 1.13).

Несомненно, что такой подход к расстановке соединительных элементов необходимо рассматривать и при разработке соединений элементов ферм на стальных вклеенных плоских стержнях.

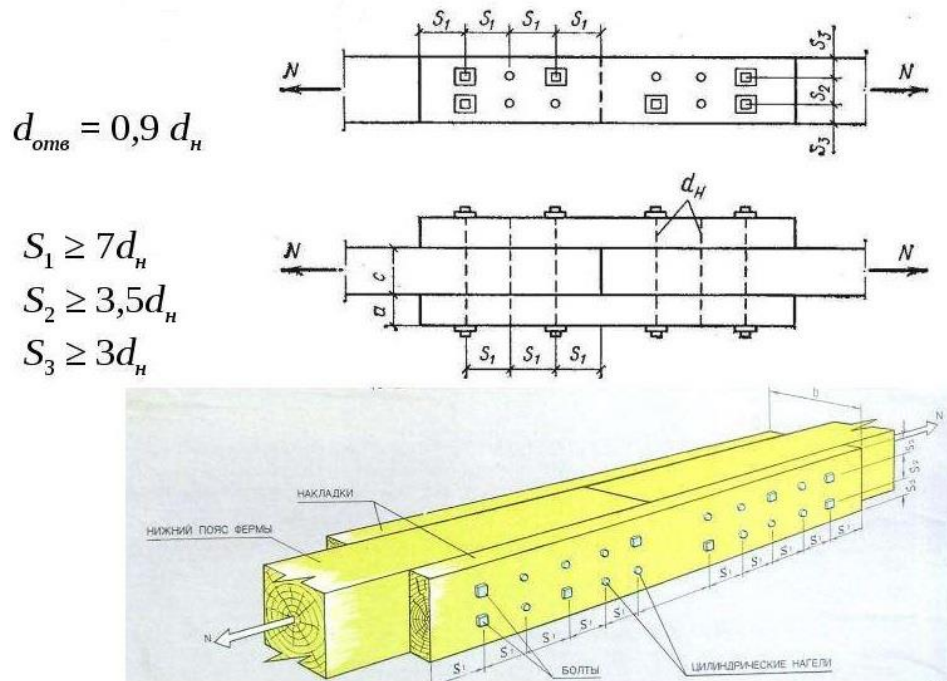


Рисунок 1.13 – Пример растянутого стыка нижнего пояса деревянной фермы, выполненного на стальных цилиндрических нагелях

Отмечая в целом неприменимость методики расчета нагелей к расчету узлов ферм на вклеенных элементах, заметим, что в случае передачи действующего в нагеле усилия под углом к волокнам, его несущую способность необходимо определять с учетом коэффициента  $k_\alpha$ , значение которого зависят от угла и диаметра нагеля и принимаются по таблице 19 [124]. Представляется целесообразным при разработке методики расчета предлагаемых узловых соединений ферм также вводить в расчет аналогичный коэффициент  $k_\alpha$ , значения которого можно определить экспериментальными исследованиями.

Другой методический подход применен при расчете узлов ферм, выполненных на МЗП (рисунок 1.14). Расчетную несущую способность

соединений  $R$  на сдвиг определяют по результатам испытаний образцов с конкретными типами МЗП на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности пластины, в зависимости от угла наклона оси пластины к действующему усилию  $\alpha$  и от угла наклона оси пластины к направлению волокон древесины  $\beta$ . Вследствие различной перфорации пластин при выштамповке зубьев разной формы расчетные характеристики МЗП при растяжении  $R_p$  и срезе  $R_{cp}$  при различном направлении усилия к оси пластин  $\alpha$  определяют по результатам испытаний образцов.



Рисунок 1.14 – Сопряжение элементов деревянной фермы на МЗП

Условие прочности соединения на металлических зубчатых пластинах имеет вид:

$$N < 2RF; \quad (1.3)$$

где  $N$  – нормальное усилие в стержне фермы;

$R$  – расчетная несущая способность соединения на  $1 \text{ мм}^2$ ;

$F$  – расчетная площадь поверхности МЗП с одной стороны стыка, определяемая за вычетом площадей участков пластин в виде полос шириной 10 мм, примыкающих к линиям сопряжения элементов фермы.

По мнению автора такой же подход применим и к расчету узлов ферм на клеенных плоских стержнях. В частности, проведя серию экспериментальных исследований рассматриваемого класса соединений, можно определить

несущую способность клеенного стержня на единицу площади. Далее по определенным усилиям в элементах фермы в результате выполненного статического расчета определим требуемую площадь клеиваемого стержня при допустимых соотношениях его длины и ширины. Несомненно, что при проведении экспериментов необходимо варьировать толщиной стержня, его длиной и шириной, а также соотношением размеров узловых фасонок и непосредственно стержня. Кроме этого, как показывают ранее проведенные исследования [68], при определении расчетного сопротивления клеенного стержня на единицу площади нужно учитывать способ обработки клеиваемой части (насечки, пропилы, отверстия и т.п.). Проводя аналогию с МЗП, отметим, что и в них расчетное сопротивление в формуле (1.3) экспериментально определяют для конкретных толщин пластины, формы зуба, длины зуба и т.п.

Наиболее близкими к теме исследования по своей сути и по характеру работы можно считать соединения на клеенных арматурных стержнях периодического профиля (рисунок 1.15).

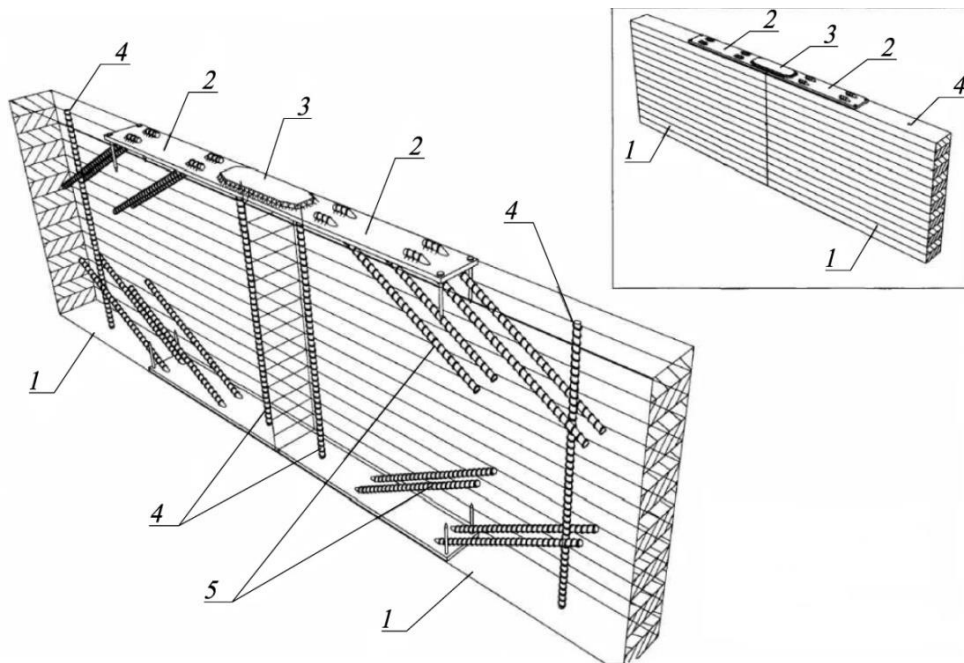


Рисунок 1.15 – Растянутый стык на клеенных стержнях по «системе ЦНИИСК»: 1 - основные стыкуемые элементы; 2 - накладки из полосовой стали; 3 - монтажные накладки на сварке; 4 - арматурные стержни, клеенные поперек волокон; 5 - клеенные наклонные арматурные стержни под углом  $30^\circ - 45^\circ$

Узлы «системы ЦНИИСК» основываются на работе вклеенных в древесину арматурных стержней на сжатие-продавливание и на растяжение-выдергивание. Расчетную несущую способность вклеиваемого под углом к волокнам стержня на выдергивание или продавливание в стыках клееных деревянных конструкций следует определять по формуле, приведенной в СП 64.13330.2017 [124]:

$$T = R \cdot \pi \cdot d_1 \cdot l_p \cdot k_c \cdot k_\sigma \cdot k_d \cdot m_{дл} \cdot \Pi m_i \leq F_a \cdot R_a, \quad (1.4)$$

где  $R$  – расчетное сопротивление древесины выдергиванию или продавливанию вклеенного стержня;

$d_1$  – диаметр отверстия, м;

$l_p$  – расчетная длина стержня, м;

$l$  – длина заделываемой части (глубина вклеивания);

$l_o$  – глубина возможного снижения прочности клеевой прослойки при сварке;

$d$  – диаметр вклеиваемого стержня, м;

$k_c$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения напряжений сдвига в зависимости от длины заделываемой части стержня;

$k_\sigma$  – коэффициент, зависящий от знака нормальных напряжений вдоль волокон в зоне установки стержней;

$k_d$  – коэффициент, учитывающий зависимость расчетного сопротивления от диаметра стержня;

$F_a$  – площадь сечения стержня;

$R_a$  – расчетное сопротивление материала стержня;

$m_{дл}$  – коэффициент длительной прочности, соответствующий режиму длительности загрузки;

$\Pi m_i$  – произведение коэффициентов условий работы.

Отметим универсальность, простоту и удобство пользования формулой (1.4), предложенной составителями норм по расчету деревянных конструкций. Например, коэффициент  $k_c$  легко определяют по формуле:

$$k_c = 1,2 - 0,02 \frac{l}{d}, \quad (1.5)$$

где  $l$  – длина заделываемой части стержня, м.

Недостатком соединений на клеенных стержнях является то, что они применимы только для элементов с большими поперечными сечениями (клееная древесина). Для конструкций из цельной древесины, в частности для ферм, из-за значительной величины длины клеивания они неприменимы.

Этот недостаток можно устранить за счет клеивания в массив древесины стальных пластин. Практическая методика расчета таких узлов, рассмотренная в работе [106], фактически аналогична вышеприведенной методике расчета клеенных арматурных стержней, предложенной и апробированной С.Б. Турковским и А.А. Погорельцевым [131, 132]. При этом расчетная формула для определения несущей способности клеенных вдоль волокон стальных пластин представляет из себя выражение:

$$T \leq R_{ск} \cdot n \cdot b \cdot l \cdot k_t \cdot k_l \cdot k_{nl}, \quad (1.6)$$

где  $R_{ск}$  – расчетное сопротивление древесины скалыванию вдоль волокон, МПа, определяемое по поз. 5г таблицы 3 СП 64.13330.2017 [124];

$n$  – количество пластин в соединении;

$b$  – ширина клеиваемой пластины, м;

$l$  – длина клеиваемой части пластины, м;

$k_t$  – коэффициент снижения несущей способности клееного соединения в зависимости от толщины пластины, определяемый по формуле:

$$k_t = 0,85 + 30t_{nl}, \quad (1.7)$$

где  $t_{nl}$  – толщина пластины в метрах;

$k_l$  – коэффициент снижения несущей способности клееного соединения в зависимости от длины клеенной части пластины, определяемый по формуле:

$$k_l = 1,125 + 0,9l^2 - 1,36l \quad (1.8)$$

$k_{nl}$  – коэффициент, учитывающий возможную неравномерность распределения нагрузки между параллельно работающими пластинами, равный 1,0 для двух параллельно работающих пластин; 0,95 – для четырех пластин;

0,90 – для шести пластин и 0,82 – для восьми пластин.

Отметим, что предложенная И.В. Рудневым методика применима только для случаев работы клеенных стальных пластин на выдергивание-вдавливание в направлении вдоль волокон древесины. Также она распространяется на пластины со строго определённой технологией обработки клеиваемой части, в частности, при помощи наклонных профрезерованных пазов. Особенности расчета стальных пластин с другим типом обработки поверхностей, а также их применение в узлах ферм И.В. Рудневым не рассматривались.

#### **1.4 Пути совершенствования узловых соединений деревянных ферм**

Повышение технико-экономических параметров ферменных конструкций из цельной древесины невозможно без применения новых типов узловых соединений. На сегодняшний день представляют интерес узлы с применением стальных деталей, клеиваемых в массив древесины, в виде арматурных и плоских стержней. К достоинствам стальных плоских стержней по сравнению с известными соединительными элементами, в том числе с клеенными арматурными стержнями, можно отнести достаточно высокую прочность, жесткость узловых сопряжений, компактность при размещении в поперечном сечении элемента, а также возможность использования в элементах ферм из цельной древесины.

Эксперименты с клеенными плоскими стержнями проводились еще в 60-х годах прошлого столетия. Однако образцы соединений, из-за низкой адгезии клея к металлу, разрушались даже при незначительных нагрузках, вследствие чего метод не нашел применения в практике. Для устранения этого недостатка в 2012 году профессор П.А. Дмитриев высказал идею, что дополнительная обработка поверхности плоских стержней перед их клейкой значительно повысит несущую способность соединения. Эту идею развил и исследовал в своей диссертационной работе И.В. Руднев, выполнив экспериментально-теоретические исследования в лабораториях кафедры строительных

конструкций ОГУ (г. Оренбург) [108]. Вклеиваемая в массив древесины часть плоского стержня, по предложению И.В. Руднева, имела профрезерованные пазы, за счет чего несущая способность соединения по сравнению с необработанными стержнями была повышена более чем в 2 раза. С учетом этого факта были разработаны варианты узловых соединений с применением предложенных соединительных элементов. Однако, обработка плоских стержней профрезерованными пазами отличалась значительной трудоемкостью.

В связи с этим автором была выдвинута гипотеза, что снизить трудоемкость обработки поверхности вклеиваемой части плоских стержней с одновременным увеличением их несущей способности возможно за счет применения другого более экономичного способа обработки, в частности, путем выполнения сквозных отверстий. В такой конструкции клей будет соединять деревянные стенки паза напрямую, выполняя фактически роль шпонок, объединяющих две параллельно работающие клеевые прослойки. Внешняя нагрузка будет восприниматься не только силами соединения клея с металлом, но и «клеевыми шпонками», которые одновременно с этим будут предохранять деревянные элементы от раскалывания. Выполнение отверстий более технологично, чем выполнение пазов или насечек.

Также была выдвинута гипотеза, что вклеенные плоские стержни могут эффективно работать на вдавливание-выдергивание при передаче усилия под различными углами по отношению к волокнам древесины, т.е. такой тип соединения может быть эффективно использован в узлах деревянных ферм.

Для подтверждения высказанных гипотез проведены испытания двух серий образцов (по три образца в каждой серии), при этом конструкция образцов с передачей усилия выдергивания вдоль волокон для сопоставления полученных результатов была полностью аналогична образцам, испытания которых приведены в [108]. Изготовление образцов было проведено по такой же технологии, примененной для изготовления образцов с профрезерованными пазами [108]. Общий вид экспериментальных образцов с вклеенными плоскими стержнями с отверстиями показан на рис. 1.16.



б)

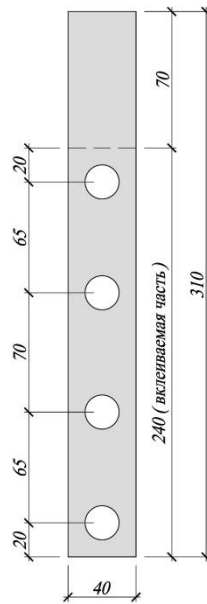


Рисунок 1.16 – Общий вид экспериментальных образцов с вклеенными плоскими стержнями с отверстиями: а – общий вид образца и вклеиваемого стержня; б – характерные размеры вклеиваемого плоского стержня

Проведенные пилотные эксперименты в целом подтвердили высказанные гипотезы. Так, испытания соединения с вклеенными в деревянный брусок плоскими стержнями с отверстиями (рис. 1.17), работающего на растяжение, показали, что в сравнении с образцами первой серии (с наклонными профрезерованными пазами) их несущая способность в 1,21 раза выше.

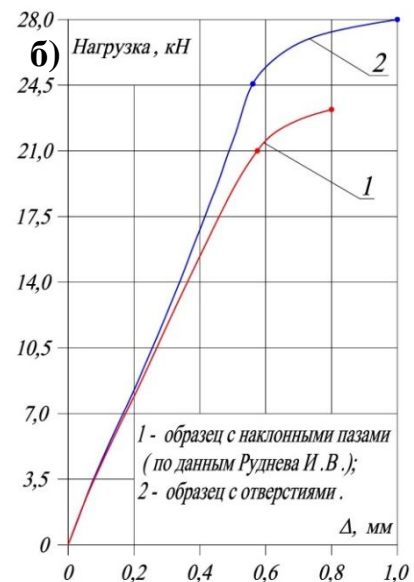


Рисунок 1.17 – Испытание опытных образцов (а) и график их деформирования (б)

На графике на рисунке 1.17, б приведены среднеарифметические значения по результатам испытания трех образцов в каждой серии. Также все три образца



второй серии имели меньшую деформативность. В частности, при достижении предела пропорциональности величина смещения вклеенного стержня с профрезерованными пазами составила в среднем 0,59 мм, а аналогичная величина образцов с отверстиями 0,55 мм.

Несомненно, что для применения предлагаемого способа соединения в узлах деревянных ферм необходимо провести комплекс исследований, связанных с определением рациональных параметров, таких как диаметр высверленных отверстий, толщина и длина вклеиваемой части стержня. При этом характер распределения отверстий следует принять по изменению напряженно-деформированного состояния стержня по длине вклеивания, положив в основу условие равнопрочности. Также встает вопрос о влиянии на несущую способность соединения угла приложения силы к вклеенному стержню по отношению к волокнам древесины с учетом ее анизотропных свойств [6], что весьма характерно для узловых соединений деревянных ферм. Такая особенность работы была исследована, например, по отношению к вклеенным поперек волокон древесины арматурным стержням, работающим на выдергивание-вдавливание в работах [92, 135]. Работа вклеенных стальных плоских стержней при передаче на них усилия под углом к волокнам до настоящего времени не изучалась.

### **1.5 Выводы по первой главе. Постановка задач исследования**

Анализируя отечественные и зарубежные конструкции и технические решения деревянных ферм и их узлов, можно констатировать, что рассматриваемый класс конструкций широко применяется как в отечественном, так и в зарубежном строительстве. При этом потенциал деревянных ферм далеко не исчерпан. В первую очередь это касается вопросов усовершенствования узловых сопряжений, определяющих прочность, жесткость и эксплуатационную надежность проектируемых конструкций в целом. Дальнейшее развитие и совершенствование узлов ферм, выполненных из цельной древесины, должно

быть направлено на повышение их жесткости и несущей способности, а также на улучшение общих технико-экономических показателей. Одним из перспективных путей решения такой задачи является применение в узлах деревянных ферм вклеенных стальных соединительных элементов. В ферменных конструкциях из цельной древесины представляется весьма эффективно использовать такие элементы в виде стальных плоских стержней.

Таким образом, целью диссертационной работы явилась 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, вклеенных 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.

## **2 ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА РАБОТЫ СТАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЕЙ В СОЕДИНЕНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

### **2.1 Особенности напряженно-деформированного состояния стальных плоских стержней, работающих в узлах ферм**

До настоящего времени исследованы особенности напряженно-деформированного состояния узловых соединений деревянных элементов, в которых клеенные плоские стержни работают на выдергивание в направлении вдоль волокон древесины [108]. При этом в узлах деревянных ферм направление действия усилий на соединительные элементы может быть по разному направлено по отношению к волокнам древесины (вдоль, поперек или под углом), а также вызывать выдергивание или вдавливание клеенных плоских стержней. Этот факт влияет на напряженно-деформированное состояние соединения в целом. Кроме того, направления усилий и их центрация определяют конструкцию соединительного элемента и способы обеспечения несущей способности таких узловых сопряжений. Какие-либо рекомендации по конструированию и расчету узлов ферм на основе клеенных плоских стержней или результаты исследований по этому вопросу в научно-технической литературе отсутствуют, что, с одной стороны, препятствует применению рассматриваемого способа соединения в реальном проектировании, с другой стороны, обосновывает актуальность проведения исследований в предложенном направлении.

Практически во всех типах деревянных ферм присутствуют К-образные узлы, соединение стоек с поясами, стыки нижнего пояса, примыкание раскосов к поясам. Опорные узлы отличаются по своей конструкции в зависимости от геометрических схем ферм. Коньковые узлы, присущие треугольным и трапецидальным фермам, также зависят от типа применяемой решетки.

В предлагаемом варианте ферм вне зависимости от типа проектируемых узлов в массив древесины будет вклеиваться плоский стержень прямоугольной формы, а конфигурация его не вклеиваемой части будет определяться количеством соединяемых элементов фермы, углом примыкания элементов друг к другу и действующими в них усилиями (например, узел по рисунку 2.1). Количество элементов, соединяемых в узлах ферм, как правило, не превышает трех. Реальные углы наклона раскосов к поясам и примыкание стоек составляют от  $30^\circ$  до  $90^\circ$ . Усилия, действующие в элементах, зависят от величины приложенной к конструкции нагрузки, выбранной геометрической схемы, перекрываемого пролета, шага расстановки ферм и в целом определяют область применения конструкции.

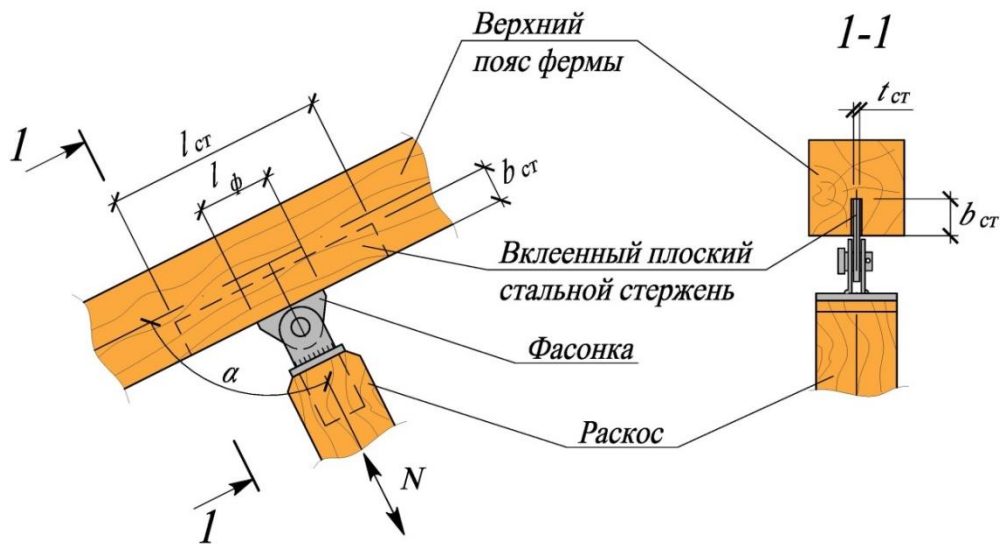


Рисунок 2.1 – Конструктивное решение узла сопряжения раскоса с верхним поясом деревянной фермы при помощи вклеенных стальных плоских стержней

Вышеприведенные особенности напряженно-деформированного состояния стальных плоских стержней, работающих в узлах ферм, необходимо учитывать при расчете несущей способности узлового соединения. При работе вклеенных плоских стержней на выдергивание в направлении вдоль волокон древесины используется зависимость, приведенная в работе [106]:

$$T \leq R_{ск} \cdot n \cdot b \cdot l \cdot k_t \cdot k_l \cdot k_{nl}, \quad (2.1)$$

где  $R_{ск}$  – расчетное сопротивление древесины скалыванию вдоль волокон,

МПа, определяемое по п. 6.1 СП 64.13330.2017 [124];

$n$  – количество пластин в соединении,  $2 \leq n \leq 8$ ;

$b$  – ширина клеиваемой пластины, м,  $0,04m \leq b \leq 0,10m$ ;

$l$  – длина клеиваемой части пластины, м,  $2b \leq l \leq 8b$ ;

$k_t$  – коэффициент снижения несущей способности клеевого соединения в зависимости от толщины пластины;

$k_l$  – коэффициент снижения несущей способности клеевого соединения в зависимости от длины клеенной части пластины;

$k_{nl}$  – коэффициент, учитывающий возможную неравномерность распределения нагрузки между параллельно работающими пластинами, равный 1,0 для двух параллельно работающих пластин; 0,95 – для четырех пластин; 0,90 – для шести пластин и 0,82 – для восьми пластин.

Отметим, что при разработке расчетной зависимости (2.1) автор исходил из предположения, что клеенная пластина имеет заведомо большую несущую способность, как по материалу самой пластины, так и по шву «клей-металл» за счет специальной обработки её поверхности, чем по шву «клей-древесина», т.е. несущая способность соединения определена из условия скалывания древесины вдоль волокон. Такой подход целесообразно реализовывать и при расчете узлов ферм. При этом, в частности, необходимо учитывать, что в соответствии с таблицей 3, п. 6.7 [124] расчетное сопротивление древесины скалыванию в направлении под углом или поперек волокон древесины существенно ниже расчетного сопротивления скалыванию древесины вдоль волокон. Также в узлах ферменных конструкций клеенные плоские стержни работают на выдергивание или вдавливание, что также может повлиять на их несущую способность.

Кроме этого, требуется подтверждение или корректировка коэффициентов, приведенных в формуле (2.1) в случае действия расчетного усилия под углом по отношению в оси стержня. Способ обработки поверхности пластин должен обеспечивать хорошую адгезию клеевого состава и металла пластины вплоть до разрушения от скалывания древесины в независимости от угла приложения силы по отношению к волокнам древесины.

Учет изложенных аргументов послужил отправной точкой по определению направления настоящих численных и экспериментальных исследований.

## **2.2 Цель и задачи численных и экспериментальных исследований**

На основании изложенного в разделе 2.1 целью численных и экспериментальных исследований является изучение фактического напряженно-деформированного состояния и его учет при расчете предложенного типа соединений. Для достижения поставленной цели решались следующие взаимосвязанные задачи:

- разработать модели характерных узловых соединений ферменных конструкций в программном комплексе ANSYS;
- определить перечень варьируемых параметров и их влияние на несущую способность рассматриваемого класса соединений;
- оценить характер распределения напряжений по длине и ширине вклеенных плоских стержней в зависимости от способа обработки их поверхностей;
- сравнить полученные данные с результатами ранее проведенных исследований;
- экспериментальными методами подтвердить адекватность результатов, полученных численными исследованиями;
- определить разрушающие нагрузки для рассмотренных вариантов.

## **2.3 Методика численных исследований соединений на стальных плоских стержнях**

Для исследования работы предлагаемых соединительных элементов в узлах деревянных ферм в программном комплексе ANSYS были созданы конечно-элементные модели экспериментальных образцов [70], с геометрическими и механическими параметрами идентичными параметрам натуральных образцов, на которых в дальнейшем и выполнялись экспериментальные исследования.

Разработанные натурные образцы представляют собой упрощенные модели узловых соединений (рисунок 2.2 - 2.3).

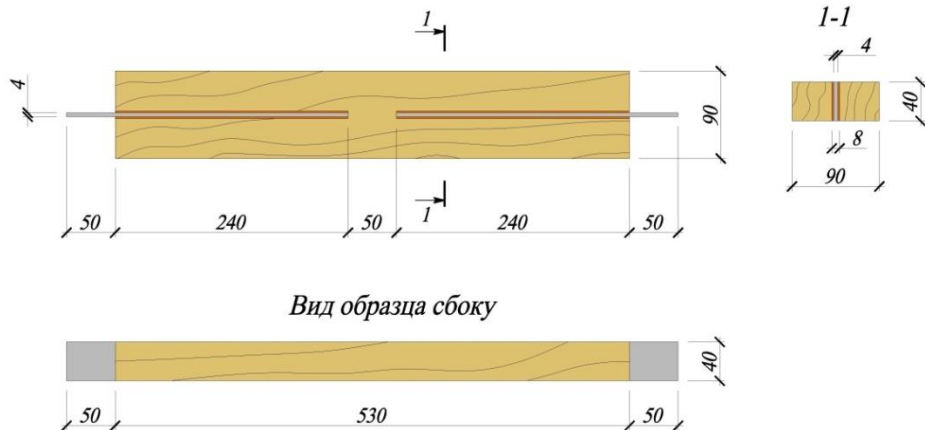


Рисунок 2.2 – Модель образца для исследования работы соединения на выдергивание плоского стержня вдоль волокон древесины

Причем модель образца для исследования работы соединительного элемента на выдергивание вдоль волокон создавалась идентичной, использованной в работе [108] для возможности сопоставления результатов и проведения анализа влияния варьируемых параметров.

Плоские стальные стержни для образцов моделировались с отверстиями во вклеиваемой части. Такой способ обработки поверхности соединительного элемента является наиболее технологичным и обеспечивает необходимое сцепление клея с металлом. Для сравнения с ранее предложенными способами обработки поверхности проведены численные и натурные испытания образцов.

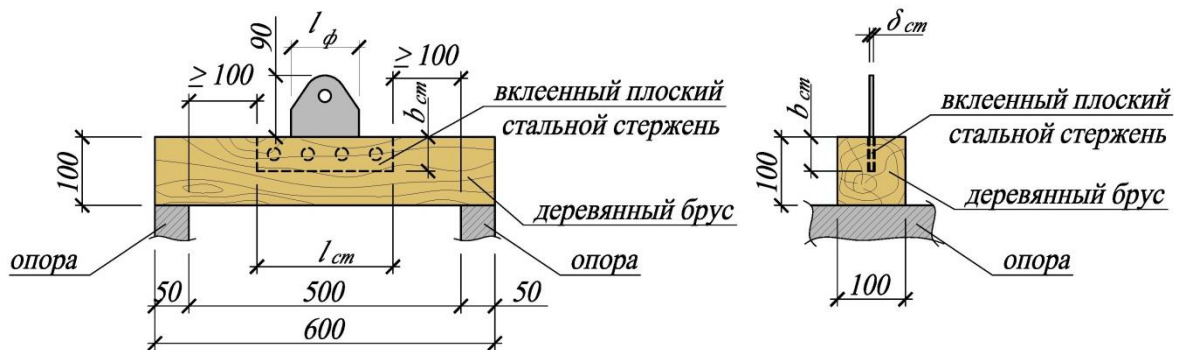


Рисунок 2.3 – Модель образца для исследования работы соединения на выдергивание и вдавливание плоского стержня поперек волокон древесины и под углом к ним

Модель образца для исследования работы соединительного элемента на выдергивание-вдавливание поперек волокон и под углом к ним представляет собой узловое соединение пояса фермы с элементом раскосной решетки. Для объективности исследования и адекватности сравнения разные варианты нагружения прикладывались к одинаковым моделям.

Выбор программного комплекса ANSYS обусловлен большим набором инструментов и высокой точностью результатов. В инструментарии программы заложены различные типы конечных элементов и реализована возможность применения нерегулярной сетки, что позволяет адекватно разбивать на конечные элементы детали сложной конфигурации, в том числе из различных материалов.

При построении пространственной геометрической модели была применена САД-система, а именно среда 3D моделирования программы AutoCAD, расширенный функционал которой позволяет детально прорисовывать сборочную единицу с заданием ее элементам свойств твердых тел.

В сборочную единицу вошли: деревянный брус с пазом в верхней грани, плоский стальной стержень в качестве соединительного элемента, клеевая прослойка (геометрия клеевой прослойки построена с учетом отверстий, расположенных в стальном плоском стержне), приспособление для передачи нагрузки, состоящее из вилки и штифта, опоры (рисунок 2.4).

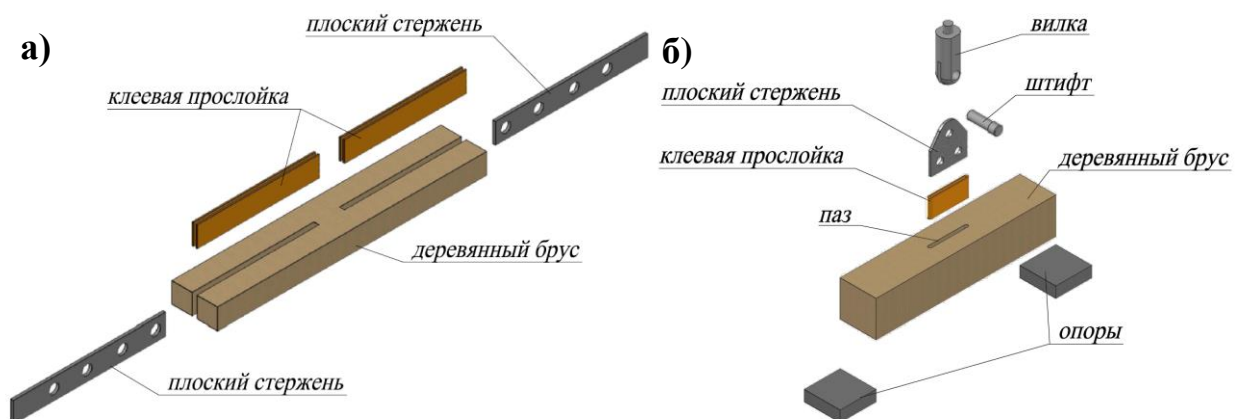


Рисунок 2.4 – Поэлементная схема моделей узлового соединения: а) модель образца для исследования на выдергивание вдоль волокон; б) модель образца для исследования на выдергивание-вдавливание под углом к волокнам



Для построения тел был последовательно использован следующий набор операций: вычерчивание контура, выдавливание, вычитание вспомогательных объектов, объединение твердых тел. После построения моделей элементов соединения осуществлялась его сборка путем сшивания по поверхностям. Завершающим этапом построения геометрической модели в программном комплексе AutoCAD в среде 3D моделирования для совместимости полученной модели с расчетным комплексом ANSYS было сохранение полученной пространственной геометрии в формат \*.sat.

Для задания различных условий были выполнены три модели, показанные на рисунке 2.5, отличающиеся местами закрепления и приложением нагрузки:

- а) модель, в которой осевая нагрузка, приложенная вдоль волокон, выдергивает соединительный элемент из массива бруса;
- б) модель, в которой вертикальная нагрузка, приложенная поперек волокон или под углом к ним, вдавливает соединительный элемент в массив бруса;
- в) модель, в которой вертикальная нагрузка, приложенная поперек волокон или под углом к ним, выдергивает соединительный элемент из массива бруса.

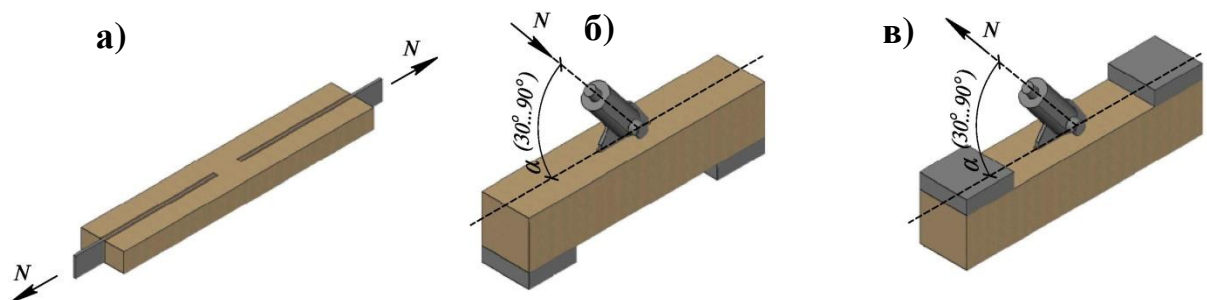


Рисунок 2.5 – Модели сборочных единиц для различного нагружения в сборе: а) модель образца для исследования на выдергивание вдоль волокон; б) модель для исследования на вдавливание поперек волокон и под углом к ним; в) модель для исследования на выдергивание поперек волокон и под углом к ним

С целью выполнения расчета сборочной единицы в ПК ANSYS был задан тип физического анализа, тип расчета – статический расчет. Выбран тип

конечного элемента – Solid 185 (смотри рисунок 2.6) как описывающий деформации материала с учетом пластичности, ползучести в условиях больших и малых перемещений и деформаций.

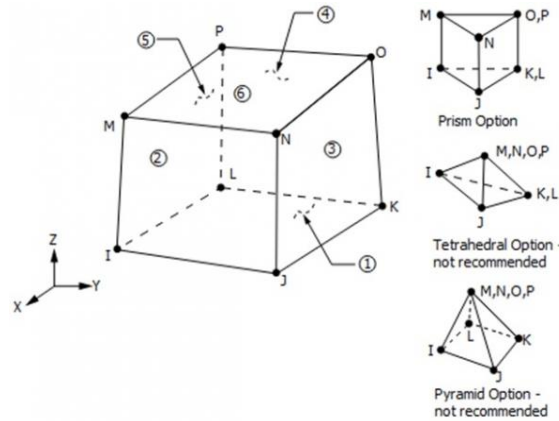
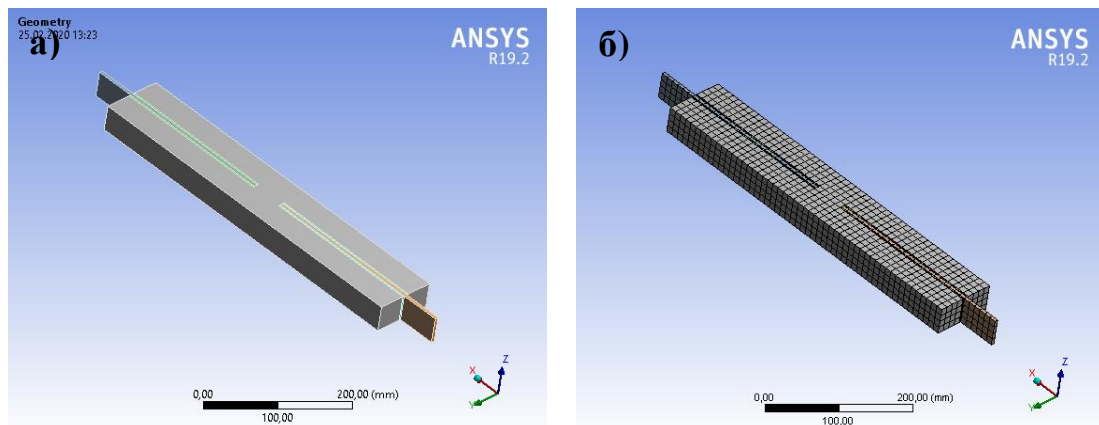


Рисунок 2.6 – Геометрия элемента Solid 185

После подготовки параметров расчета и выбора типа конечных элементов геометрическая модель была транслирована в программу. Общий вид импортированных моделей в среде ANSYS Mechanical представлен на рисунках 2.7,а и 2.8,а.



а) общий вид модели; б) конечно-элементная сетка

Рисунок 2.7 – Вид конечно-элементной модели для проведения численных исследований (выдергивание вдоль волокон): а – общий вид модели; б – конечно-элементная сетка

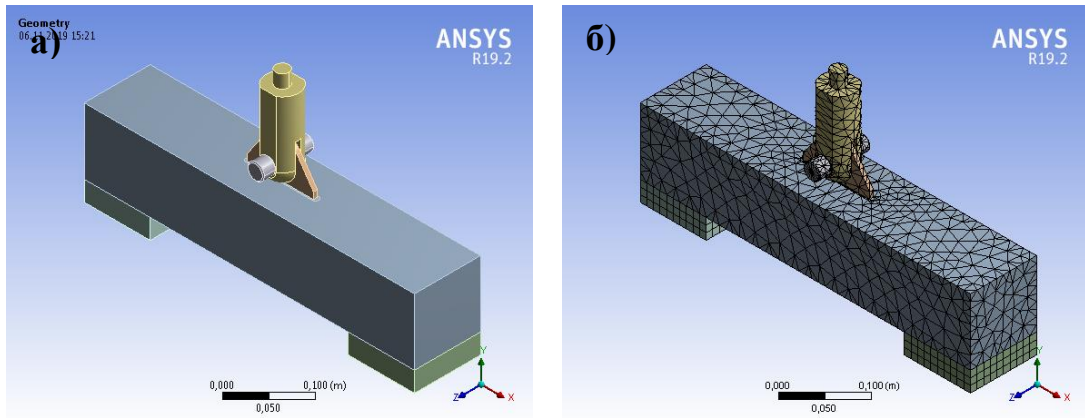


Рисунок 2.8 – Вид конечно-элементной модели для проведения численных исследований (выдергивание-вдавливание поперек волокон и под углом к ним):

а – общий вид модели; б – конечно-элементная сетка

Каждому элементу модели заданы нормативные физико-механические характеристики, приведенные в соответствующих СП [120, 123, 124]. Брусу заданы физико-механические характеристики древесины сосны 2-го сорта: модуль упругости вдоль волокон – 10 000 МПа, поперек волокон – 400 МПа, коэффициент Пуассона поперек волокон – 0,45, коэффициент Пуассона вдоль волокон – 0,018, модуль сдвига вдоль и поперек волокон – 500 МПа. Вклеиваемому плоскому стержню, а также всем стальным соединительным деталям заданы характеристики стали марки СтЗпс: модуль упругости – 210 000 МПа; коэффициент Пуассона – 0,3; модуль сдвига – 81 000 МПа. Клеевая прослойка смоделирована из эпоксидной композиции с модулем упругости – 3000 МПа, коэффициентом Пуассона – 0,37, модулем сдвига – 1095 МПа.

Далее, в препроцессинге, была автоматически сгенерирована конечно-элементная сетка для сборочной единицы, показанная для разных моделей на рисунках 2.7,б и 2.8,б. Для модели, исследуемой на выдергивание соединительного образца вдоль волокон, закрепление осуществлялось по торцевой грани одного из плоских стержней. Тип закрепления был выбран Fixed Support. Нагрузка прикладывалась перпендикулярно торцевой поверхности другого плоского стержня.

Для других моделей закрепление осуществлялось по опорным площадкам размерами  $100 \times 100$  мм, установленным в соответствии с рисунком 2.5. Нагрузка прикладывалась перпендикулярно торцевой поверхности вилки, через которую передавалась на образец. Причем угол наклона вилки к оси деревянного бруса  $\alpha$ , в случае приложения нагрузки под углом к волокнам, изменялся в пределах от  $30^\circ$  до  $90^\circ$  в соответствии со схемами приведенными на рисунке 2.5,б,в.

После проверок геометрии и физических свойств модели, проводимых автоматически в процессе расчета, программный комплекс переведен в режим постпроцессинга, где выполнялся просмотр результатов.

После окончания расчета в меню «Solution» выбирались значения контролируемых параметров напряженно-деформированного состояния элементов моделей, представленные в виде изокарт со шкалами значений. Кроме этого, для сравнительного анализа напряженно-деформированного состояния соединения, использовались графики распределения соответствующих параметров по линейному размеру элементов.

Для определения величин диапазонов варьируемых параметров численным исследованиям предшествовали опытно-конструкторские разработки наиболее распространённых треугольных деревянных ферм, выполненных из цельной древесины для пролетов 9-18 метров. По определенным расчётным усилиям в элементах фермы из условия прочности подбирались параметры соединительных элементов по рисунку 2.1. Ориентировочные размеры вклеенного плоского стержня определяли исходя из следующих соображений:

- ширина стержня  $b_{cm}$  не должна превышать  $1/2$  высоты поперечного сечения деревянного бруса, в который вклеивается стержень (из условия его возможного раскалывания);

- длина стержня  $l_{cm}$  назначалась не более  $8b_{cm}$  (из условия технологичности и компоновки узлового соединения);

- толщина фасонки равна толщине вклеиваемого стержня и обеспечивает прочность и устойчивость стали, в том числе под узловым штифтом;

- площадь вклеиваемого стержня должна обеспечивать прочность соединения при действии расчётных усилий из условия учета расчетного сопротивления скалыванию по шву «клей-древесина», определенного по рекомендациям [106] и [124] (СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции», п.п. 6.1, 6.7).

С учетом полученных данных 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).

## 2.4 Анализ результатов численных исследований

Перед проведением численных исследований узлов при приложении нагрузки под различными углами по отношению к волокнам древесины был проведен расчет растянутого стыка, конечно-элементная модель которого представлена на рисунке 2.7. Полученные картины напряжений и деформаций сравнивали с результатами ранее проведенных численных и экспериментальных исследований, приведенных в работах [106, 107, 87]. Результаты расчёта подтвердили адекватность разработанных моделей, при этом при полном соответствии качественных картин, количественные сравниваемые показатели отличались на величину не более 4 %, что позволило перейти к следующему шагу – численным расчетам разработанной модели по рисунку 2.8.

В результате проведенных исследований выявлено следующее.

1. Качественные картины распределения нормальных и касательных напряжений во всех исследуемых моделях при варьировании

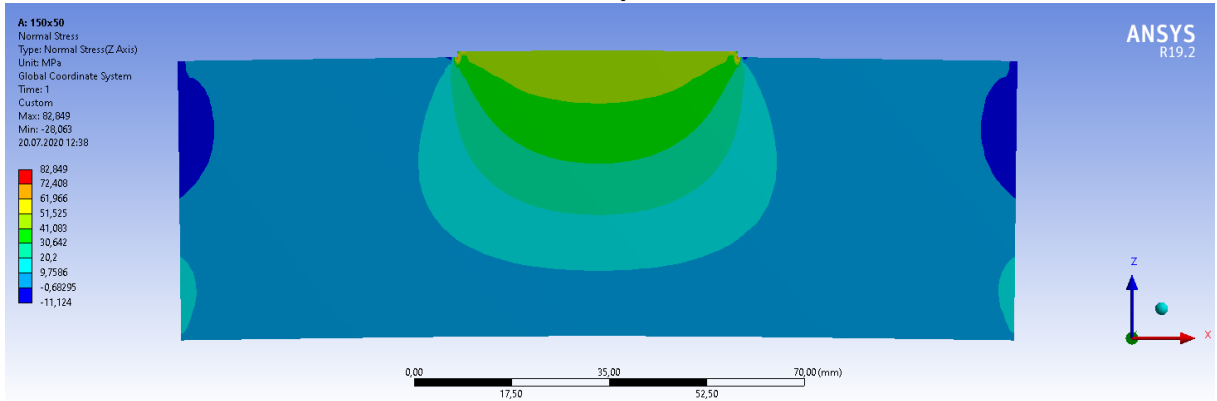
вышеперечисленными параметрами при работе на выдергивание или вдавливание практически совпадали. Исключение составляли лишь контактные зоны по линии нижней грани стержня, в которых при вдавливании включается в работу дно паза в деревянном бруске, работая на смятие под действием нагрузки. Для исключения этого поддерживающего эффекта анализу подлежали результаты расчетов, при которых соединительный элемент работает на выдергивание. Эти результаты полностью коррелируют и могут быть распространены на случай работы клеенных плоских стержней на вдавливание.

2. Усилия от раскосов или стоек фермы передаются на клеенный 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 2.9). При этом, картины распределения этих напряжений зависят от соотношения длины стержня  $l_{cm}$  к длине фасонки  $l_{\phi}$ , а также от ширины  $b_{cm}$  и толщины  $t_{cm}$  клеиваемого стержня.

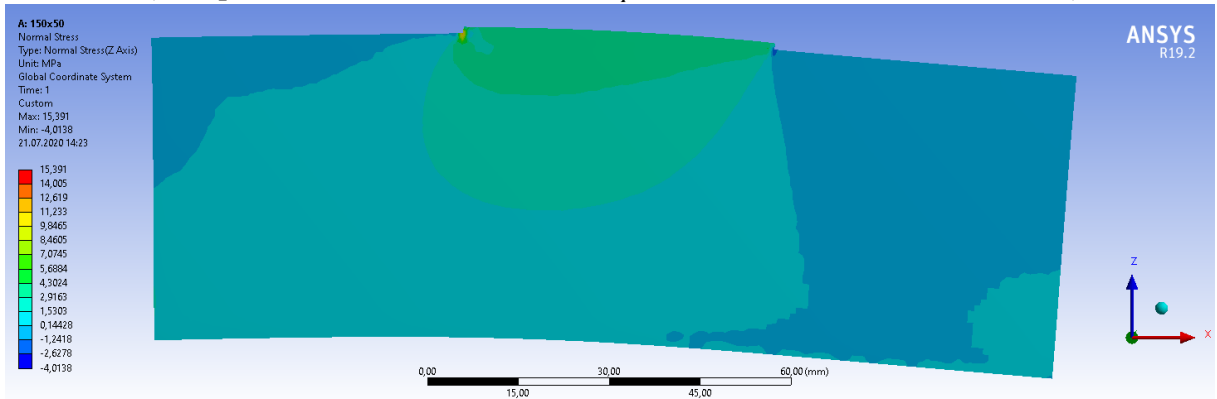
Величина прикладываемой нагрузки к исследуемому образцу в зависимости от угла приложения силы с учетом упругого характера работа модели определена как расчетное сопротивление древесины скалыванию для рассматриваемого угла, умноженное на двойную площадь клеиваемого стержня (из условия скалывания древесины по контакту «клей-древесина»).

3. Анализ картин, аналогичных приведенным на рисунке 2.9, показал, что наибольшее влияние на степень неравномерного распределения нормальных напряжений по длине клеенного стержня оказывает соотношение  $l_{cm} / l_{\phi}$ , а также ширина стержня  $b_{cm}$ . 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 клеенного плоского стержня и вызывают скалывание по упомянутому шву.

а) стержень  $l_{cm}=150$  мм;  $b_{cm}=50$  мм,  $l_{\phi}=50$  мм;  $t_{cm}=4$  мм;  $\alpha=90^{\circ}$  (N=10 кН)



б) стержень  $l_{cm}=150$  мм;  $b_{cm}=50$  мм,  $l_{\phi}=50$  мм;  $t_{cm}=4$  мм;  $\alpha=45^{\circ}$  (N=10 кН)



в) стержень  $l_{cm}=650$  мм;  $b_{cm}=100$  мм,  $l_{\phi}=150$  мм;  $t_{cm}=10$  мм;  $\alpha=90^{\circ}$  (N=91 кН)

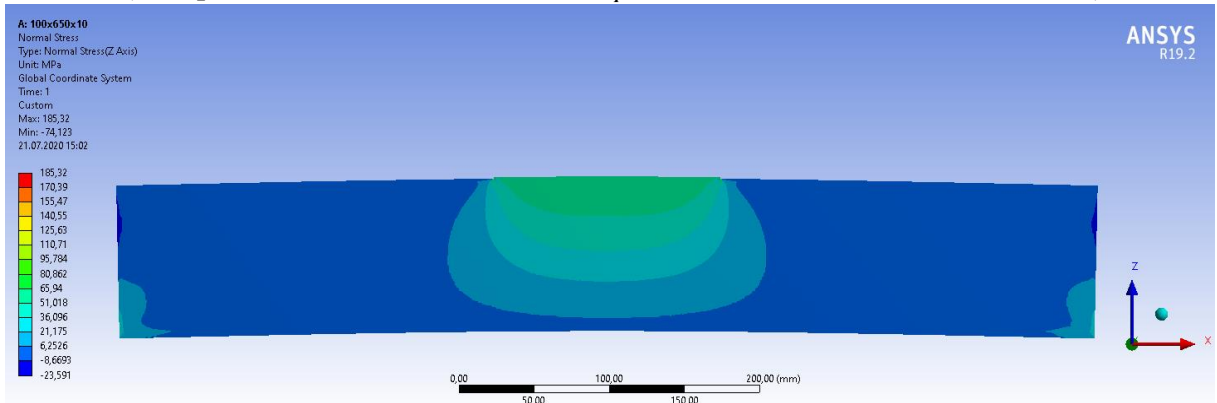


Рисунок 2.9 – Примеры картин распределения нормальных напряжений во вклеенном стержне при его работе на выдергивание при различных параметрах (обозначения соответствуют рисунку 2.1)

Отметим, что при проведении пилотных экспериментов выявлено, что разрушение соединения всегда происходило от скалывания именно по этому контакту с наличием волокон древесины толщиной до 1 мм на клеевой

прослойке (при соответствующей обработке поверхности стержней прямыми или косыми пазами, высверленными отверстиями по рекомендациям [64, 65, 68]). Характерные графики распределения касательных напряжений в древесине по линии, проходящей через середину ширины стержня, для вариантов по рисунку 2.9 представлены на рисунке 2.10.

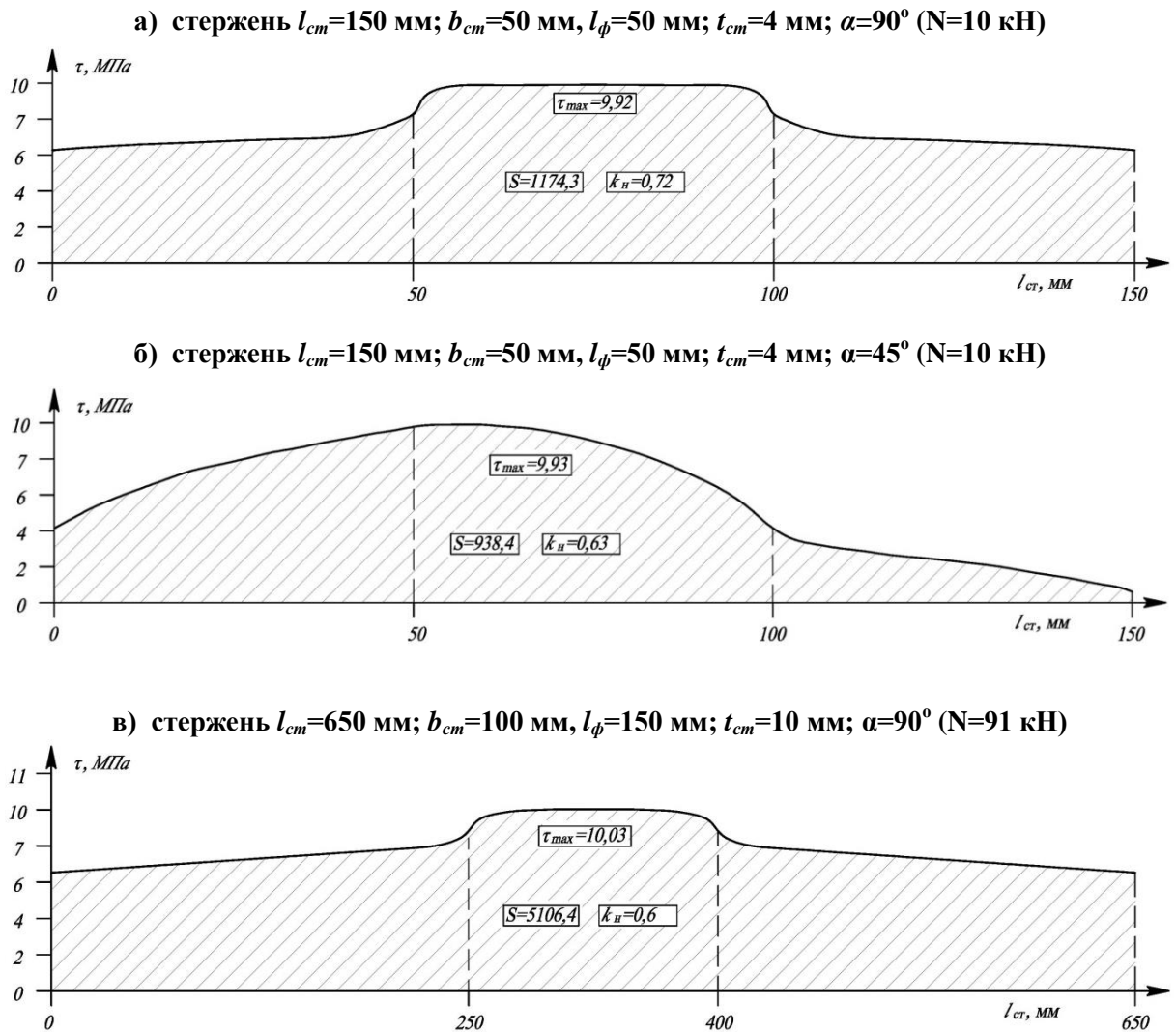


Рисунок 2.10 – Примеры картин распределения касательных напряжений в древесине по линии, проходящей через середину ширины стержня, для вариантов по рисунку 2.9

Идентичные картины наблюдаются и в других сечениях стержня по его ширине.



Степень неравномерности распределения касательных напряжений по плоскости стержня, по аналогии с клефанерными ребристыми конструкциями, можно оценить при помощи коэффициента неравномерности  $k_n$ , значение которого можно определить с использованием графиков по рисунку 2.10 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:

$$2 \cdot \tau_{max} \cdot l_{ст} \cdot k_n \cdot b_{ст} = N = 2 \cdot b_{ст} \cdot \int_0^l \tau \cdot d_y, \quad (2.2)$$

где 2 – две площадки скалывания у вклеенного плоского стержня;

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

Тогда:

$$k_n = \frac{\int_0^l \tau \cdot d_y}{\tau_{max} \cdot l_{ст}}. \quad (2.3)$$

В результате анализа работы вклеенных стержней при различных варьируемых параметрах определены числители в выражении (2.3) и найдены фактические величины коэффициента неравномерности  $k_n$ . Для рассмотренных примеров они приведены на рисунке 2.10, а для наиболее характерных случаев в зависимости от соотношения  $l_{ст} / l_{ф}$  и  $b_{ст}$  на рисунке 2.11. При назначении длины фасонки равной длине вклеенного плоского стержня коэффициент неравномерности  $k_n$  равен 1 в независимости от ширины и толщины стержня.

При анализе результатов численных расчетов также выявлено, что в случае варьирования угла приложения силы по отношению к волокнам древесины от  $30^\circ$  до  $90^\circ$  значения коэффициента практически не изменялись. Величина изменения не превышала 4 % в сравнении с результатами, приведенными на рисунке 2.11 для случая выдергивания поперек волокон.

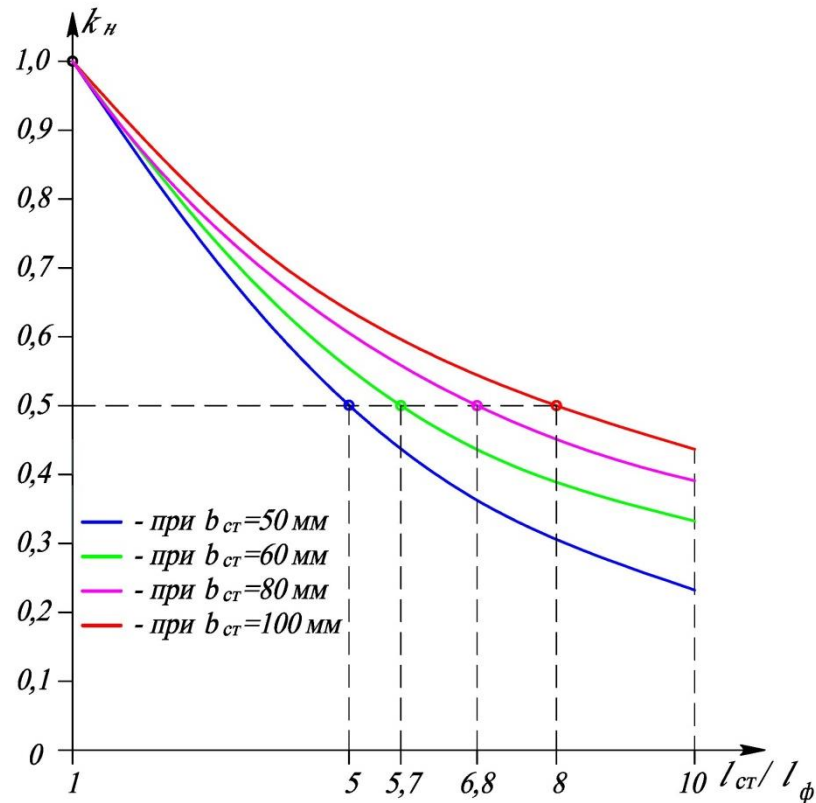


Рисунок 2.11 – Графики зависимости коэффициента неравномерности распределения касательных напряжений в древесине по площади клейки стержня от соотношения  $l_{ct}/l_{\phi}$  и  $b_{ct}$  (при  $t_{cm}=4$  мм, выдергивание в направлении поперек волокон)

Опираясь на данные рисунка 2.11, можно сделать вывод, что для снижения металлоемкости узлового соединения и для повышения эффективности работы клеенных стержней целесообразно ограничивать длину клейки в зависимости от длины фасонки. Отметим, что такое ограничение рекомендуется и в случае выдергивания стальных пластин в направлении вдоль волокон, но в зависимости от ширины пластины. Например, по рекомендациям [106] длина клеиваемой пластины не должна превышать восьми её ширины. В этом случае коэффициент неравномерности распределения касательных напряжений, определенный по результатам численного расчета модели по рисунку 2.7, по её длине будет не менее 0,5. Принимая по аналогии ограничение на коэффициент  $k_n$ , равный 0,5, при ширине стержня 50 мм длину стержня рекомендуется принимать не более  $5l_{\phi}$ , при ширине стержня 100 мм – не более  $8l_{\phi}$ . При промежуточных значениях

ширины стержня допускается рекомендуемые величины длин клеиваемых пластин определять по интерполяции.

4. Проведенные численные расчеты показали высокую жесткость предложенного способа соединения элементов в узлах ферменных конструкций. При этом величины смещения клеенных 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°, 45°, 60° такие смещения составили 0,015 мм, 0,029 мм и 0,053 мм соответственно, что значительно ниже предельно допускаемых величин для известных типов соединения (например, для нагельных соединений 2,0 мм).

5. Соблюдая условие равнопрочности соединения по всем расчётным параметрам, выявлено, что при предельной несущей способности стержня на выдергивание-вдавливание условия прочности фасонки на разрыв и на смятие в отверстие под штифтом всегда соблюдается при толщине стержня от 4,0 мм до 8,0 мм. При толщине стержня 10 мм как правило фасонка работает с неоправданными запасами по прочности.

## **2.5 Методика и результаты экспериментальных исследований опытных соединений**

Для натуральных экспериментов изготавливались образцы, представляющие собой бруски с клееными плоскими стальными стержнями, общий вид которых представлен на рисунке 2.3.

Деревянные бруски выполнены из сосны второго сорта с размерами поперечного сечения 100×100 мм, длиной 500 мм. Грани брусков обрабатывались на фуговальном станке. Посередине верхней грани брусков выбирался паз на глубину 50 мм и длиной, превышающей длину клеиваемого

плоского стального стержня на 10 мм. Выполнение паза производилось ручным фрезером с концевой фрезой диаметром 10 мм. Плоские стальные стержни выполнялись из стали толстолистовой горячекатанной (сортамент по ГОСТ 19903-2015) толщиной 6 мм на установке плазменной резки. Отверстия в плоских стальных стержнях выполнялись на сверлильном станке сверлами соответствующих диаметров. Стержень представляет собой плоский лист, нижняя часть которого предназначена для вклеивания в паз, а верхняя, в виде узловой фасонки с отверстием, для соединения с нагружающим устройством. У всех стержней в верхней части, выполняющей роль распределительной фасонки, выполнено отверстие диаметром 22 мм для штифта.

Для натурального эксперимента было подготовлено пять серий образцов, отличающихся параметрами плоских стальных стержней (рисунок 2.12, а-д). В первой серии применены плоские стержни, представляющие собой пластины с габаритными размерами 85×140×6 мм. Нижняя часть пластины, предназначенная для вклеивания в паз гладкая (без обработки). Верхняя часть пластины треугольная с плавным закруглением вершины имеет отверстие диаметром 22 мм для установки хватного приспособления (во всех сериях). Ко второй серии относятся образцы с плоскими стальными стержнями, представляющими собой пластины с габаритными размерами 93×140×6 мм. Во вклеиваемой части пластины выполнено одно отверстие диаметром 20 мм на расстоянии 25 мм от нижней кромки и на расстоянии 46 мм от боковых сторон. Третья серия представлена образцами с плоскими стальными стержнями с габаритными размерами 100×140×6 мм. В нижней части пластины, предназначенной для вклеивания в паз, выполнено два отверстия диаметром 20 мм. Плоские стержни четвертой серии имеют размеры 140×130×6 мм. В нижней части пластины, предназначенной для вклеивания в паз, выполнено четыре отверстия диаметром 20 мм. Пятая серия представлена образцами со стержнями с габаритными размерами 140×130×6 мм. В нижней части пластины, предназначенной для вклеивания в паз, выполнено двадцать семь отверстий диаметром 10 мм.

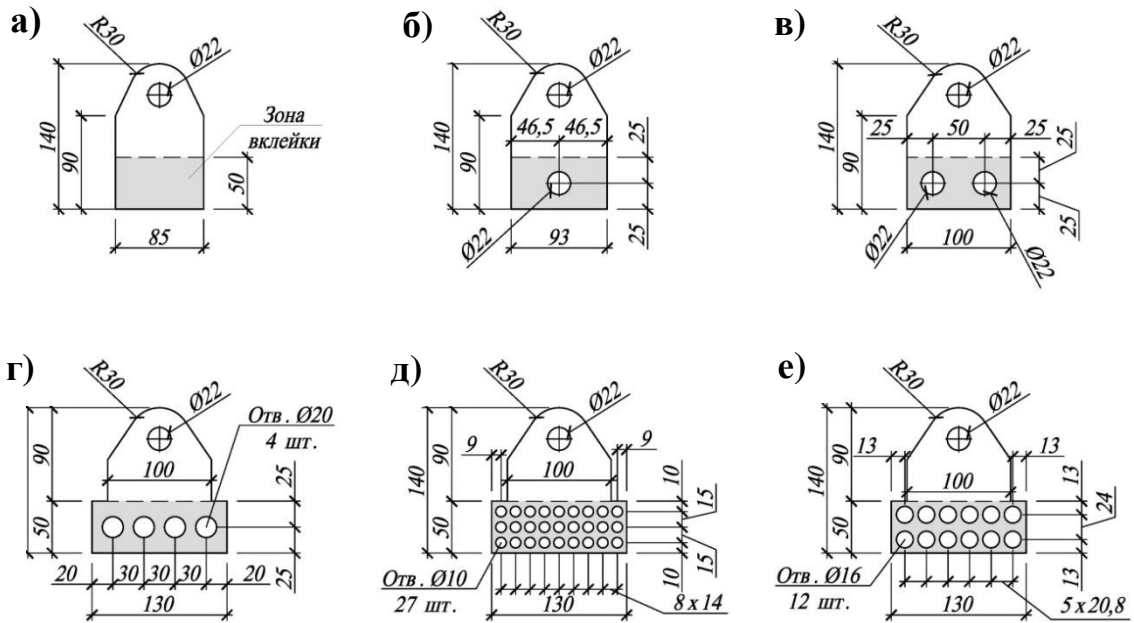


Рисунок 2.12 – Схемы плоских стальных стержней для серий натуральных образцов:

а – первая серия; б – вторая серия; в – третья серия;

г – четвертая серия; д – пятая серия; е – шестая серия

Позднее, после проведения испытаний пяти серий образцов, была изготовлена шестая серия, конструктивные параметры которой задавались с учетом накопленного опыта. Стальной плоский стержень для образцов шестой серии выполнен в виде пластины с габаритными размерами  $140 \times 130 \times 6$  мм. В нижней части пластины, предназначенной для вклеивания в паз, выполнено двенадцать отверстий диаметром 16 мм. Общий вид и размеры плоского стального стержня шестой серии представлены на рисунке 2.12,е.

В образцах всех серий плоские стержни вклеивались на глубину 50 мм.

В сериях 1 – 3 длина стальных плоских стержней была назначена таким образом, чтобы площадь их вклеенной части за вычетом отверстий была равна. В сериях 4 – 5 отверстия расставлены по длине с шагом 1,5 диаметра и на расстоянии в диаметр от центра отверстий до кромок. В пятой серии ряды отверстий по ширине расставлены с шагом 1,5 диаметра и на расстоянии в диаметр от центра отверстий до кромок. В шестой серии отверстия выполнены по ширине с шагом 1,5 диаметра. Расстояние между отверстиями и от отверстия до края принималось равным 5 мм. Длина вклеиваемой части плоского стержня

шестой серии принималась 130 мм для удобства сравнения с четвертой и пятой сериями. Отношение площади отверстий к площади клеенной части по сериям: первая серия – 0 %; вторая серия – 6,7 %; третья серия – 12,56 %; четвертая серия – 19,3 %; пятая серия – 32,5 %; шестая серия – 37,1 %.

По краям плоских стержней в верхней части (фасонка) выполнялись по два отверстия для установки упоров штоков индикаторов. Закрепление плоских стержней в проектном положении в пазах осуществлялось при помощи деревянных клиньев. Вертикальность стержней контролировалась угольником. Также контролировалась равномерность зазоров между стенкой паза и стальным элементом. После установки стержней пазы заливались эпоксидным составом марки ЭД-20 (отвердитель ПЭПА) без наполнителя. Образцы выдерживались не менее трех суток для отверждения состава.

На образцы наклеивали бирки с маркировкой, например УО-1-2/Р - универсальный образец первой серии с порядковым номером 2, в котором соединительный элемент работает на растяжение или УО-3-5/С (универсальный образец третьей серии с порядковым номером пять, в котором соединительный элемент работает на сжатие). Некоторые этапы и процесс сборки образцов представлены на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Этапы сборки натуральных образцов

Для определения необходимого количества одинаковых образцов « $n_\alpha$ » исходили из того, чтобы принятый объем испытаний обеспечил оценку среднего значения « $\alpha$ » и среднего квадратичного отклонения « $s$ » величины выдергивания  $N$  с заданной степенью точности и надежности [125]. Исходя из заданной степени точности оценки среднего значения характеристики и среднего квадратичного отклонения на стадии исследований, необходимое число одинаковых экспериментов определяли по формуле:

$$n_\alpha = \frac{\gamma^2}{\Delta_\alpha^2} \cdot z_{1-\alpha/2}^2 = \frac{0,04^2}{0,03^2} \cdot 1,645^2 = 4,81, \quad (2.4)$$

где  $\gamma = 0,04$  – коэффициент вариации величины  $N$ ;

$\Delta_\alpha = 0,03$  – предельная относительная ошибка (допуск) при определении среднего значения;

$\alpha = 0,1$  – вероятность ошибки 1-го рода;

$z_{1-\alpha/2} = 1,645$  – двусторонний критерий при  $P = 1 - \alpha/2 = 0,95$ .

Значением коэффициента вариации задавались на основании уже имеющихся данных по аналогичным испытаниям. Количество испытываемых образцов, необходимых для определения усилия выдергивания  $N$ , принималось равным пяти для каждой серии.

Эксперименты проводились на испытательной машине ИР 5082-100 (с максимальным усилием 10 т) с подвижной нижней траверсой (рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – Испытания на выдергивание

Контролируемые параметры испытательной машины: нагрузка, перемещение, скорость перемещения траверсы. На боковые грани бруса устанавливались индикаторы часового типа для измерения перемещения вклеенного плоского стержня относительно бруса (И1, И2, И3, И4 с ценой деления 0,001 мм) для испытаний на выдергивание и вдавливание поперек волокон. Штоки индикаторов упирались в площадки, закрепленные на плоском вклеенном стержне (рисунок 2.15, а, в). Для случаев приложения нагрузки под углом к волокнам, кроме перечисленных индикаторов, дополнительно на грани бруса устанавливались два индикатора (И5, И6) для измерения перемещений плоского стержня вдоль волокон. Штоки этих индикаторов упирались непосредственно в фасонку плоского стержня (рисунок 2.15, б, г). Перед разрушением образцов измерительные приборы снимались в целях безопасности и сохранности оборудования.

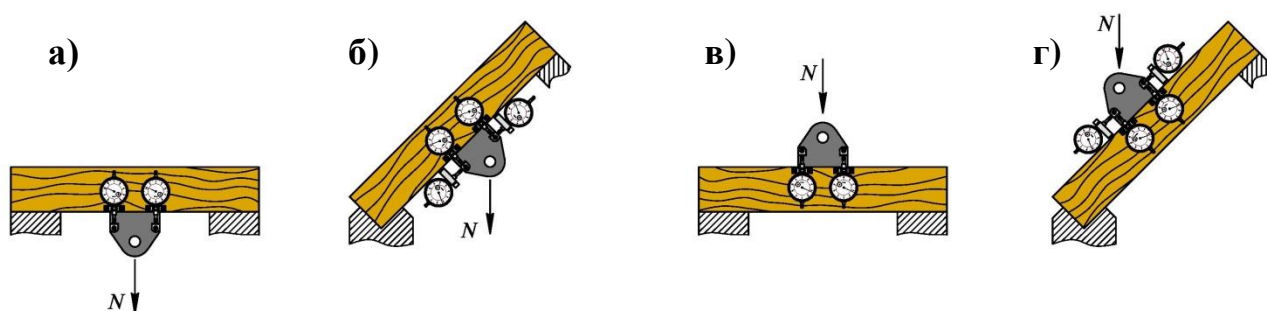


Рисунок 2.15 – Схемы нагружения образцов и расстановка приборов при испытании: а – выдергивание поперек волокон; б – выдергивание под углом к волокнам; в – вдавливание поперек волокон; г – вдавливание под углом к волокнам

Для унификации образцов и вспомогательных приспособлений нагрузка передавалась через шарнир. Приспособление для передачи нагрузки представляет собой массивную металлическую вилку, выполненную из цилиндра диаметром 50 мм с прорезью шириной 8 мм на глубину 62 мм, имеющую сквозное отверстие диаметром 22 мм для установки стержня. Торец, возле которого расположено отверстие, имеет сферическую поверхность для возможности поворота приспособления на необходимый угол без касания деревянного бруска. В противоположном торце выполнено резьбовое отверстие



M20 для установки шпилек разной длины. Для испытаний потребовались две шпильки, короткая и длинная, что обусловлено конструкцией захватов испытательной машины. Передача нагрузки от приспособления к образцу осуществлялась через цилиндрический шарнир, представляющий собой стержень диаметром 21,5 мм, установленный в совмещенное по оси отверстие в соединительном элементе с отверстиями металлической вилки. Поэлементная схема и общий вид собранного образца представлен на рисунке 2.16.

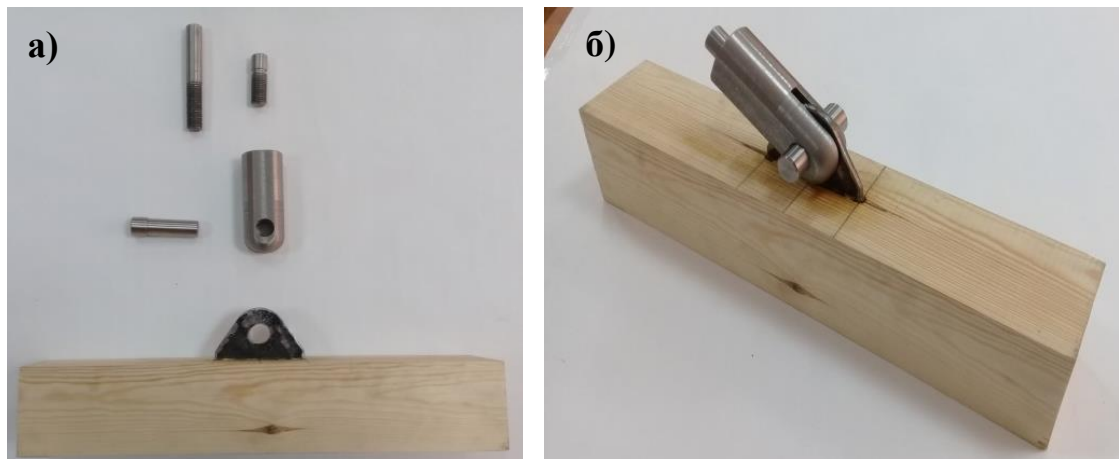


Рисунок 2.16 – Универсальный образец с нагрузочным приспособлением:  
а - поэлементная схема; б – общий вид образца с приспособлением

При проведении испытаний выполнялись требования [28]. В соответствии с п. 5 [28], и на основании ранее проведенных экспериментов, образцы относятся к I группе соединений деревянных конструкций. Испытание образцов выполнялось в режиме непрерывного нагружения с постоянной скоростью 0,01 кН/с без разгрузки. Величина ступеней составляла 2 кН (0,1 от ожидаемой величины разрушающего усилия). На каждой ступени снимались показания с приборов. Данные заносились в журнал испытаний. Время выдержки на снятие показаний одинаково для всех ступеней.

Анализ результатов, полученных в процессе испытаний, позволил выявить эффект влияния отверстий на несущую способность соединений. При выдергивании поперек волокон средняя разрушающая нагрузка для образцов первой серии (гладкие стержни) составила 8,22 кН. Все образцы разрушились хрупко. Причем, после разрушения, сопровождавшегося характерным щелчком,

плоский стержень постепенно выходил из паза под действием усилия разрывной машины. Клеевая прослойка разделилась на две части, одна из которых вышла вместе со стержнем. Другая часть осталась на дне и стенках паза неразрушенной обоймой. На клеевых слоях, приставших к стержню, сохранились волокна древесины (рисунок 2.17, а). По ходу эксперимента и характеру разрушения образцов можно сделать вывод о том, что при достижении максимальных напряжений в части клеевого слоя, расположенного ближе к дну паза, была утрачена несущая способность, обеспечивавшаяся адгезией клея к металлу. Затем, от касательных напряжений, произошло разрушение клеевых стенок по всей длине паза. Далее разрушение произошло от скалывания по контакту клей-древесина. По характеру разрушения образцов этой серии и величине разрушающей нагрузки можно сделать вывод о недостаточной адгезии клеевой прослойки к металлу стержня в зоне, расположенной ближе к дну паза.

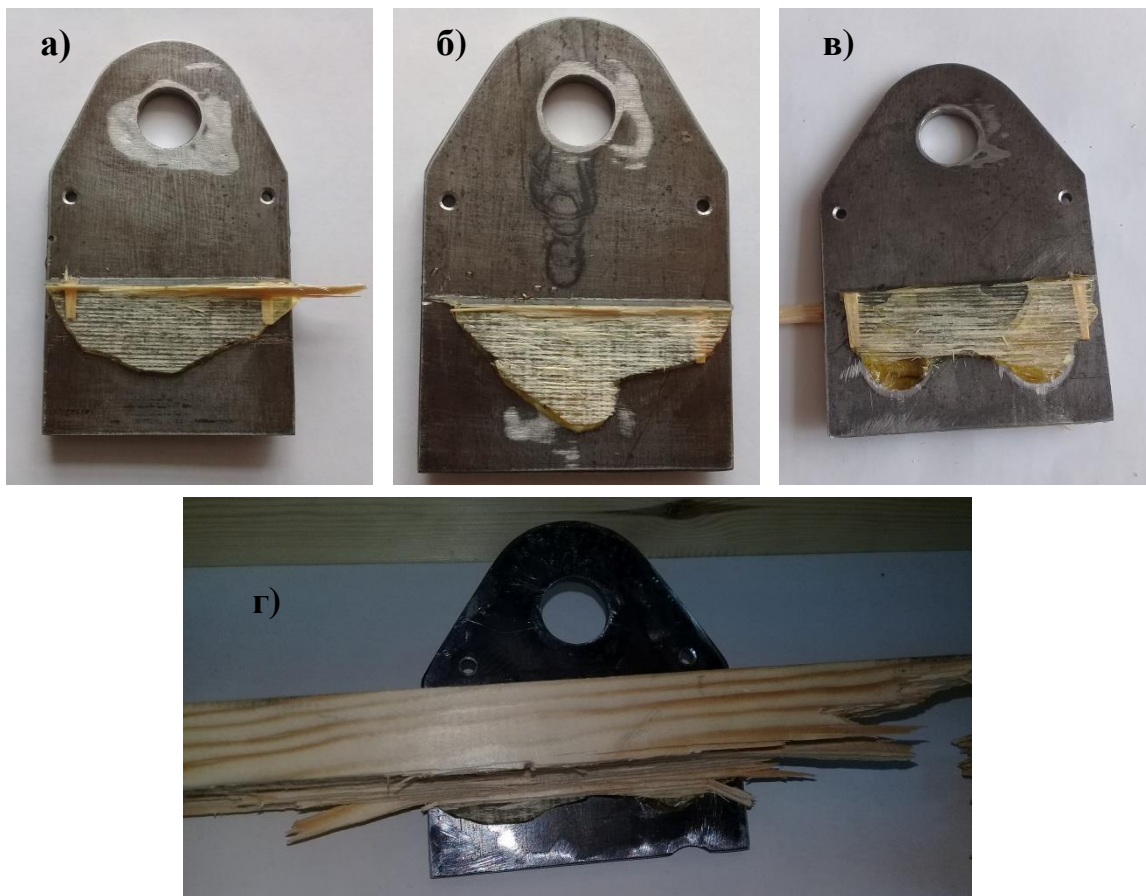


Рисунок 2.17 – Плоские стержни со следами характерного разрушения клеевой прослойки: а – стержень первой серии; б – стержень второй серии; в, г – стержни третьей серии

Образцы второй серии также разрушились хрупко. Среднее значение разрушающего усилия составило 12,51 кН. Характер разрушения аналогичен характеру разрушения образцов первой серии, с той лишь разницей, что клеевые прослойки в зоне отверстия также вышли вместе со стержнем (рисунок 2.17, б). Это свидетельствует о том, что площади клеевых стенок, вблизи отверстия работали на скалывание древесины поперек волокон. По характеру разрушения и величине разрушающей нагрузки можно сделать вывод о том, что выполнение отверстий повышает несущую способность соединения за счет вовлечения клеевых стенок в работу на скалывание древесины.

Для образцов третьей серии, при выдергивании поперек волокон, среднее значение разрушающей нагрузки составило 16,12 кН. Разрушение происходило хрупко. При этом диапазон экспериментальных значений нагрузок находился в интервале от 15,11 кН (образец УО-3-2/Р) до 17,17 кН (образец УО-3-5/Р). На большинстве образцов на клеевых прослойках, вышедших вместе со стержнем, остались волокна древесины (рисунок 2.17 в). Клеевые шпонки, образованные отверстиями в стержне сохранили свою целостность и прилегающие к ним клеевые стенки также оказались вовлечены в работу. После разрушения одного из образцов серии его долом происходил с отрывом слоя древесины толщиной 30 – 40 мм в поперечном направлении по всей длине бруса (рисунок 2.17, г). У половины образцов серии клеевые стенки, прилегающие к стержню в зоне между отверстиями, также оказались вовлечены в работу на скалывание древесины и после разрушения сохранились на стержнях. Можно сделать вывод о том, что наличие отверстий и их правильная расстановка позволяют вовлечь в работу большую площадь клеевой прослойки.

Среднее значение разрушающего усилия, при выдергивании поперек волокон, для образцов четвертой серии составило 24,46 кН. По характеру разрушения сходны с образцами третьей серии. У половины образцов долом происходил с отрывом слоя древесины по всей длине образца (рисунок 2.18, а). После разрушения остатки клея на стержнях занимали поверхность шириной примерно 35 мм. Оставшаяся часть клея сохранилась как обойма на дне паза.

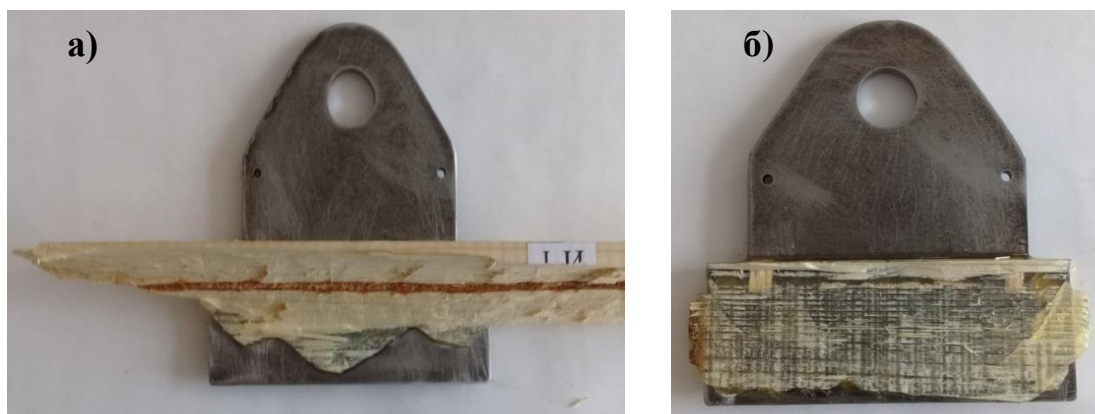


Рисунок 2.18 – Плоские стержни со следами характерного разрушения клеевой прослойки: а – стержень четвертой серии; б – стержень пятой серии

Несколько отличалась картина разрушения образцов пятой серии. При испытаниях на выдергивание поперек волокон средняя разрушающая нагрузка составила 31,30 кН. Разрушение происходило хрупко. Клеевая обойма практически полностью оставалась на плоских стержнях (рисунок 2.18, б), за исключением полосы шириной 5 мм в части стержней, прилегавших к дну паза.

Для образцов шестой серии среднее значение разрушающей нагрузки составило 28,62 кН. Клеевые стенки, окружающие плоский стержень, разрушались по низу, как в случае с образцами пятой серии. Ширина клеевой полосы, оставшейся у дна паза, составляла 2-3 мм. При этом в углах паза оставались фрагменты клеевой прослойки треугольной формы. У одного из образцов был снят слой древесины до плоскости клея для изучения взаимодействия плоского стержня, клеевого слоя и древесины в момент разрушения (рисунок 2.19).

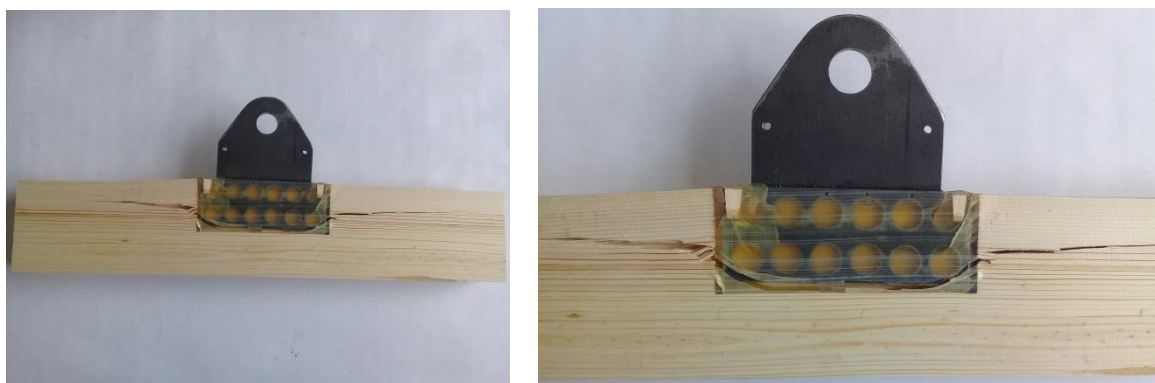


Рисунок 2.19 – Обработанный образец шестой серии после разрушения

Для образцов всех серий при испытании на выдергивание поперек волокон характерным было то, что при испытании на первом этапе происходило откалывание участка клеевого слоя от стержня вблизи дна паза из-за истощения адгезии. Далее происходил отрыв отколовшегося участка клея, который сопровождался характерным треском. Дальнейшее разрушение происходило от скалывания древесины поперек волокон по площади контакта клеевого слоя, оставшегося на стержне.

Испытания на вдавливание плоского стального стержня поперек волокон древесины показаны на рисунке 2.20.

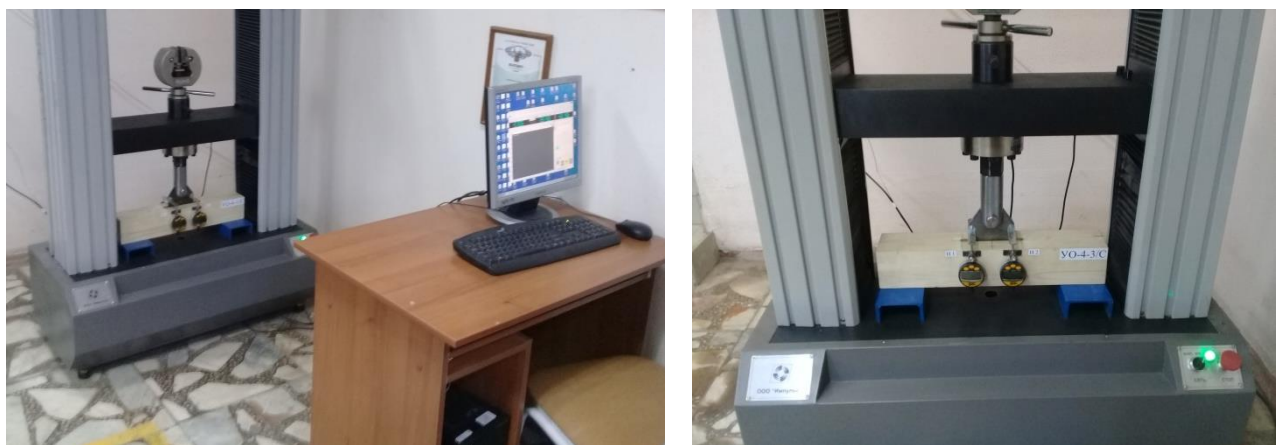


Рисунок 2.20 – Испытания образцов на вдавливание

Характер разрушения образцов по сериям был схож с характером, который наблюдался при испытаниях на выдергивание поперек волокон. По сравнению с испытаниями на выдергивание величина разрушающей нагрузки при вдавливании была выше. Расхождение не превышало 20 %. Так, для первой серии среднее значение разрушающей нагрузки составило 9,69 кН, для второй – 15,01 кН, для третьей – 18,70 кН. Для четвертой и пятой серий разрушающая нагрузка составила 28,9 кН и 37,25 кН соответственно. Средняя разрушающая нагрузка для образцов шестой серии составила 33,48 кН. Повышение несущей способности при вдавливании плоского стального стержня в сравнении с выдергиванием объясняется включением в работу поверхности дна паза, которое оказывает поддерживающий эффект для плоского стержня.

Испытания на выдергивание под углом  $45^\circ$  к волокнам проводились по той

же методике, что и испытания на выдергивание поперек волокон. Для задания требуемого угла приложения нагрузки образец подвешивался на опоры, находящиеся на разных уровнях. Общий вид установки в процессе испытания показан на рисунке 2.21.



Рисунок 2.21 – Испытания на выдергивание под углом к волокнам

При испытаниях образцов разных серий на выдергивание под углом к волокнам разрушающая нагрузка в целом была ниже по сравнению с результатами испытаний на выдергивание поперек волокон. Этот факт объясняется тем, что сила, приложенная под углом  $45^\circ$  к волокнам древесины, действовала с эксцентриситетом по отношению к оси плоского стержня, что вызвало дополнительные напряжения в клеевой прослойке «клей-древесина», которая фактически работала на выдергивание с изгибом. Несомненно, что этот эффект необходимо учитывать при проектировании ферм и, по возможности исключать его путем центрации узлов по центру вклеиваемой части стержня.

На разрушенных образцах хорошо просматривалось влияние отверстий на включение клеевого слоя в работу на скалывание древесины. Во всех случаях разрушение происходило от скалывания древесины, которое было вызвано поворотом стержня в его собственной плоскости. Характерно и то, что клеевой слой, расположенный за габаритами отверстий ближе к дну паза в первую очередь истощал свою адгезионную составляющую к металлу стержня, а после разрушался от разрыва.

Для изучения характера разрушения один из образцов, испытанный на выдергивание под углом к волокнам, был обработан на фуговальном станке. Сначала был снят слой древесины бруса до клеевой прослойки, затем при помощи стамески была обработана зона вклейки на всю высоту бруса (рисунок 2.22, а). Характер деформирования образца также подтвердил работу вклеенного плоского стержня на выдергивание с поворотом относительно его оси.

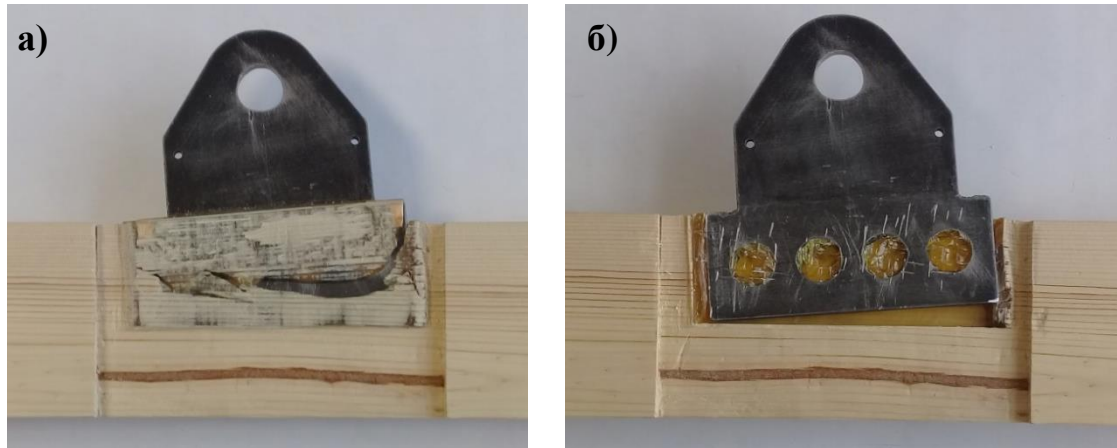


Рисунок 2.22 – Поворот плоского стержня в пазу при действии нагрузки под углом к волокнам древесины: а – зачищенная до клеевого слоя зона вклейки; б – зона вклейки со сколотым клеевым слоем

Далее был сколот клеевой слой с плоскости стержня для изучения состояния клеевых перемычек в отверстиях стержня (рисунок 2.22, б). В дальнейшем, для изучения состояния стенок деревянного паза и состояния клеевой прослойки вблизи дна, плоский стержень был извлечен (рисунок 2.23, а, б).

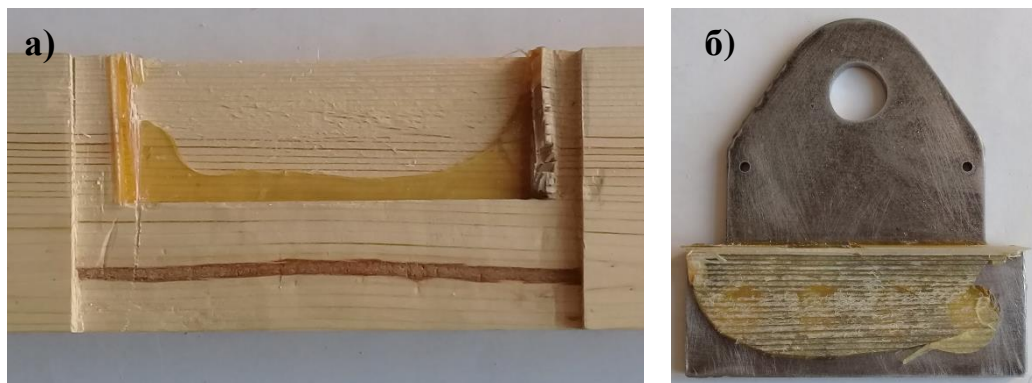


Рисунок 2.23 – Разрушение клеевого слоя: а – состояние стенки паза и клеевой прослойки вблизи дна; б – стержень с остатками клея и волокнами древесины

Для исключения влияния эксцентриситета были проведены испытания дополнительной партии образцов, аналогичных образцам шестой серии с центрацией действующего усилия по центру клеиваемой части стержня. При этом дополнительно испытано по пять образцов при углах наклона силы по отношению к продольной оси стержня  $0^\circ$  и  $45^\circ$ . Полученные результаты приведены в таблице 2.1, в которой величина разрушающей нагрузки принята как среднее арифметическое значение трех средних показаний, максимальные и минимальные результаты не учитывались.

Таблица 2.1 – Зависимость разрушающей нагрузки от угла приложения силы

№ п/п	Угол приложения силы $\alpha$ , град	$N_{\text{разр}}$ , кН	$N_{\text{разр}}^\alpha / N_{\text{разр}}$	$R_{\text{ск}}^\alpha / R_{\text{ск}}$
1	0	69,70	1	1
2	45	45,31	0,65	0,63
3	90	28,62	0,41	0,38

Анализ данных таблицы 2.1 показал, что значение разрушающей нагрузки уменьшается с увеличением угла приложения силы по отношению к продольной оси клеиваемой части стержня, причем это уменьшение происходит прямо пропорционально изменению расчетного сопротивления древесины скалыванию под углом к волокнам. Этот факт позволяет применить это расчётное сопротивление при расчете узлов ферм на стальных клеенных плоских стержнях с учетом соответствующих корректировочных коэффициентов.

Результаты испытаний доказывают, что устройство отверстий во клеиваемой части стальных плоских стержней существенно повышает несущую способность соединения, которая зависит от угла приложения силы по отношению к волокнам древесины и, соответственно, к оси плоского стержня. Повышение несущей способности соединений связано с тем, что перемычки, образующиеся в отверстиях плоского стержня, включают клеевые стенки в работу на скалывание древесины, компенсируя тем самым недостаточную адгезию клея к металлу. Зависимость несущей способности от обработки поверхности представлена в виде графиков на рисунке 2.24.



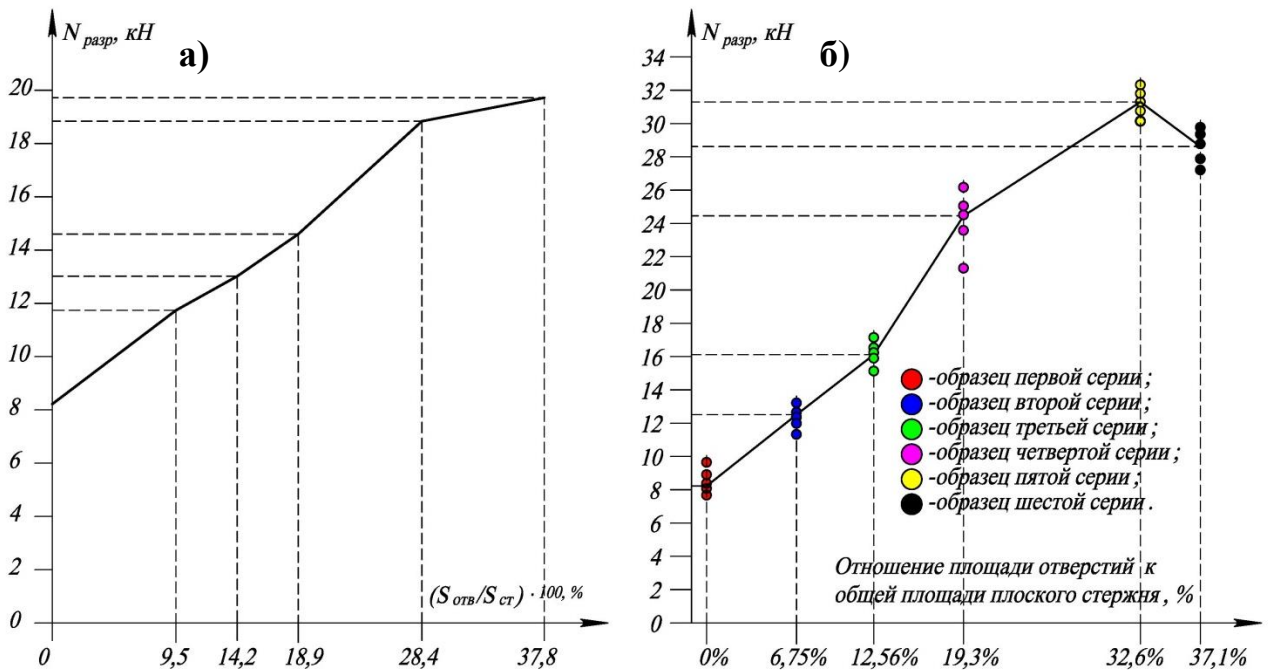


Рисунок 2.24 – Зависимость несущей способности соединения от способа обработки клеенной части: а – зависимость разрушающей нагрузки от отношения площади отверстий к площади клеенной части стержня (на примере образцов первой серии при высверливании в них отверстий диаметром 16 мм); б – зависимость разрушающей нагрузки от отношения площади отверстий к общей площади клеенного стержня по шести сериям

С повышением величины отношения площади отверстий к общей площади клеиваемого плоского стержня увеличивается несущая способность соединения, работающего на скалывание древесины вдоль, поперек или под углом к волокнам. Следует отметить, что на несущую способность клеенного 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 2.24, для пятой серии при показателе плотности отверстий 0,004 штук/мм<sup>2</sup> разрушающая нагрузка составила 31,30 кН, а для пятой серии при рассматриваемом показателе 0,002 штук/мм<sup>2</sup> значение разрушающей нагрузки падает до 28,62 кН или на 9 %.

Повышение несущей способности одновременно сопровождается снижением деформативности соединения (рисунок 2.25).

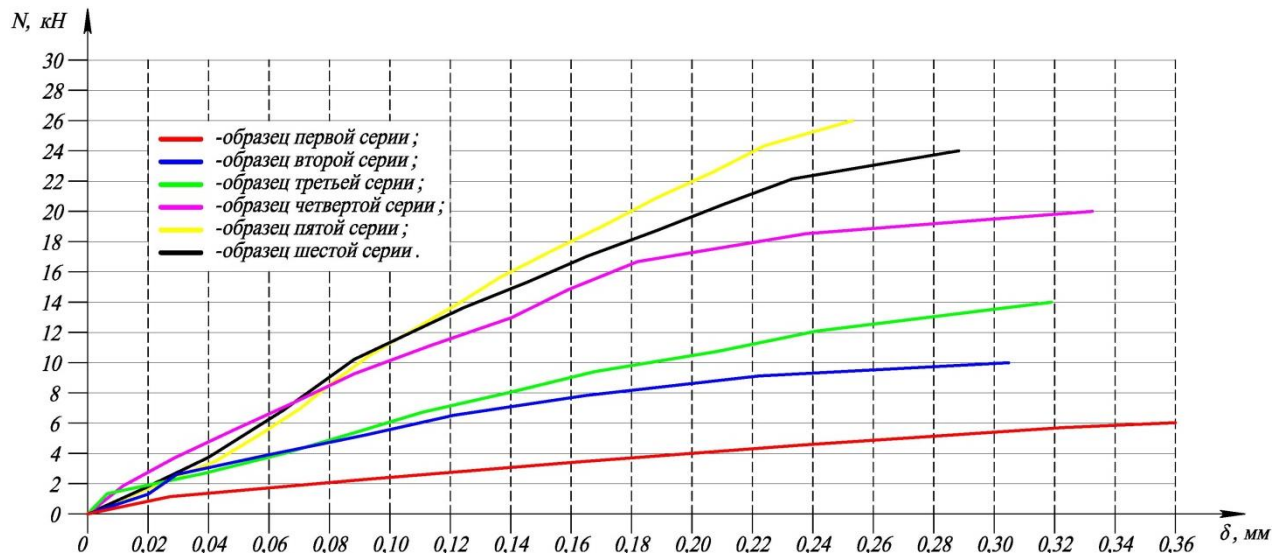


Рисунок 2.25 – Характерные графики «нагрузка-деформация» по сериям образцов

Соответственно, при проектировании соединений необходимо обеспечивать рациональное сочетание как максимальной плотности высверливаемых отверстий, так и минимальной трудоемкости работ.

## 2.6 Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований

Для оценки адекватности выполненных численных расчетов выполнено сопоставление теоретических и экспериментальных данных по напряженно-деформированному состоянию элементов модели. Испытания с тензометрированием показаны на рисунке 2.26.



Рисунок 2.26 – Проведение испытаний с тензометрированием

Сравнение выполнялось для численных и натуральных моделей с одинаковыми параметрами для достоверности выводов. С учетом возможности наклейки тензорезисторов на плоские стержни сравнение проведено для образцов первой серии (без обработки клеиваемой части).

Напряжения, возникающие в плоском стальном стержне, определенные при помощи программного комплекса, сопоставлялись с показаниями тензорезисторов, наклеенных на стержень в натурном образце (рисунок 2.27). Причем, тензодатчики, расположенные в контрольных точках дублировались тензодатчиками, расположенными в тех же точках на обратной стороне плоского стержня. Таким образом, контролировалась неравномерность распределения напряжений, в случае перекосов, и обеспечивалась достоверность показаний приборов. В расчет принимались средние показания по тензодатчикам для каждой из точек, определяемые как среднее арифметическое.

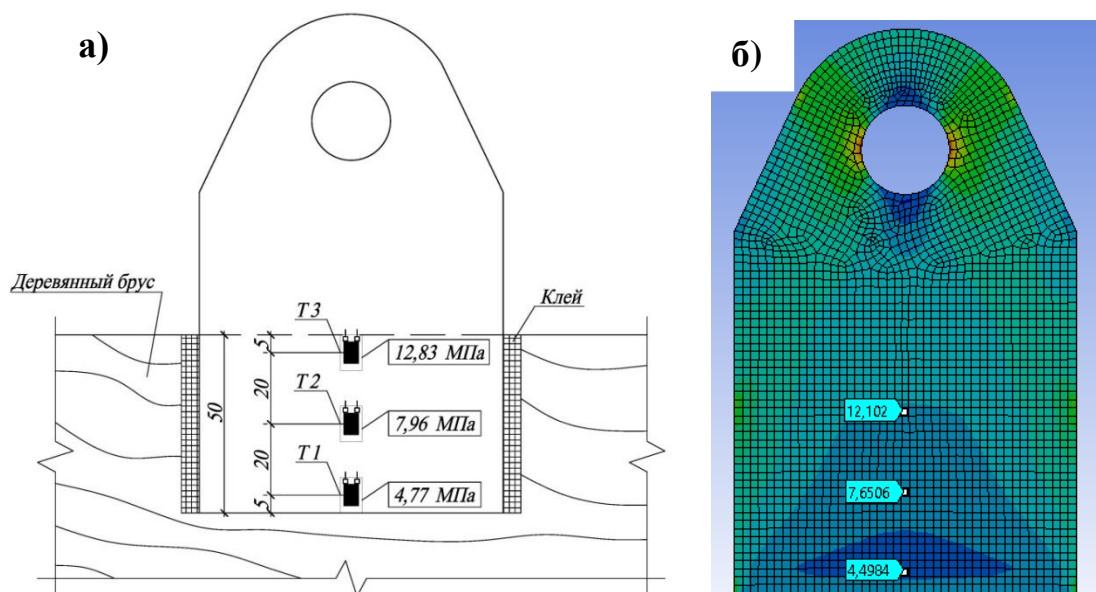


Рисунок 2.27 – Нормальные напряжения в плоском стержне при нагрузке 10 кН:  
 а - экспериментальные данные, полученные с тензодатчиков;  
 б - результаты расчета в ПК ANSYS

Анализ сравниваемых теоретических и экспериментальных значений напряжений показал, что расхождение не превышает 7 %. Например, при нагрузке 10 кН максимальная разница в показаниях тензорезисторов в сравнении с данными численных расчетов составила 6 % (рисунок 2.27)

Кроме напряжений, сравнению подвергались и данные по перемещениям стального плоского стержня относительно массива древесины. Сравнение результатов представлено для 1, 4 и 5 серий в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Перемещение плоского стержня относительно массива древесины

№ серии	№ ступени	Величины полученные		Расхождение, %
		по эксперименту $\delta$ , мм	в ПК ANSYS $\delta$ , мм	
1	2	3	4	5
1	1	0,010	0,009	10
	2	0,023	0,025	8,7
	3	0,040	0,043	7,5
	4	0,059	0,060	1,7
	5	0,080	0,078	3,1
	6	0,113	0,099	15
4	1	0,012	0,011	7,6
	2	0,029	0,031	6,8
	3	0,049	0,052	6,1
	4	0,069	0,073	5,8
	5	0,089	0,093	4,5
	6	0,113	0,114	0,9
	7	0,141	0,136	4,5
	8	0,159	0,157	1,3
	9	0,182	0,179	1,7
	10	0,238	0,200	16
	11	0,502	-	-
5	1	0,011	0,011	0
	2	0,032	0,026	18,8
	3	0,047	0,042	10,6
	4	0,060	0,057	5
	5	0,071	0,073	2,8
	6	0,083	0,088	6
	7	0,098	0,104	6
	8	0,113	0,119	5
	9	0,127	0,135	6,3
	10	0,144	0,150	4,2
	11	0,162	0,166	2,5
	12	0,178	0,181	1,7
	13	0,197	0,197	0
	14	0,214	0,212	1
	15	0,245	-	-

Данные численных расчетов сравнивались с показаниями индикаторов, которые регистрировали перемещение стержня во время испытаний с точностью

до 0,001 мм. Для сопоставимости результатов испытаний с программным расчетом и для исключения влияния деформаций материалов на величины результатов в модели перемещение определялось как разность перемещений двух точек. За точки принимались место крепления индикатора и место крепления упора на реальном образце.

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.

## **2.7 Оценка влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние соединений клеенных стальных плоских стержней с массивом древесины**

Оценка влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние соединений клеенных стальных плоских стержней с массивом древесины проведена при помощи методики планирования эксперимента [3, 19].

В качестве характеристики цели (параметр оптимизации), которая может задаваться количественно, назначаем величину разрушающей нагрузки  $N_{\text{разр}}$ , кН.

На основании имеющихся данных предыдущих опытов, а также справочной информации, отобраны 10 факторов, влияющих на величину параметра оптимизации: длина плоского стержня ( $X_1$ ), мм; ширина плоского стержня ( $X_2$ ), мм; толщина плоского стержня ( $X_3$ ), мм; длина распределительной фасонки ( $X_4$ ), мм; диаметр отверстий во вклеиваемой части плоского стержня ( $X_5$ ), мм; количество отверстий ( $X_6$ ), шт.; плотность заполнения поверхности стержня отверстиями ( $X_7$ ), шт/мм<sup>2</sup>, толщина клеевой прослойки ( $X_8$ ), мм; тип применяемого клея ( $X_9$ ); древесина ( $X_{10}$ ). Два последних фактора, несмотря на их значимость, были исключены из перечня по той причине, что в практике строительства наибольшее распространение как конструкционный материал

получила сосна, а рекомендуемый клей [30, 123, 124] – эпоксидная смола марки ЭД-20. В итоге имеем 8 факторов. Для определения наиболее значимых факторов из утвержденного перечня, влияющих на параметр оптимизации, была разработана матрица рангов (таблица 2.3)

Для проверки согласованности экспертных оценок проведем математическую обработку результатов ранжирования. Зададим значение коэффициента согласованности (конкордации)  $W_n = 0,5$ . Величина данного коэффициента изменяется в пределах от 0 до 1. При  $W = 1$  считается, что согласованность экспертных мнений полная. При  $W = 0$  – согласованность отсутствует (связи между оценками нет). При значении  $W > 0,5$  – оценки экспертов в большей степени согласованы, чем не согласованы.

Таблица 2.3 – Матрица рангов

Эксперты (m=5)	Факторы R=8							
	$l_{cm},$ мм	$b_{cm},$ мм	$t_{cm},$ мм	$l_{\phi},$ мм	$d_{омв},$ мм	$n_{омв},$ ШТ	$\rho_o,$ ШТ/мм <sup>2</sup>	$t_{кл},$ мм
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>
1	1	2	7	5	6	3	4	8
2	2	1	8	4	6	5	3	7
3	3	1	8	6	5	4	2	7
4	3	1	7	5	4	6	2	8
5	1	2	7	5	6	4	3	8
$\sum_{j=1}^m a_{ij}$	10	7	37	25	27	22	14	38
$\Delta_i$	-12,5	-15,5	14,5	2,5	4,5	-0,5	-8,5	15,5
$(\Delta_i)^2$	156,25	240,25	210,25	6,25	20,25	0,25	72,25	240,25

Средняя сумма рангов вычисляется по формуле:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}}{k}, \quad (2.5)$$

где  $m$  – число экспертов,  $a_{ij}$  – ранг  $i$ -го фактора от  $j$ -го эксперта.

$$T = \frac{10+7+37+25+27+22+14+38}{8} = 22,5.$$

Разность между суммой рангов  $i$ -го фактора и средней суммой рангов:

$$\Delta_i = \sum_{i=1}^m a_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}}{k} = \sum_{i=1}^m a_{ij} - T, \quad (2.6)$$

Сумма квадратов разностей:

$$S = \sum_{i=1}^k (\Delta_i)^2, \quad (2.7)$$

$$S = 946.$$

Коэффициент конкордации:

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k)}, \quad (2.8)$$

$$W = \frac{12 \cdot 946}{5^2 \cdot (8^3 - 8)} = 0,90.$$

Рассчитанная величина коэффициента конкордации выше заданного и меньше единицы, что означает неодинаковое ранжирование факторов. Значимость полученного коэффициента необходимо оценить по критерию соответствия  $\chi^2$  (критерий Пирсона). Расчетное значение критерия определяется по формуле:

$$\chi^2 = \frac{12S}{mk(k+1)}, \quad (2.9)$$

$$\chi^2 = \frac{12 \cdot 946}{5 \cdot 8 \cdot (8+1)} = 31,53.$$

Определим значение критерия Пирсона при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $f_0 = k - 1 = 7$  из справочника. Значение  $\chi^2_{\alpha;f} = 6,35$  меньше расчетного значения критерия и можно утверждать, что степень влияния факторов на параметр оптимизации согласуется с коэффициентом конкордации  $W = 0,9$ . Для наглядности составим диаграмму рангов (рисунок 2.28).

Способами воздействия на объект исследования являются следующие количественные факторы:  $X_1$  ( $X_1$ ) – длина плоского стержня ( $l_{cm}$ ), мм;  $X_2$  ( $X_2$ ) – ширина плоского стержня ( $b_{cm}$ ), мм;  $X_3$  ( $X_7$ ) – плотность заполнения поверхности стержня отверстиями, шт/мм<sup>2</sup>. Все выбранные факторы являются совместимыми, однозначными, управляемыми и независимыми.

Так как каждый из факторов реализуется на двух уровнях, то имеем полный факторный эксперимент типа  $2^k$ . Зная число факторов (3 фактора), сразу можно определить количество опытов, необходимых для реализации всех возможных сочетаний уровней факторов:  $N=2^k$ , где  $N$  – число опытов,  $k$  – число факторов, 2 – число уровней. Для кодирования факторов применяются обозначения «-1» или «-» и «+1» или «+» для нижнего и верхнего уровней соответственно.

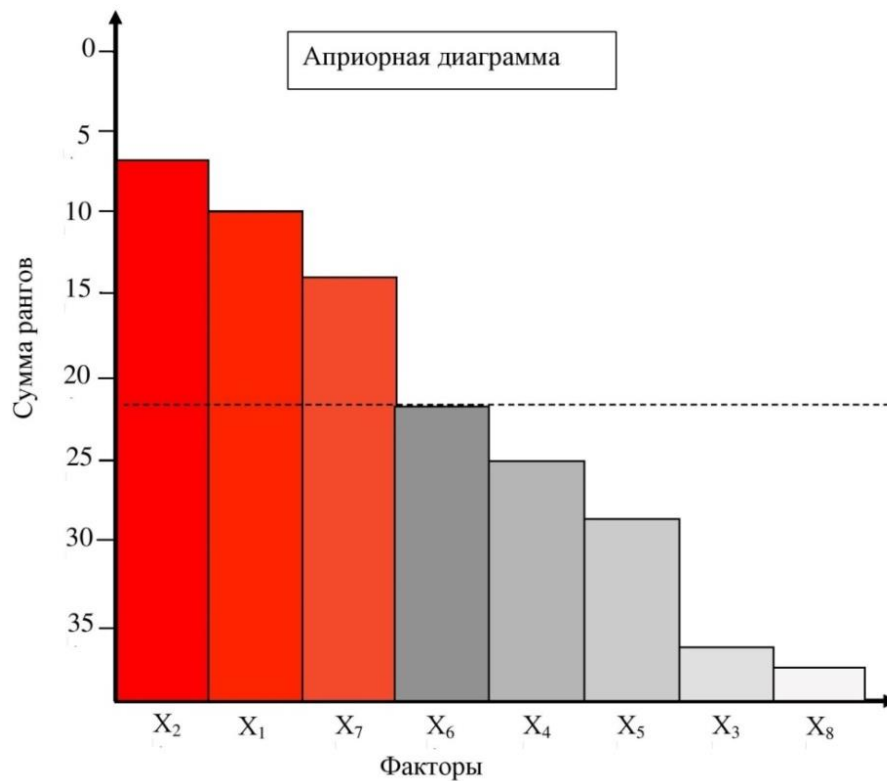


Рисунок 2.28 – Средняя априорная диаграмма рангов

Следующим этапом является выбор интервала варьирования для каждого из выбранных факторов. Для облегчения процесса обозначим некоторые конструктивные особенности плоского стержня. Диапазон значений длины плоского стержня ограничим значениями 100 мм и 300 мм для нижнего и верхнего уровня соответственно из конструктивных соображений. При необходимости восприятия больших усилий целесообразно применить несколько параллельно работающих плоских стержней. При конструировании соединений целесообразно ширину плоского стержня назначать не более половины высоты поперечного сечения деревянного элемента с учетом его острожки. Отверстия, высверливаемые в стержне, принимаются диаметром 10 мм. Расположение отверстий на плоском стержне равномерное по всей площади, причем от краев стержня до отверстий со всех сторон принимается фиксированное расстояние в 5 мм. Под плотностью заполнения поверхности стержня отверстиями будем понимать количество отверстий, приходящееся на единицу площади стержня. Значения уровней факторов приведены в таблице 2.4.





Таблица 2.7 – Результаты опыта

№	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>cp</sub>	S <sub>n</sub> <sup>2</sup>
1	-	-	-	14,22	11,95	15,49	13,89	3,22
2	+	-	-	35,87	41,43	45,96	41,09	25,54
3	-	+	-	40,12	35,51	32,23	35,95	15,71
4	+	+	-	94,56	105,67	119,59	106,61	157,28
5	-	-	+	17,44	19,35	22,68	19,82	7,03
6	+	-	+	57,51	56,31	52,16	55,32	7,88
7	-	+	+	45,32	51,98	48,26	48,52	11,14
8	+	+	+	135,35	143,51	158,32	145,73	135,59
<b>S<sub>e</sub>=363,39</b>								

Можно записать уравнение регрессии в общем виде:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3 \quad (2.10)$$

Результаты расчета для трех параллельно проводимых опытов представлены в таблице 2.7, где S<sub>n</sub><sup>2</sup> – построчные дисперсии, определяемые по формуле:

$$S_n^2 = \frac{(y_1 - y_{cp})^2 + (y_2 - y_{cp})^2 + (y_3 - y_{cp})^2}{n-1}, \quad (2.11)$$

$$S_e = \sum_{n=1}^N S_n^2 - \text{сумма квадратов ошибок.}$$

Для проверки гипотезы об однородности дисперсий вычислим критерий Кохрена. Для этого выберем наибольшее из рассчитанных значений построчной дисперсии. Формула расчета критерия Кохрена:

$$G = \frac{S_{max}^2}{S_e} \leq G_\alpha, \quad (2.12)$$

$$G = \frac{157,28}{363,39} = 0,433.$$

При уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $f_1 = 2$  из справочной таблицы принимаем значение критерия Кохрена  $G_\alpha = 0,5157$ . Полученное расчетное значение критерия не превышает критического ( $0,433 < 0,5157$ ). С 95 %-ой доверительной вероятностью ( $P = 0,95$ ) можно утверждать, что дисперсии однородны, а значит, опыт хорошо воспроизводим.

Выполним расчет коэффициентов уравнения регрессии.

Свободного члена:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N X_0 \cdot Y_{cp}}{N}, \quad (2.13)$$

Оценка линейных коэффициентов регрессии:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N X_i \cdot Y_{cp}}{N}, \quad (2.14)$$

Коэффициенты регрессии взаимодействия факторов первого порядка:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i \cdot X_j \cdot Y_{cp}}{N}, \quad (2.15)$$

Коэффициенты регрессии взаимодействия факторов второго порядка:

$$b_{ijz} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i \cdot X_j \cdot X_z \cdot Y_{cp}}{N}. \quad (2.16)$$

Результаты расчета коэффициентов уравнения представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Коэффициенты уравнения регрессии

№	$X_1 Y_{cp}$	$X_2 Y_{cp}$	$X_3 Y_{cp}$	$X_1 X_2 Y_{cp}$	$X_1 X_3 Y_{cp}$	$X_2 X_3 Y_{cp}$	$\frac{X_1 X_2}{X_3 Y_{cp}}$	$Y_{cp}$
1	-13,89	-13,89	-13,89	13,89	13,89	13,89	-13,89	13,89
2	41,09	-41,09	-41,09	-41,09	-41,09	41,09	41,09	41,09
3	-35,95	35,95	-35,95	-35,95	35,95	-35,95	35,95	35,95
4	106,61	106,61	-106,61	106,61	-106,61	-106,61	-106,61	106,61
5	-19,82	-19,82	19,82	19,82	-19,82	-19,82	19,82	19,82
6	55,32	-55,32	55,32	-55,32	55,32	-55,32	-55,32	55,32
7	-48,52	48,52	48,52	-48,52	-48,52	48,52	-48,52	48,52
8	145,73	145,73	145,73	145,73	145,73	145,73	145,73	145,73
$\sum_{i=1}^N$	230,57	206,69	71,85	105,17	34,85	31,53	18,25	466,93
$b_{i(j,z)}$	$b_1=28,82$	$b_2=25,83$	$b_3=8,98$	$b_{12}=13,15$	$b_{13}=4,36$	$b_{23}=3,94$	$b_{123}=2,28$	$b_0=58,37$

Уравнение регрессии с рассчитанными коэффициентами примет вид:

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

Определим дисперсию воспроизводимости:

$$S_y^2 = \frac{S_e}{f_2 f_1}, \quad (2.17)$$

где  $f_1 = n - l$ ;  $f_2 = N$  – числа степеней свободы.

$$S_y^2 = \frac{363,39}{8 \cdot (3-1)} = 22,71.$$

Определим дисперсию коэффициентов регрессии и среднеквадратичную ошибку:

$$S_{bi}^2 = \frac{s_y^2}{N}, \quad (2.18)$$

$$S_{bi}^2 = \frac{22,71}{8} = 2,84.$$

$$S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2}, \quad (2.19)$$

$$S_{bi} = \sqrt{2,84} = 1,685.$$

Тогда доверительный интервал для коэффициентов регрессии будет равен:

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S_{bi}, \quad (2.20)$$

$$\Delta b_i = \pm 2,12 \cdot 1,685 = \pm 3,57.$$

где  $t$  – критерий Стьюдента определяется по справочной таблице при выбранном уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $f_3 = f_1 \cdot f_2 = 16$ .

Определим значимость коэффициентов, исходя из условия:

$$|b_i, b_{ij}, b_{ijz}| \geq t \cdot S_{bi}. \quad (2.21)$$

Коэффициенты, значение которых меньше 3,57, исключаются из уравнения регрессии. Можно сделать вывод о том, что для параметра оптимизации значимы все члены уравнения, кроме коэффициента  $b_{123}$ .

Итоговое уравнение регрессии с значимыми коэффициентами имеет вид:

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

Выполним проверку адекватности этого уравнения. Рассчитаем остаточную дисперсию по формуле:

$$S_{ад}^2 = \frac{S_R}{f_{ад}}, \quad (2.22)$$

$$S_{ад}^2 = \frac{41,63}{4} = 10,41.$$

где  $S_R = \sum_{i=1}^N \Delta y_i^2$  – остаточная сумма квадратов,

$f_{ад}$  – число степеней свободы для дисперсии адекватности, вычисляемое по формуле:

$$f = N - (k + 1), \quad (2.23)$$

$$f = 8 - (3 + 1) = 4.$$

Расчетную матрицу представим в виде таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Расчетная матрица

№	$b_{0x_0}$	$b_{1x_1}$	$b_{2x_2}$	$b_{3x_3}$	$b_{12x_{12}}$	$b_{13x_{13}}$	$b_{23x_{23}}$	$\hat{y}_n$	$\bar{y}_n$	$(\hat{y}_n - \bar{y}_n)^2$
1	58,37	-28,82	-25,83	-8,98	13,15	4,36	3,94	16,19	13,89	5,29
2	58,37	28,82	-25,83	-8,98	-13,15	-4,36	3,94	38,81	41,09	5,20
3	58,37	-28,82	25,83	-8,98	-13,15	4,36	-3,94	33,67	35,95	5,20
4	58,37	28,82	25,83	-8,98	13,15	-4,36	-3,94	108,89	106,61	5,20
5	58,37	-28,82	-25,83	8,98	13,15	-4,36	-3,94	17,55	19,82	5,15
6	58,37	28,82	-25,83	8,98	-13,15	4,36	-3,94	57,61	55,32	5,24
7	58,37	-28,82	25,83	8,98	-13,15	-4,36	3,94	50,79	48,52	5,15
8	58,37	28,82	25,83	8,98	13,15	4,36	3,94	143,45	145,73	5,20
										<b>S<sub>R</sub>=41,63</b>

Выполним проверку, используя критерий Фишера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}, \quad (2.24)$$

$$F = \frac{10,41}{22,71} = 0,46.$$

Табличное значение F - критерия при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  составляет 3,01. Так как расчетное значение критерия не превосходит критическое, то можно сделать вывод об адекватности составленного уравнения регрессии. Наибольшее влияние на параметр оптимизации оказывают длина и ширина плоского стержня (рисунок 2.29).

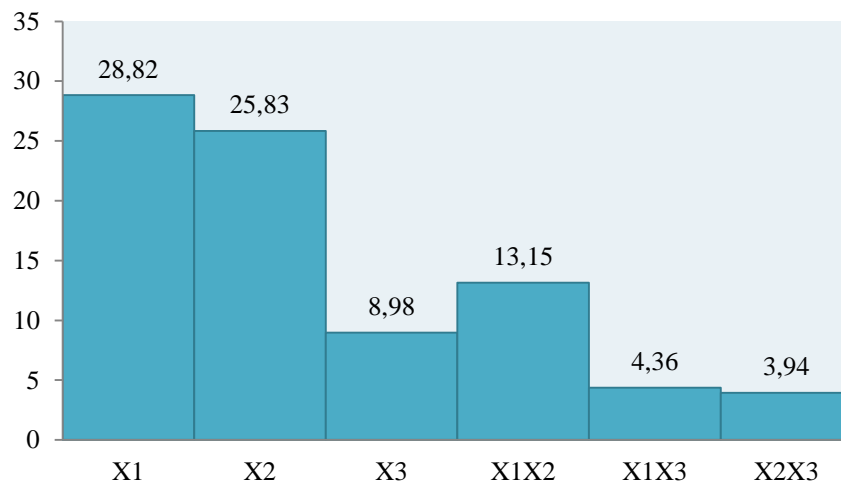


Рисунок 2.29 – Влияние факторов на параметр оптимизации

Для проверки выполненного анализа и для наглядности визуализация графических зависимостей выполнена с использованием программы «Microsoft Office Excel 2010» (рисунок 2.30-2.31).



Рисунок 2.30 – Модель процесса

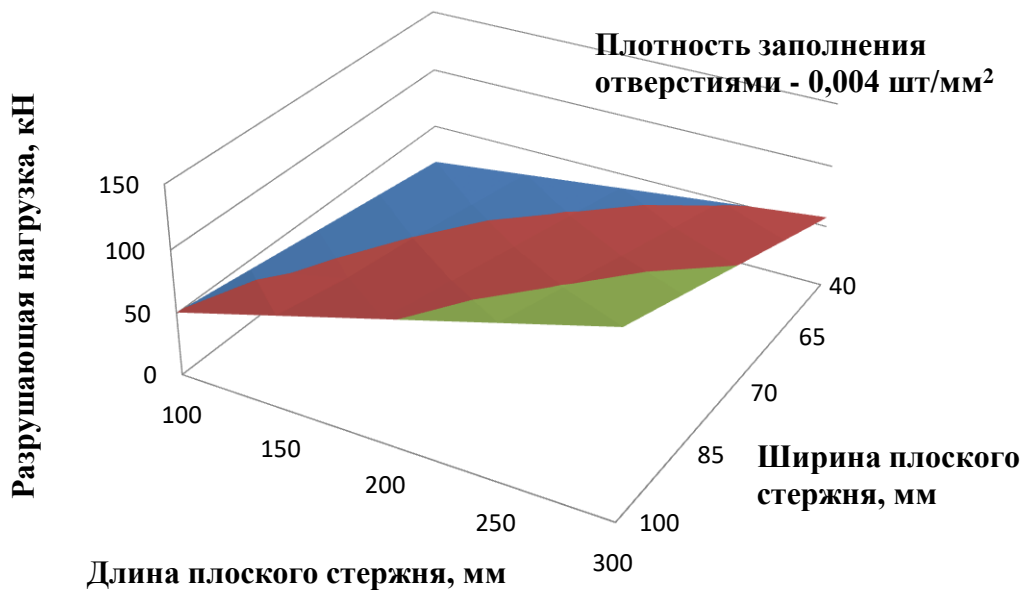


Рисунок 2.31 – Оценка отклика поверхности функции

Выполненная при помощи методики планирования эксперимента оценка факторов воздействия на напряженно-деформированное состояние соединений вклеенных стальных плоских стержней с массивом древесины позволила выявить степень влияния на разрушающую длины плоского стержня, ширины плоского стержня и плотности заполнения поверхности стержня отверстиями.

## 2.8 Выводы по второй главе

1. Численными методами выполнено исследование напряженно-деформированного состояния стальных плоских стержней, клеенных в массив древесины, в зависимости от различных конструктивных параметров самих стержней, величины и угла приложенной к ним нагрузки. Подтверждена целесообразность применения в узловых соединениях цельнодеревянных ферм предлагаемых соединительных элементов.

2. Выявлен характер распределения нормальных напряжений в плоском стержне и характер распределения касательных напряжений в древесине. При определении расчетной несущей способности клеенного стержня необходимо учитывать неравномерность распределения касательных напряжений в древесине по её контакту с клеевой прослойкой при помощи коэффициента  $k_n$ , численное значение которого, в зависимости от соотношения длины стержня к длине фасонки и ширины стержня, можно определять по графикам, приведенным на рисунке 2.11, учитывая расчётное сопротивление древесины скалыванию под углом передачи усилия на стержень.

3. При конструировании узлов деревянных ферм целесообразно назначать толщину клеиваемого плоского стержня 4-8 мм, ширину 40-100 мм и длину клеиваемой части не более 3,5 длины фасонки при ширине стержня 50 мм и не более 5,5 при ширине стержня 100 мм, определяя промежуточные значения по интерполяции.

4. В случае передачи нагрузки на клеенный плоский стержень под углом к его оси необходимо выполнять центрацию узла фермы по оси клеенной части стержня. В случае отсутствия такой возможности учитывать возникающий эксцентриситет при определении расчетной несущей способности стержня.

5. Применение отверстий во клеиваемой части плоского стержня способствует повышению несущей способности и снижению деформативности соединения за счет эффективного включения клеевого слоя в работу на скалывание древесины.

6. Выявлено, что при изменении угла приложения силы к оси клееного стержня величина разрушающей нагрузки изменяется аналогично изменению расчетного сопротивления древесины скалыванию под этим же углом, что позволяет в формуле по определению расчетной несущей способности узлов ферм на стальных клеенных плоских стержнях использовать непосредственно нормируемую величину  $R_{ск}^{\infty}$  с учетом соответствующих корректировочных коэффициентов.

7. При проектировании рассматриваемого класса соединений необходимо обеспечивать рациональное сочетание, как максимальной плотности высверливаемых отверстий, так и минимальной трудоемкости работ по выполнению отверстий во вклеиваемой части плоских стержней.



### **3 КОНСТРУКЦИИ ДЕРЕВЯННЫХ ФЕРМ С УЗЛОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ НА СТАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЯХ И АЛГОРИТМЫ ИХ РАСЧЕТА**

#### **3.1 Общие положения, принятые при разработке опытных конструкций**

Применение стальных плоских стержней в узловых соединениях деревянных ферм позволит снизить материалоемкость и, в то же время, повысить эффективность этих конструкций.

Использование клеевых соединений в сочетании с механическими связями, в виде стальных плоских стержней, в соединениях деревянных ферм позволит рассматривать узлы как жесткие. Расчет конструкции с жесткими узлами выполняется без учета податливости. Так как предельные прогибы ферм ограничены в зависимости от перекрываемого пролета, то высота ферм с предлагаемыми соединениями может быть снижена по сравнению с аналогичными конструкциями на податливых связях из-за более низкой деформативности. Уменьшение отношения высоты фермы к пролету позволит уменьшить строительный объем здания в целом, что в свою очередь снизит общую стоимость строительства. Введение шарниров в узлы ферм позволяет упростить расчет и повысить надежность конструкции за счет обеспечения правильной работы каждого элемента.

Разработка опытных конструкций выполнена для зданий промышленного и гражданского строительства, эксплуатируемых при температурно-влажностных условиях 1а, 1б, 2 по СП 64.13330-2017 «Деревянные конструкции» [124], в отапливаемых зданиях с относительной влажностью воздуха до 65 %. Ветровая и снеговая нагрузки приняты соответственно для III и IV районов для Оренбургской области по картам климатического районирования [121]. При разработке учитывались требования, действующих нормативных документов [110, 111, 112]. Цельнодеревянные фермы с узлами на стальных плоских стержнях предназначены для перекрытия пролетов от 9 до 18 м. В этом

диапазоне разработаны стропильные конструкции с разной решеткой.

Основной материал поясов и элементов решетки – пиломатериалы хвойных пород второго сорта с влажностью 8...12 %, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 8486-86\* [29]. Габариты цельных элементов из древесины не превышают максимальных размеров установленных ГОСТ 24454-80 [27].

Вклеиваемые соединительные элементы выполняются из сортамента листовой и полосовой стали по ГОСТ 19903-2015, ГОСТ 19904-90, ГОСТ 82-70, ГОСТ 103-2006 . Рекомендуется к применению сталь марки Ст3 обыкновенного качества, поставляемая по механическим свойствам. Разделку заготовок допускается выполнять как при помощи механической резки, гильотинной рубки, так и при помощи газоплазменной резки с последующей обработкой острых кромок и удалением наплывов металла. Выполнение отверстий, как мероприятия для повышения несущей способности соединений, рекомендуется производить на стационарных сверлильных станках при диаметрах до 15 мм. При устройстве отверстий диаметрами свыше 15 мм допускается их выполнять на двухкоординатных установках газоплазменной резки. Стальные детали, предназначенные для крепления элементов решетки к выступающим частям вклеенных плоских стержней выполняются из листовой и полосовой стали, а также, при необходимости, из круглого горячекатаного сортового проката, изготовленного по ГОСТ 2590-2006.

Для вклеивания соединительных элементов применяется эпоксидная смола марки ЭД-20 по ГОСТ 10587-84 «Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия», рекомендуемая для вклеивания стержней в массив древесины [123]. Использование эпоксидных смол других марок возможно только после дополнительных исследований, которые в данной работе не проводились. В качестве отвердителя применяется полиэтиленполиамин (ПЭПА). Клеевой компаунд применяется в чистом виде без наполнителя, так как влияние наполнителя на прочность соединения в данной работе не исследовалось.

Для выполнения разъемных соединений используются болты класса

точности В по ГОСТ 7798-70, гайки класса точности В по ГОСТ 5915-70 (СТ СЭВ 3683-82), шайбы по ГОСТ 11371-78.

### **3.2 Технические решения узловых соединений на стальных плоских стержнях**

Конструктивно предлагаемые соединения могут быть выполнены в разъемном и неразъемном вариантах. В разъемных соединениях целесообразно применение болтов, в том числе и специально изготовленных, работающих на срез со смятием или растяжение, в зависимости от положения болта в конструкции узла. К преимуществам новых узлов относится повышение жесткости и обеспечение равнопрочности соединений основным сечением.

#### **3.2.1 Неразборные узловые соединения**

К неоспоримым достоинствам неразъемных соединений можно отнести малую материалоемкость, простоту исполнения, меньший вес, полную заводскую готовность. Такие соединения обходятся дешевле на производстве и соответственно снижают общую стоимость конечной продукции. Однако существует ряд недостатков у неразъемных соединений, применяемых в пролетных конструкциях. По сравнению с разъемными соединениями они являются более сложными в изготовлении. Транспортировка к месту монтажа и подбор длинномерного транспорта при пролетах конструкций свыше 12 м становятся особенно затруднительными в условиях стесненного строительства и некачественных дорог. Предлагаемые узловые соединения в неразборном исполнении рекомендуется использовать для ферм пролетом не более 15 м.

В неразборном исполнении могут быть изготовлены следующие узлы деревянных ферм на стальных плоских стержнях:

- стыки по длине;
- узлы примыкания раскосов и стоек к поясам;

- коньковый узел;
- опорный узел.

Сущность предлагаемых соединений в неразборном варианте заключается в применении плоских стальных стержней, формой повторяющих очертания узлов. В этом случае в деревянных элементах конструкции выполняются пазы, необходимые для размещения в них плоского стержня, и различные подрезы для стыкования элементов в узле. Очевидным достоинством таких соединений в неразборном варианте является то, что стальные элементы закрыты древесиной. Размещение плоских стержней в габаритах сечения деревянных элементов позволяет уменьшить размеры предлагаемых ферм по сравнению с аналогами.

На рисунке 3.1 представлен стык нижнего пояса фермы по длине. В верхней и нижней грани двух элементов нижнего пояса выполнены пазы на длину, равную половине длины соединительного элемента. Высота плоских стержней и соответственно глубина пазов не превышают  $1/3$  высоты поперечного сечения деревянного бруса. При формировании стыка деревянные элементы подводят друг к другу торцами вплотную, выполняют герметизацию шва, плоские стержни устанавливают в пазы и раскрепляют, заполняют пазы расчетным количеством клея. После отверждения клеевого состава стык переворачивают и вклеивают плоские стержни в пазы с другой стороны.

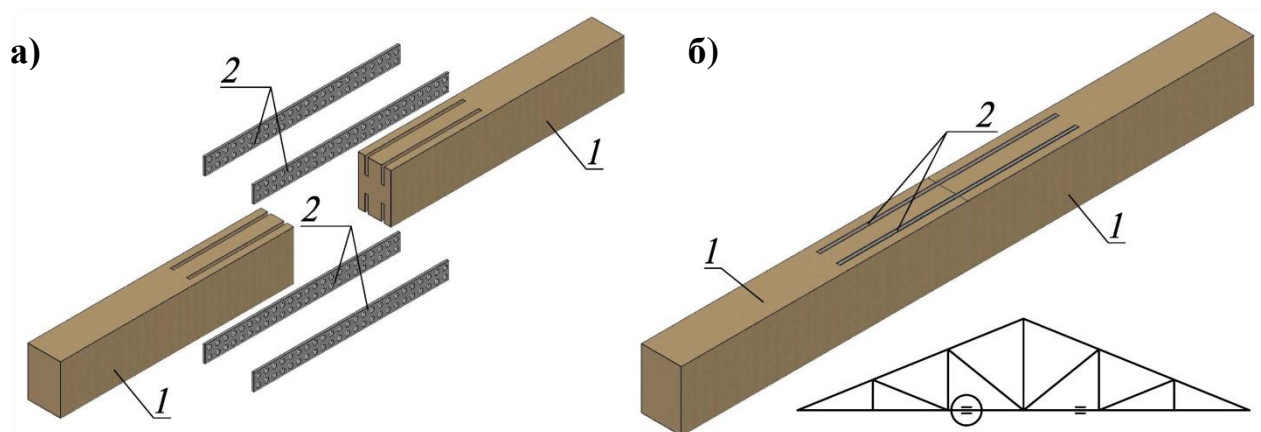


Рисунок 3.1 – Стык нижнего пояса фермы на плоских стальных стержнях в разобранном (а) и собранном (б) виде: 1 - элемент нижнего пояса; 2 – плоский стержень

В составе фермы узел работает следующим образом. В нижнем поясе растягивающие усилия воспринимаются деревянными элементами и передаются на стальные плоские стержни через клеевую прослойку. В случае сжатия (при монтажных нагрузках) усилия в стыке воспринимают плоские стержни и передают на древесину через клеевой слой, а также часть усилий передается через контакт торцов брусьев. Однако, в расчете не учитывается совместная работы плоского стержня на вдавливание и древесины на смятие из-за значительной податливости древесины в сравнении с податливостью вклеенных стержней. При возникновении изгиба усилия в растянутой зоне передаются как в вышеописанном случае.

Соединение стойки с поясом под прямым углом (рисунок 3.2) выполняется на подготовленных Т-образных плоских стержнях. Пазы, устраиваемые в поясе глухие, закрытые с трех сторон, выбирают на глубину равную ширине вклеиваемой части плоского стержня. В стойке выполняют пропилы на всю ширину сечения или же глухие пазы, что является предпочтительным т.к. отпадает необходимость устройства опалубки.

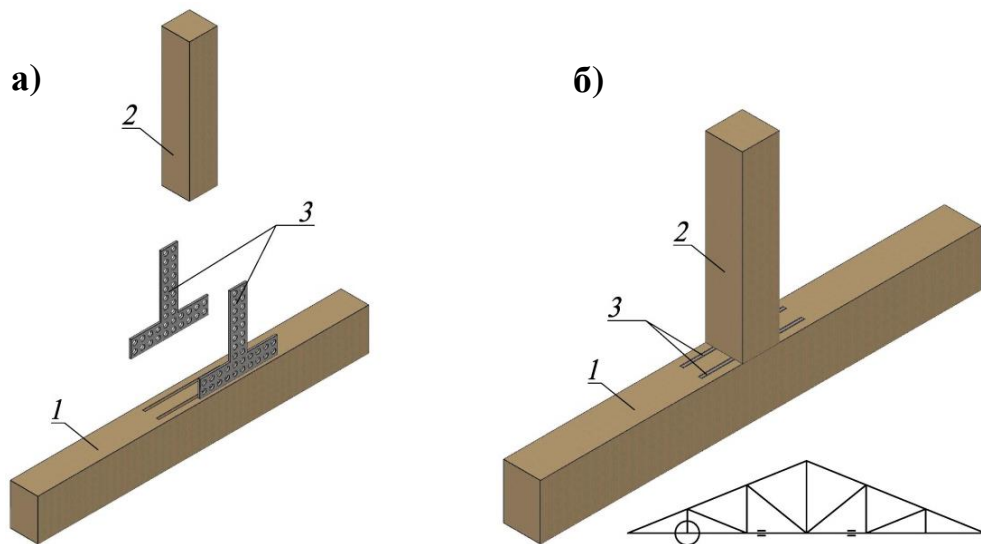


Рисунок 3.2 – Узел соединения стойки с нижним поясом на плоских стальных стержнях в разобранном (а) и собранном (б) виде: 1 – нижний пояс; 2 – стойка; 3 – плоский стержень

При сборке плоские стержни удобнее сначала вклеить в стойку и после

отверждения выполнить вклеивание выступающих частей плоских стержней в пояс. В таком узле усилия от деревянного элемента передаются на плоские стержни через клеевую прослойку, распределяются и передаются на древесину пояса.

К-образный узел формируется по аналогии с описанным выше узлом. В зависимости от угла наклона раскоса к поясу может потребоваться дополнительно подрезать конец бруса для размещения второго элемента (стойки, раскоса). На рисунке 3.3 показаны детали К-образного узла и готовое соединение.

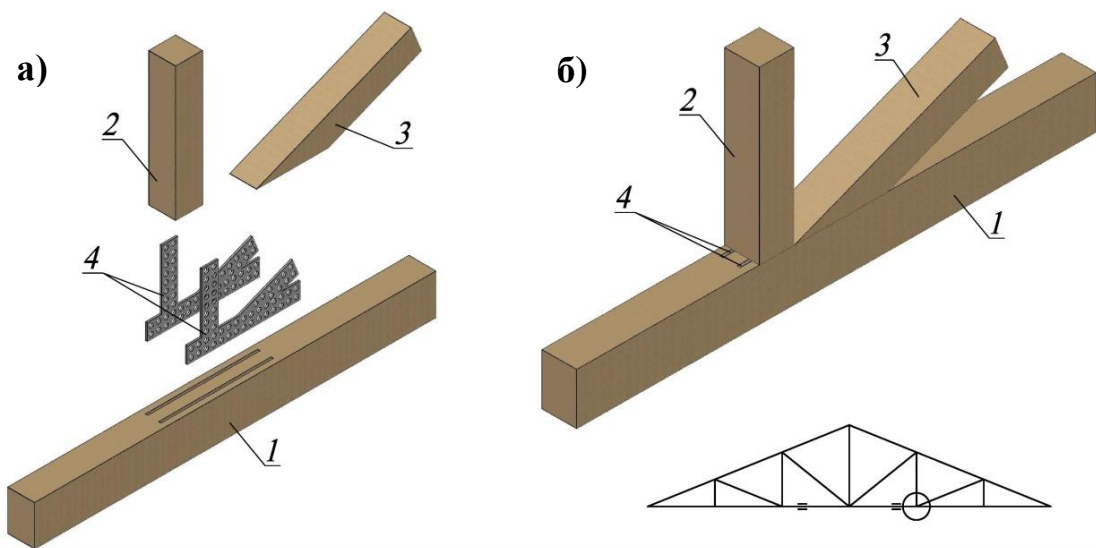


Рисунок 3.3 – Соединение стойки и раскоса с нижним поясом на плоских стальных стержнях в разобранном (а) и собранном (б) виде: 1 – нижний пояс; 2 – стойка; 3 – раскос; 4 – плоский стержень

Конструкция конькового узла в неразборном варианте представлена на рисунке 3.4. Плоские стержни повторяют очертания узла и устанавливаются в пазах, выполненных в верхней и нижней гранях.

Конфигурация стержней, вклеиваемых в нижнюю грань, предусматривает место крепления стойки. К концу стойки прикручена резьбовая головка с отверстием, которая заводится между выступающими частями плоских стержней и фиксируется на болт.

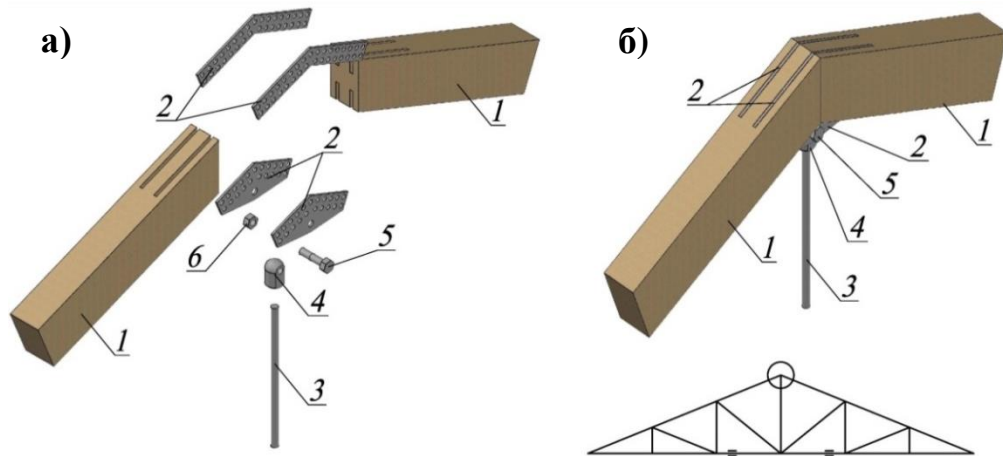


Рисунок 3.4 – Коньковый узел на плоских стальных стержнях в разобранном (а) и собранном (б) виде: 1 – элемент верхнего пояса; 2 – плоский стержень; 3 – стойка; 4 – резьбовая головка; 5 – болт; 6 – гайка

Опорный узел фермы в неразборном варианте показан на рисунке 3.5. Плоские стальные стержни опорного узла обеспечивают требуемый угол наклона верхнего пояса к нижнему. Часть плоских стержней, вклеиваемая в элементы верхнего пояса, воспринимает усилия распора и передает его на нижний пояс. Такой узел дополнительно рассчитывается на действие монтажных нагрузок и обеспечивает необходимую жесткость.

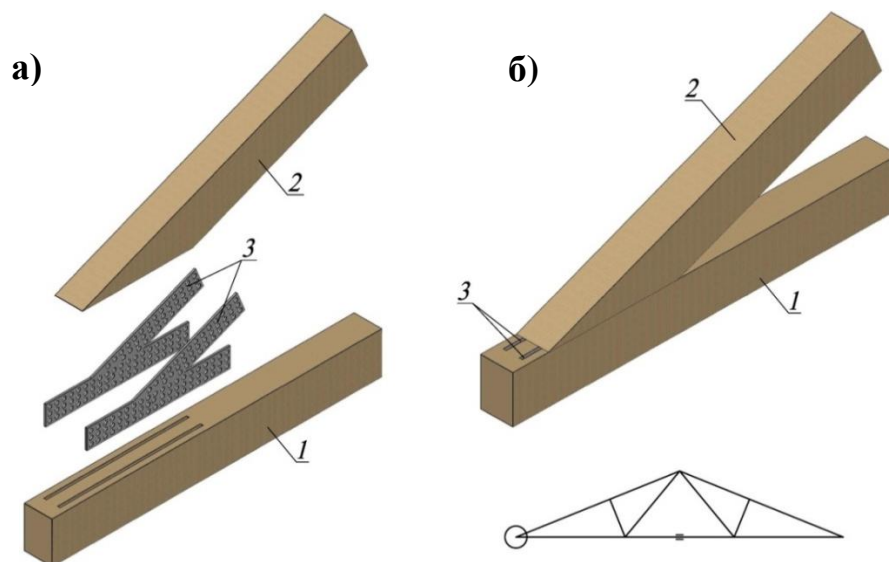


Рисунок 3.5 – Опорный узел фермы на плоских стальных стержнях в разобранном (а) и собранном (б) виде: 1 – нижний пояс; 2 – верхний пояс; 3 – плоский стержень

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.

### 3.2.2 Сборно-разборные узловые соединения

К основным достоинствам сборно-разборных соединений можно отнести удобство транспортировки, возможность унификации деталей, полную заводскую готовность элементов. Пролет ферм с предлагаемыми сборно-разборными соединениями может достигать 18 м.

Конструктивное отличие сборно-разборных соединений заключается в применении дополнительных деталей, например накладки, фланцы, опорные башмаки, выступающие фасонки. Соединение элементов конструкции на болтах (кроме стыков и фланцевых) является шарнирным и обеспечивает правильную работу отдельных элементов конструкции.

Конструкция стыка нижнего пояса с фланцевым соединением (рисунок 3.6) аналогична представленной в работе [108], с той разницей, что в соединении применены плоские стержни с высверленными отверстиями.

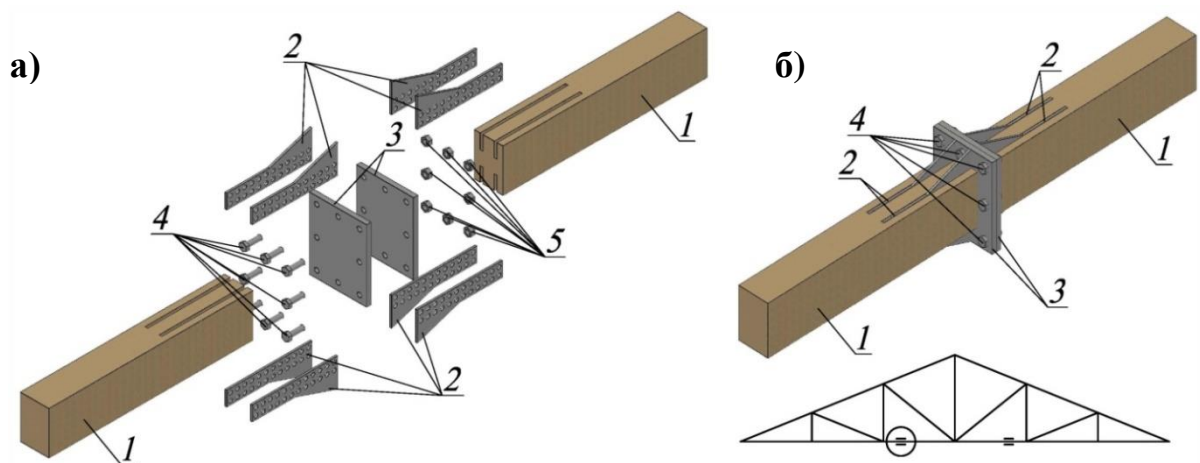


Рисунок 3.6 – Фланцевый стык нижнего пояса на плоских стальных стержнях в разобранном (а) и собранном (б) виде: 1 – элемент нижнего пояса; 2 – плоский стержень; 3 – фланец; 4 – болт; 5 – гайка



При изготовлении сборно-разборных соединений, в частности стыка по длине, 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. При укрупнительной сборке конструкции в условиях строительной площадки для формирования стыкового соединения рабочему требуется выставить детали в проектном положении, установить болты и выполнить их затяжку.

Изготовление стыкового соединения возможно и в более компактном варианте (рисунок 3.7). Вместо фланцев применяются стальные закладные детали, полностью утапливаемые в древесину бруса. В закладных деталях выполнены резьбовые отверстия, причем используются разнонаправленные резьбы в каждой из деталей. На такое решение получен патент [85].

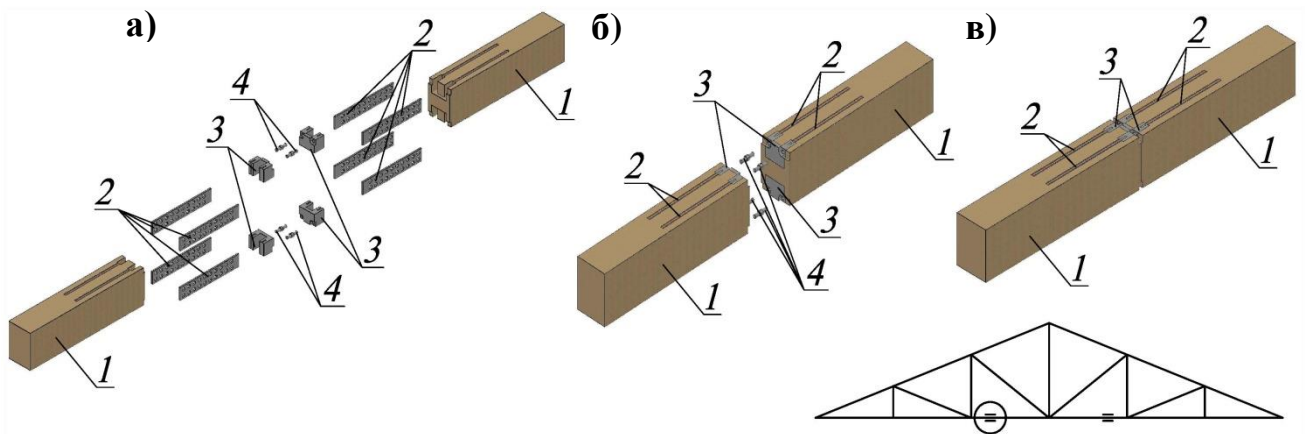


Рисунок 3.7 – Компактный сборно-разборный стык нижнего пояса на плоских стальных стержнях в разобранном виде (а), в виде комплекта для сборки (б) и в разобранном виде (в): 1 – элемент нижнего пояса; 2 – плоский стержень; 3 – закладная деталь; 4 – специальный болт

Процесс изготовления такого соединения отличается от неразборного тем, что плоские стержни, объединенные со стальными деталями, клеивают по отдельности в каждую из стыкуемых деталей. Для выполнения соединения используются специальные болты с разноименной резьбой на разных концах

одного болта. Сборка подготовленного стыка заключается в стягивании двух элементов пояса болтами. Причем, закручивание болтов осуществляется попарно по диагонали. Такой узел описан в работе [69].

При растяжении болты, вкрученные в стальные закладные детали, воспринимают растягивающие усилия, передаваемые деревянным поясом через клей на плоские вклеенные стержни. При сжатии контактные поверхности стальных закладных деталей, а также вклеенные плоские стержни воспринимают сжимающие усилия и перераспределяют по древесине. При изгибе болты растянутого пояса воспринимают растягивающие усилия, передаваемые через стальные вклеенные стержни, а усилия сжатия воспринимаются контактными поверхностями стальных закладных деталей и плоскими стержнями и перераспределяются по древесине. Фотография натурального образца стыка приведена на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Компактное сборно-разборное соединение нижнего пояса (натурная модель): а – два стыкуемых элемента; б – конструкция в сборе

Сборно-разборный коньковый узел фермы с треугольным очертанием верхнего пояса может быть выполнен с применением фланцевого соединения. Конструкция фланцевого соединения конькового узла представлена на рисунке 3.9. В нижней части фланцев для крепления стойки предусмотрены выступающие части с отверстием. Соединение стойки с фланцем реализовано через вилку, в которой имеется паз с отверстиями в стенке. Вилка накручивается на пруток по резьбе. Собранный стойка заводится пазом на фланцы до совмещения отверстий в вилке и во фланцах и фиксируется болтом.

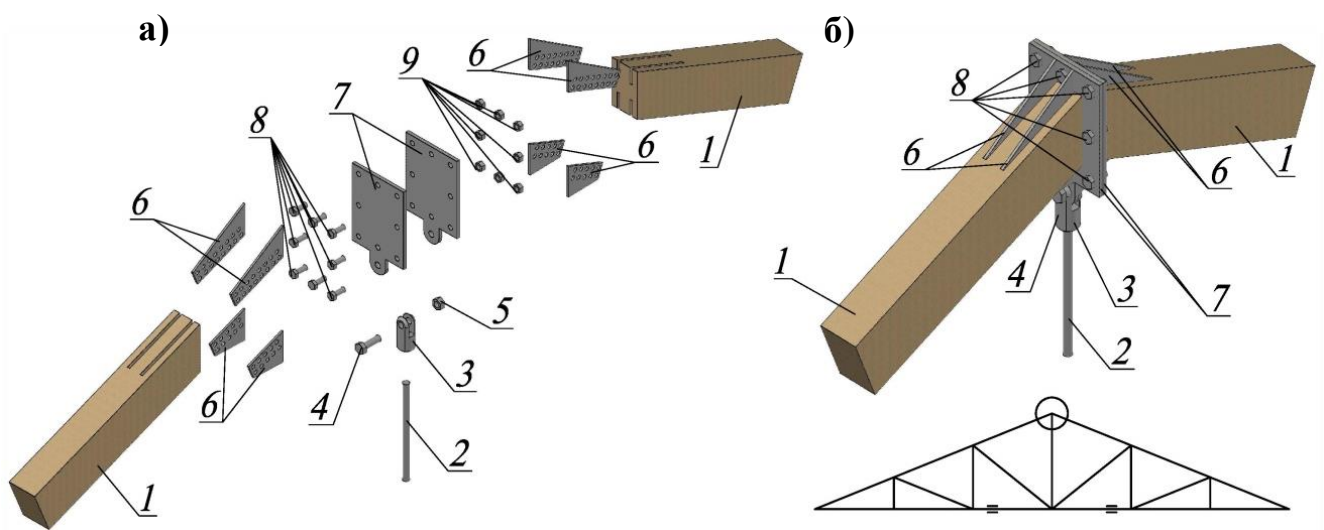


Рисунок 3.9 – Фланцевый коньковый узел фермы в разобранном (а) и собранном (б) виде: 1 – элемент верхнего пояса; 2 – стойка; 3 – резьбовая вилка; 4 – болт; 5 – гайка; 6 – плоский стержень; 7 – фланец; 8 – болт; 9 – гайка

Вариант конструктивного решения опорного узла [86] представлен на рисунке 3.10. Предложенная конструкция может быть использована при изготовлении деревянных ферм в их опорных узлах, а также в узлах соединения сжатых элементов решетки с поясами. Узел включает вставленные в пропилы нижнего пояса стальные плоские стержни, скрепленные с древесиной посредством клея, стальную опорную плиту, стальную обойму, верхний пояс. Решение показано в [69].

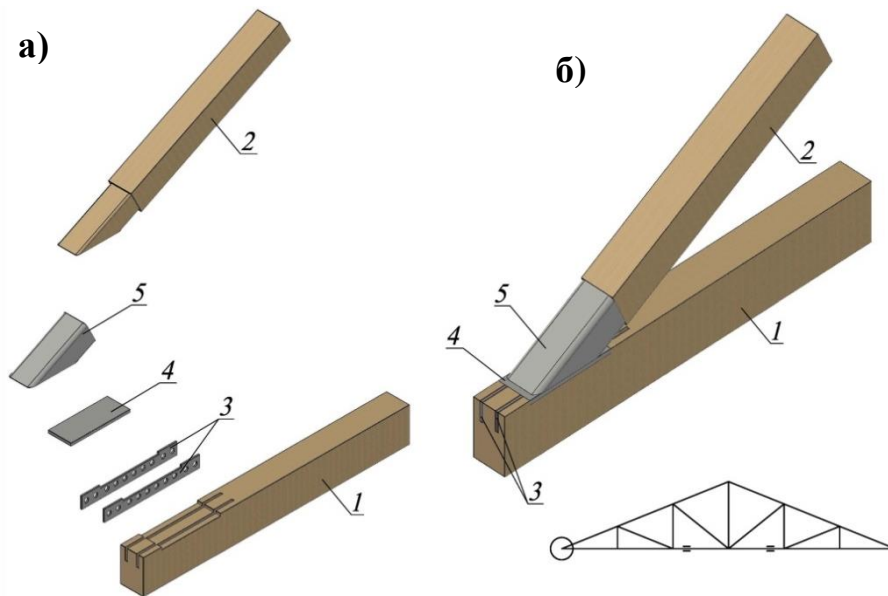


Рисунок 3.10 – Опорный узел фермы на плоских стальных стержнях в разобранном (а) и собранном (б) виде: 1 – нижний пояс; 2 – верхний пояс; 3 – плоский стержень; 4 – опорная плита; 5 – стальная обойма

По сравнению с некоторыми традиционными опорными узлами деревянных ферм предлагаемая конструкции является простой и включает меньшее количество деталей, упрощает сборку, уменьшает количество степеней свободы элемента верхнего пояса, обеспечивает удобство монтажа конструкции в целом, уменьшает габариты узлового соединения из плоскости конструкции.

Сжимающее усилие от верхнего пояса воспринимается стальной обоймой и стальной опорной плитой и передается через поверхность углубления и стальные плоские стержни на нижний пояс. Горизонтальная составляющая сжимающего усилия воспринимается стальной обоймой, передается на стальную опорную плиту, расположенную в выемках, затем, через сварные швы, на плоские стержни, от стержней через клей на нижний пояс. Поперечная сила от внеузловой нагрузки в верхнем поясе, действующая по нормали к его продольной оси, воспринимается частично стальной обоймой и передается на стальную опорную плиту, остальная часть поперечной силы воспринимается непосредственно опорной плитой и распределяется на плоские стержни и на поверхность углубления.

При монтаже конструкции в сборе, в случае крепления грузозахватных приспособлений за верхний пояс, вертикальная составляющая в опорных зонах будет передаваться от верхнего пояса к стальной обойме, затем к стальной опорной плите, затем на стальные плоские стержни и от них на нижний пояс.

Другая конструкция опорного узла представлена на рисунке 3.11. Торец элемента верхнего пояса отрезан перпендикулярно его оси. Для опирания предусмотрен стальной башмак, состоящий из плоских стержней сложного очертания, опорной плиты, подкрепляющих ребер и ограничительных пластин. Конструкция башмака сварная, что облегчает установку в проектное положение при заливке клея. Для фиксации верхнего пояса в конце деревянного бруса и в ограничительных пластинах предусмотрены отверстия, в которые вставляется болт. Усилия от верхнего пояса воспринимаются опорной пластиной и распределяются на выступающие части плоских стержней (фасонки) и, через клеевой слой передаются на древесину нижнего пояса. Подкрепляющие ребра служат для обеспечения устойчивости сжатых фасонки. При выборе такого конструктивного решения необходимо выполнять расчет выступающих частей плоских стержней на устойчивость.

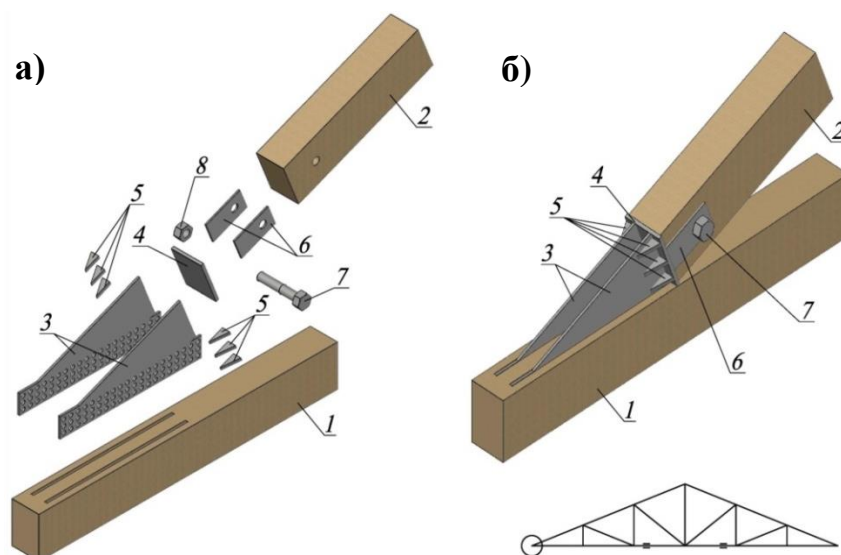


Рисунок 3.11 – Опорный узел фермы на плоских стальных стержнях в разобранном (а) и собранном (б) виде: 1 – нижний пояс; 2 – верхний пояс; 3 – плоский стержень; 4 – опорная плита; 5 – подкрепляющие ребра; 6 – ограничительные пластины; 7 – болт; 8 – гайка

Для исключения возникновения изгибающей нагрузки в опорном узле разработана конструкция с шарнирным креплением верхнего пояса [88]. Разработка показана на рисунке 3.12. Узел включает вставленные в пропилы нижнего пояса стальные плоские стержни, скрепленные с древесиной посредством клея, стальную опорную плиту, стальную обойму, верхний пояс. Сжимающее усилие от верхнего пояса воспринимается стальной обоймой и передается через поверхность на стальные проушины. Далее через стальную ось сжимающее усилие передается на плоские стержни, установленные в продольные пазы, затем на нижний пояс. Отверстия в стальных плоских стержнях нужны для увеличения клеевой адгезии. Для исключения потери устойчивости стальными плоскими стержнями между ними вварена стальная распорка из отрезка уголка. Стальная трубка также выполняет функцию распорки и, при необходимости, может быть заполнена смазкой для снижения трения при вращении в шарнире, образованном плоскими стержнями, стальными проушинами и стальной осью, проходящей через отверстия и стальную трубку. Для предотвращения осевого перемещения стальной оси на одном ее конце выполнен буртик, а на другом отверстие, в которое устанавливается шплинт.

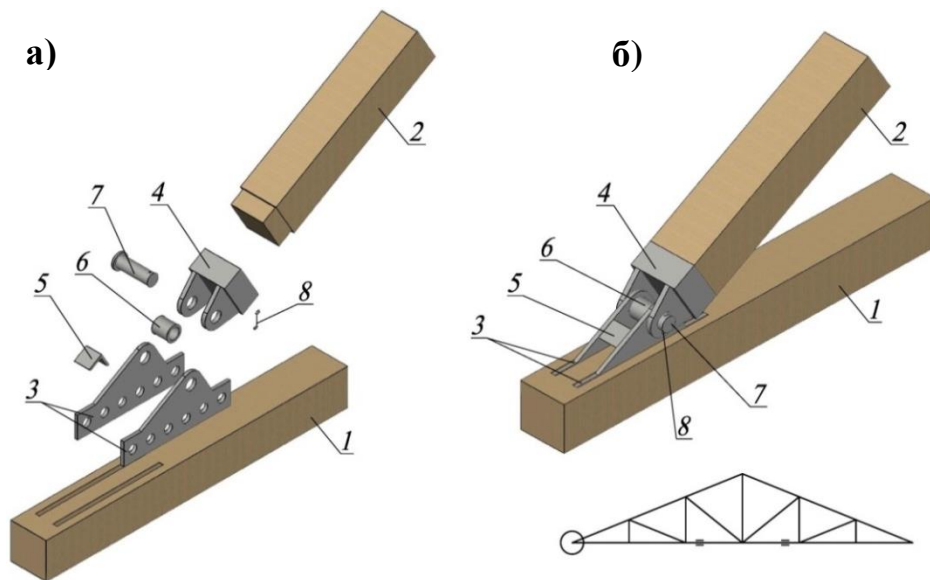


Рисунок 3.12 – Шарнирный опорный узел фермы на плоских стальных стержнях в разобранном (а) и собранном (б) виде: 1 – нижний пояс; 2 – верхний пояс; 3 – плоские стержни; 4 – стальная обойма с проушинами; 5 – распорка; 6 – трубка; 7 – ось; 8 – шплинт

Сборно-разборное соединение растянутого элемента решетки и нижнего пояса с применением плоских вклеенных стержней конструируется на болтах (рисунок 3.13).

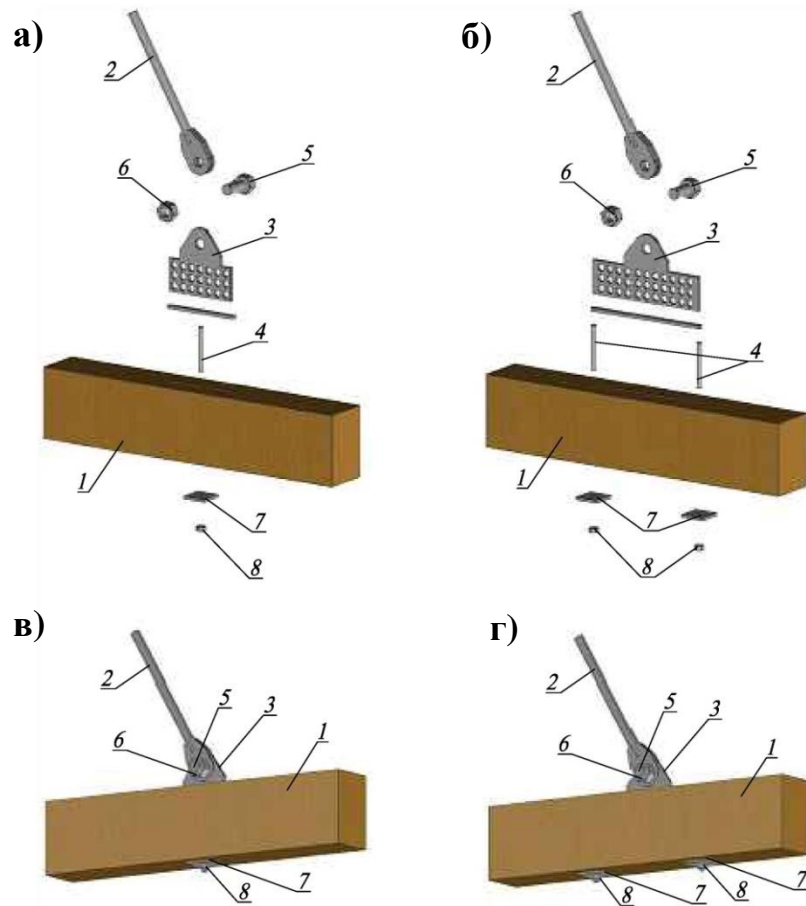


Рисунок 3.13 – Шарнирный узел соединения растянутого элемента решетки и нижнего пояса с постановкой одной аварийной связи (а, в) и двух аварийных связей (б, г): 1 – нижний пояс; 2 – растянутый элемент решетки; 3 – плоский стержень; 4 – аварийная связь; 5 – болт; 6 – гайка; 7 – шайба; 8 – гайка

Плоский стержень выполняется с распределительной фасонкой, в которой просверлено или вырезано отверстие, а растянутый элемент снабжен проушиной или соединительной вилкой. Любой из представленных узлов может быть дополнительно оснащен аварийной связью в виде шпильки, приваренной к плоскому стержню. Так как характер разрушения предлагаемых соединений хрупкий, то для обеспечения безопасности устанавливаются связи, которые в момент разрушения воспринимают нагрузку и передают на деревянные

элементы через распределительные шайбы, заставляя древесину работать на смятие поперек волокон. Деревянный пояс снабжен стальным плоским стержнем с фасонкой, заглубленным в глухой паз с отверстием и жестко зафиксирован в нем. Стальной плоский стержень снабжен распределительной пластиной и шпилькой (шпильками), проходящей через сквозное отверстие в деревянном поясе, а шпилька (шпильки) прикручена к деревянному поясу через распределительную шайбу (шайбы). Работа узла описана в патенте [91].

Такой принцип использован и в соединении элементов решетки с верхним поясом (рисунок 3.14).

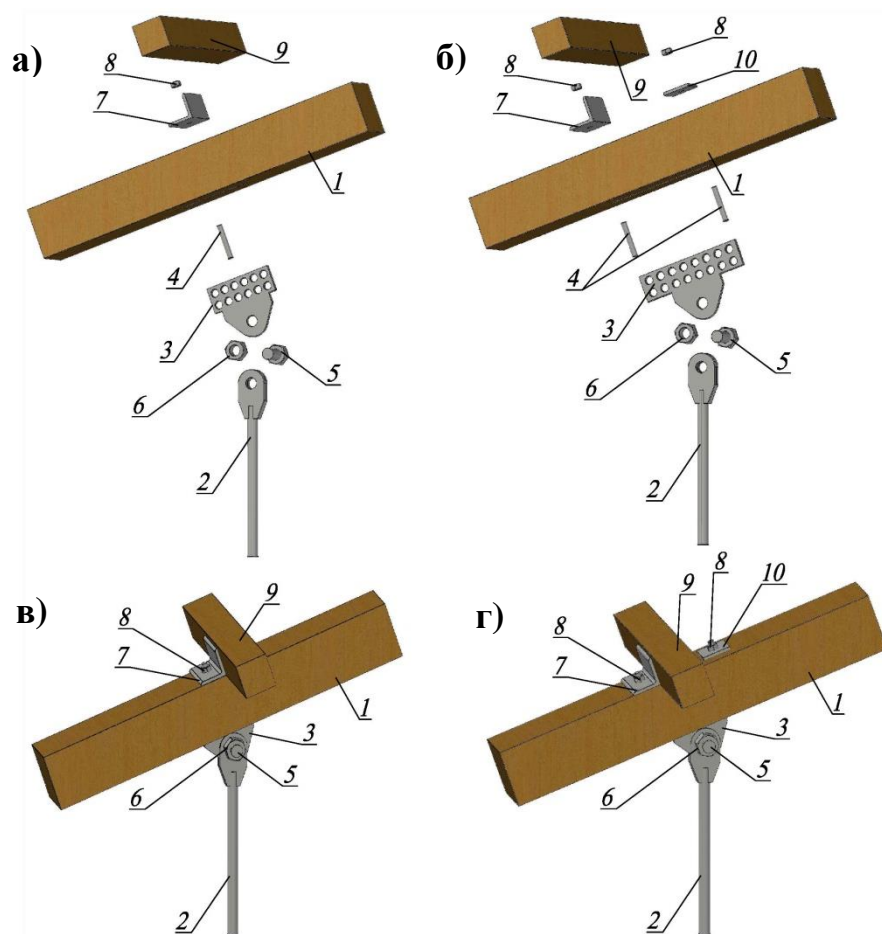


Рисунок 3.14 – Шарнирный узел соединения растянутого элемента решетки и верхнего пояса с постановкой одной аварийной связи и крепления прогона (а, в)

и двух аварийных связей и крепления прогона (б, г): 1 – верхний пояс; 2 – растянутый элемент решетки; 3 – плоский стержень; 4 – аварийная связь; 5 – болт; 6 – гайка; 7 – крепление прогона; 8 – гайка; 9 – прогон; 10 – шайба



Отличительные особенности решения описаны в патенте [89]. При такой компоновке аварийная связь соединяется с поясом через распределительный элемент, дополнительно выполняющий функцию крепления прогона. Усилие от элемента решетки через проушину передается на болт, установленный в отверстия фасонки и проушины. От болта усилие передается на фасонку и распределяется по ее длине. От фасонки усилие передается на вклеенную часть стального плоского стержня, затем на деревянный пояс. Аварийная связь (связи), в случае хрупкого разрушения клевого соединения, воспринимает усилие и передает его на гайку (гайки). От гайки (гаек) усилие передается на шайбу или на уголок (при наличии прогона). Шайба или уголок распределяет полученное усилие и передает на деревянный пояс.

В узле соединения сжатых раскосов и растянутой стойки с нижним поясом плоские стальные стержни воспринимают комбинацию выдергивающих и вдавливающих усилий. Поэтому, в данном случае, рационально предусмотреть упорные площадки для сжатых элементов и болтовое крепление для растянутого как показано на рисунке 3.15.

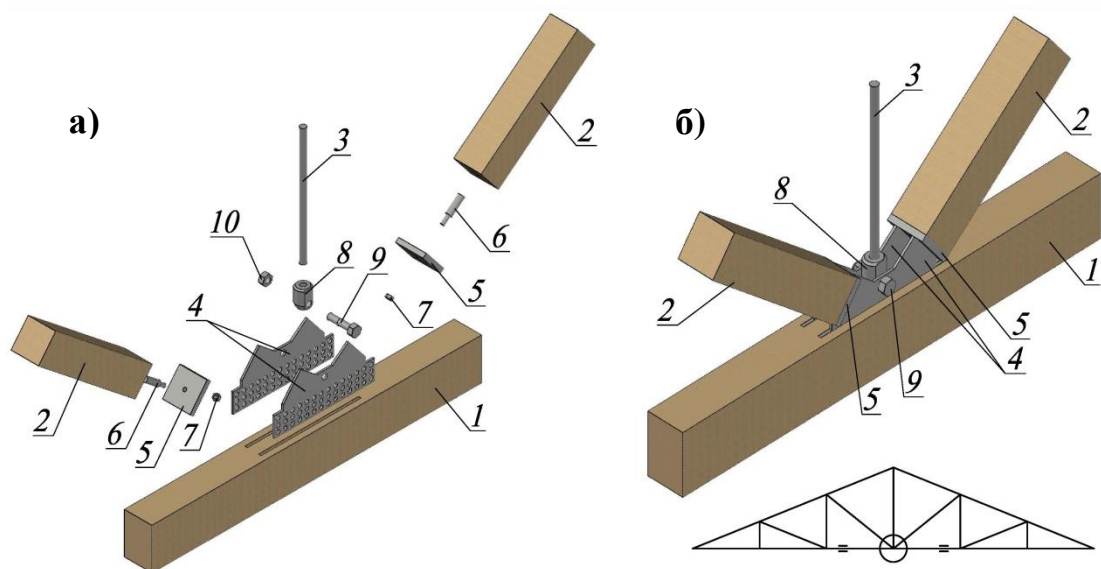


Рисунок 3.15 – Узел соединения сжатых раскосов и растянутой стойки с нижним поясом в разобранном (а) и собранном (б) виде: 1 – нижний пояс; 2 – раскос; 3 – стойка; 4 – плоский стержень; 5 – опорная площадка; 6 – шкант; 7 – гайка; 8 – резьбовая головка с отверстием; 9 – болт; 10 – гайка

Для сжатых раскосов предусмотрена посадка на шкранты с целью фиксации в проектном положении. Шкранты закреплены в опорных площадках, выполненных из листовой стали. Опорные площадки приварены к плоским стальным стержням сложной конфигурации. Для крепления растянутой стойки в плоских стержнях выполнены отверстия. Стойка может быть снабжена проушиной или резьбовой головкой с отверстием под болт.

Еще одним немаловажным фактором является то, что при использовании известных узловых соединений (традиционных) ширина сечений элементов решетки принимается равной ширине поясов. Это необходимо для установки связей, накладок и т.д. В предлагаемых узлах ширина сечения элементов решетки не зависит от ширины сечения поясов и может быть уменьшена по результатам расчета.

Варианты узлов на клеенных плоских стальных стержнях не исчерпываются приведенными конструкциями. Представленные разработки лишь демонстрируют принцип и возможности применения предлагаемых соединительных элементов. Все рассмотренные решения приведены для треугольных цельнодеревянных ферм, однако могут применяться также и в деревянных фермах с другим очертанием поясов и в металлодеревянных конструкциях.

### **3.3 Разработка конструкций с узлами на стальных плоских стержнях**

На основе предлагаемых узлов разработана серия деревянных ферм различных типов. С учетом выявленных особенностей предложенного типа соединений и полученных результатов экспериментальных исследований разрабатывались фермы из цельной древесины. 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 (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Схемы разработанных ферм

№ п/п	Геометрическая схема	Пролет, м	Шаг, м	Объем древесины, м <sup>3</sup>	Масса металла, кг
1		9	3	0,313	58,05
2		15	3	1,321	220,30
3		15	6	1,421	231,70
4		24	3	2,221	275,10
5		12	6	0,895	188,26
6		18	3	1,215	171,55
7		24	3	2,452	293,20

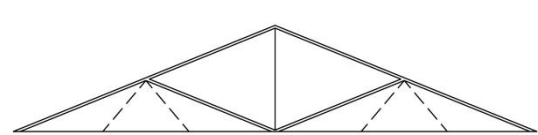
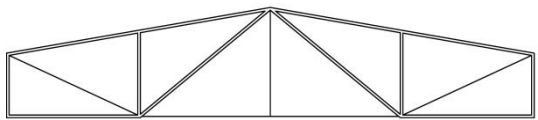
В частности, разработана цельнодеревянная ферма пролетом 15 м с шагом 3 м под расчетную нагрузку  $2,8 \text{ кН/м}^2$  (IV снеговой район), определенную по рекомендациям [121]. В конструкции узлов использовались сборно-разборные и неразборные варианты. Соединение в коньке неразборное, по рисунку 3.4, с дополнительной установкой аварийных связей. Опорный узел выполнен по рисунку 3.11. Соединение нижнего пояса с раскосами и стойкой (в середине пролета) выполнено по рисунку 3.15. Остальные соединения выполнены как комбинация решений, показанных на рисунках 3.13 – 3.15. Расчет фермы выполнялся в предположении шарнирных узлов по следующему алгоритму:

- сбор нагрузок;
- определение усилий в элементах фермы;
- подбор сечений;
- расчет узлов.

Несущая способность узловых соединений определялась по рекомендациям, изложенным в пятой главе. Расчет деформаций конструкции выполнен в программном комплексе APM Civil Engineering с учетом нормируемых физико-механических характеристик. При расчете фермы перемещения плоских стальных стержней относительно массива древесины не учитывались т.к. клеевое соединение является жестким. При величинах напряжений в поясах приближенных к расчетным значениям прогиб конструкции составил  $1/627$  пролета, а при действии нормативной нагрузки величина прогиба составила  $1/704 L$ . Такой факт показывает, что при разработке ферм с предложенными узлами высоту можно уменьшить до  $1/6$  от их расчетного пролета. Проведенный расчет показал, что в рассматриваемом варианте при действии на ферму нормативной нагрузки величина прогиба в середине пролета составила  $1/552 L$ , при этом усилия в поясах и элементах решетки незначительно увеличились (в пределах 10 – 15 %). Отметим, что возможность уменьшения расчётной высоты ферм в середине пролета обеспечивает уменьшение отапливаемого объема проектируемого здания, сокращает расход материала на устройство кровли.

Также предлагаемые соединения можно применять в деревометаллических фермах, типы которых приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Схемы деревометаллических ферм

Геометрическая схема	Пролет, м	Отношение высоты фермы к пролету	Технико- экономические показатели	
			$k_{с.в}$	$k_M$
	9 – 18	$1/5 - 1/6$	3,5 – 5,0	20 – 35
	9 – 18	$1/5 - 1/6$	3,5 – 5,0	25 – 30
	12 – 24	$1/6 - 1/7$	3,0 – 4,0	25 – 35

В качестве примера на рисунке 3.16 приведена конструкция соединения нижнего металлического пояса из двух уголков с деревянными раскосами. Фасонки, выполненные из листового металла крепятся к вертикальным полкам уголков нижнего пояса.

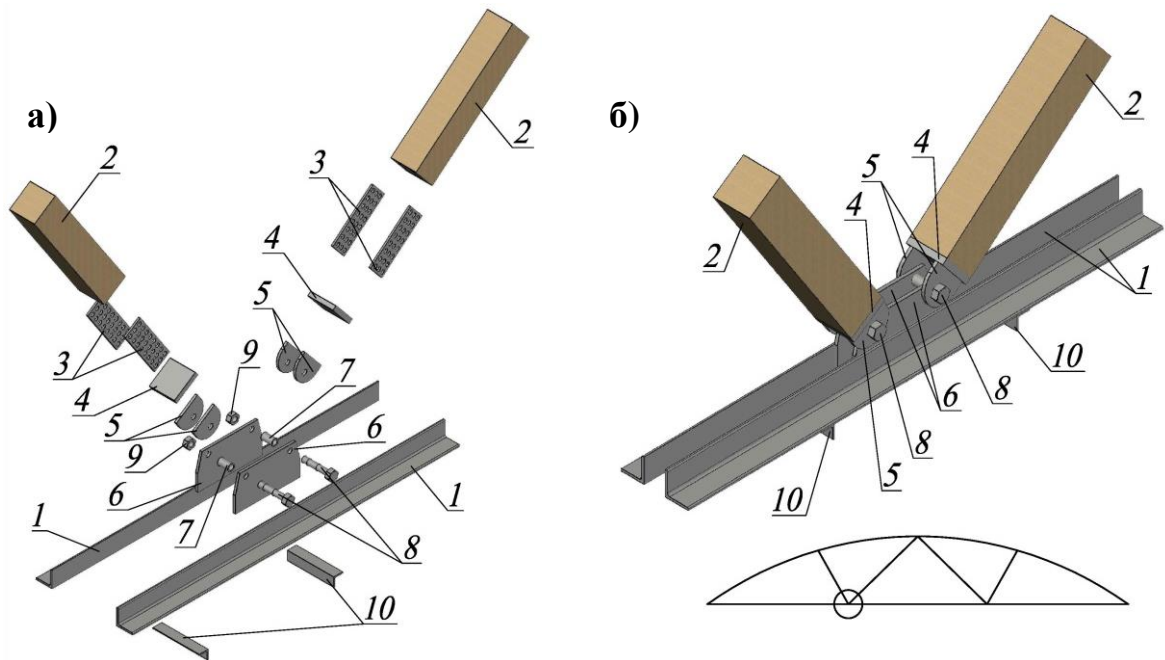


Рисунок 3.16 – Узел соединения раскосов с металлическим нижним поясом в разобранном (а) и собранном (б) виде: 1 – элемент нижнего пояса; 2 – раскос; 3 – плоский стержень; 4 – распределительная пластина; 5 – проушина; 6 – фасонка; 7 – трубка; 8 – болт; 9 – гайка; 10 – распорка

В раскосы вклеены плоские стержни, приваренные к распределительным пластинам. Также к распределительным пластинам приварены проушины. Соединение раскоса и пояса выполняется при помощи болта, который выполняет функцию оси шарнира. Трубка, вваренная между фасонками по оси отверстий, выполняет функцию распорки и может быть заполнена смазкой.

### 3.4 Алгоритмы расчета предложенных конструктивных форм

Поиск алгоритмов расчета узлов деревянных ферм с вклеенными 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.

Исследуемый тип соединения представляет из себя сложную систему, сочетающую в себе три различных материала – древесину, металл и клей. Несомненно, что несущая способность узлов зависит от таких переменных геометрических параметров как длина и ширина клеиваемого стержня, его толщина, диаметр и количество отверстий по отношению к площади стержня. Кроме этого, несмотря на многочисленные ранее проведенные исследования клеевых соединений древесины с другими материалами [39, 51], четко не определен характер адгезионного взаимодействия клеевой прослойки между древесиной и металлом. Также в результате проведенных автором численных и экспериментальных исследований (глава 2) установлено, что скалывающие напряжения в древесине по линии контакта с клеевой прослойкой распределены неравномерно как по ширине, так и по длине плоского стержня. В связи с этим точное теоретическое решение объемной задачи с учетом вышеперечисленных факторов является весьма затруднительным.

Представляется целесообразным решить поставленную задачу косвенно, через напряженно-деформационные параметры, определенные опытным путем. Такой подход позволит оценить сложное напряженно-деформированное состояние клеевого соединения древесины с металлом и достаточно точно определить несущую способность рассматриваемых типов узлов ферм.

Как известно, элементарные теории прочности рассматривают случаи равномерного распределения напряжений по ширине расчетных сечений. В нашем случае максимальные значения напряжений в стержне находятся в зоне расположения узловой фасонки и минимальные на концах стержня. В этом случае, по аналогии, например, с расчетом клеефанерных плит [40, 48], для удобства практических расчетов представляется целесообразным определить приведенное значение длины стержня для рассматриваемого варианта узла, когда фактическая эпюра неравномерного распределения напряжений по боковой

поверхности плоскости стержня будет заменена на условную эпюру при условии одинаковых значений внутренних силовых факторов. Т.е. при равномерном распределении максимальных скалывающих напряжений на приведенной длине стержня будет обеспечена та же доля участия стержня в работе узла, какую она имела при действительном неравномерном распределении напряжений на фактической длине стержня. В этом случае приведенная длина стержня будет равна его фактической длине, умноженной на коэффициент приведения  $k_{np}$ .

При таком подходе теоретический расчет предложенного типа узлов ферм должен быть построен на следующем алгоритме:

- определение вида функции распределения напряжений по ширине плоского 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.

Рассмотрим способы реализации вышеприведенного алгоритма на примере работы вклеенного плоского стержня на выдергивание под углом  $90^\circ$  по отношению к волокнам древесины.

На рисунках 2.9, 2.10 второй главы приведены эпюры распределения нормальных и касательных напряжений и получены значения для вертикальных и горизонтальных сечений плоского стержня. На основе полученных данных для рассматриваемого случая (рисунок 3.17) построим математическую модель с учетом того, что толщина плоского стального стержня значительно меньше его длины и ширины.

Как видно из данных, полученных численными и экспериментальными методами, распределение напряжений в сечении 1-1 (и в сечениях параллельных ему) близко к линейному, поэтому в математической модели принимаем, что распределение напряжений в вертикальном поперечном сечении вклеенной части стержня будет линейным.

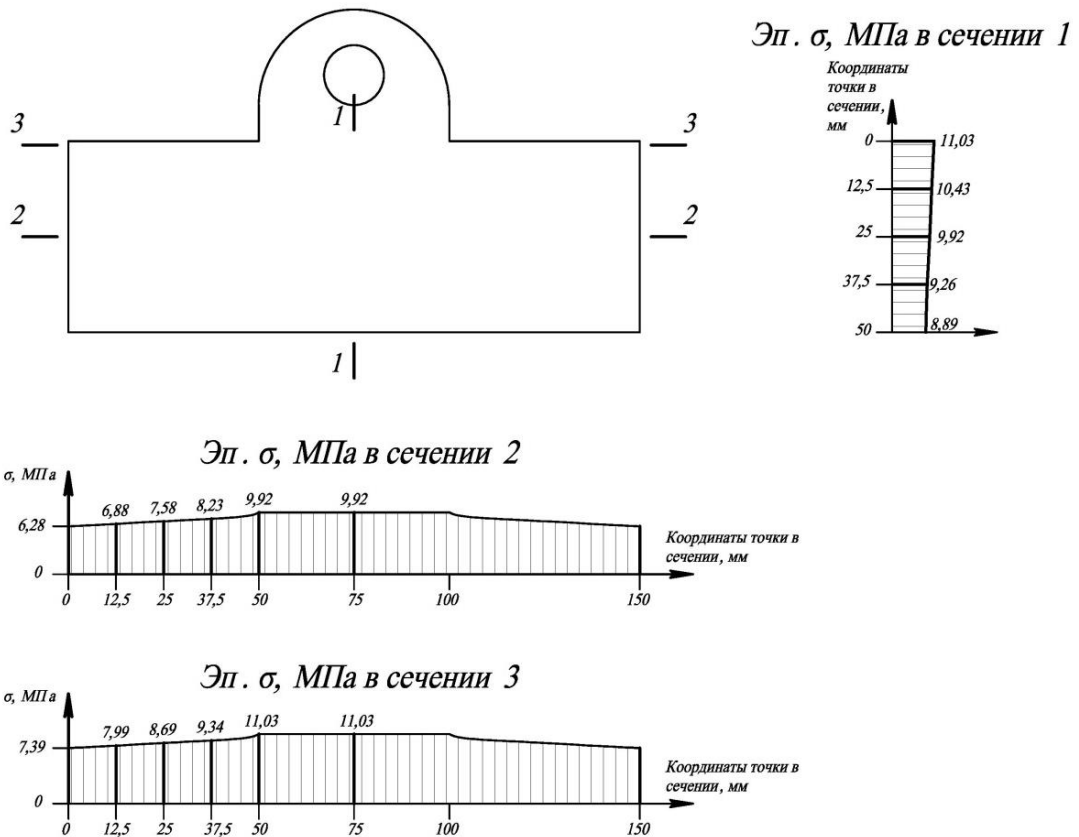


Рисунок 3.17 – Схема исследуемого стального плоского стержня и эпюры распределения напряжений по сечениям

Распределение напряжений вдоль сечений 2-2, 3-3 имеет следующий вид: в середине длины, на отрезке от 50 мм до 100 мм, значения напряжений постоянны, а слева и справа от этого отрезка величина напряжений к краям плоского стержня со снижением интенсивности убывания, асимптотически приближается к некоторой величине, т.е. закон распределения близок к экспоненциальному или гиперболическому.

Для определения коэффициентов функций распределения используем метод наименьших квадратов.

Для удобства вычислений введем систему координат: ось  $O_x$  направим по длине плоского стержня, ось  $O_y$  направим по ширине, ось  $O_z$  направим перпендикулярно поверхности плоского стержня и на ней будем откладывать значения напряжений, возникающих в точке с координатами  $(x, y)$ . Таким



образом, вклеенный плоский стержень располагается в верхней полуплоскости  $O_{xy}$ , а ось  $O_y$  проходит по оси симметрии стержня, как показано на рисунке 3.18.

### Распределение напряжений по ширине плоского стержня

Рассмотрим закон распределения напряжений вдоль оси  $O_y$ . Как уже было отмечено, закон распределения экспериментальных данных близок к линейному, поэтому распределение напряжений будем искать в виде:  $z = ky + m$ .

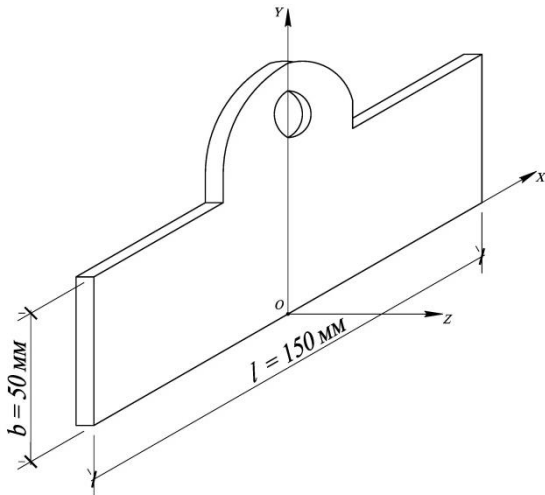


Рисунок 3.18 – Схема плоского стержня во введенной системе координат

Тогда квадратичное отклонение имеет вид:

$$S = \sum_{i=1}^n (kx_i + m - y_i)^2. \quad (3.1)$$

Условие минимизации квадратичного отклонения описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial k} = \sum_{i=1}^n 2(kx_i + m - y_i)x_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial m} = \sum_{i=1}^n 2(kx_i + m - y_i) = 0 \end{cases}; \quad (3.2)$$

или после преобразования:

$$\begin{cases} k \sum_{i=1}^n x_i^2 + m \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ k \sum_{i=1}^n x_i + mn = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases}. \quad (3.3)$$

Решая систему линейных уравнений, находим формулы для расчета коэффициентов линейного распределения напряжений вдоль оси  $O_y$ :

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}; \quad (3.4)$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2}{(\sum_{i=1}^n x_i)^2 - n \sum_{i=1}^n x_i^2}. \quad (3.5)$$

Для расчета коэффициентов и построения графика распределения напряжений была написана программа с использованием языка программирования Python. Результаты работы программы (полученные коэффициенты, погрешность, график распределения) представлены ниже:

$k = -0,04416$  (угловой коэффициент или скорость убывания);

$m = 9,894444444444444$  (начальное значение).

Погрешность составила 0,9025888989624283 %.

Для согласования с данными по сечению 3-3 полученные коэффициенты были скорректированы сдвигом вверх таким образом, чтобы прямая проходила через первую точку. Скорректированные значения:

$k = -0,04416$ ;  $m = 11,03$ .

Погрешность составила 1,0335448776065186 %.

Таким образом, распределение напряжений по ширине плоского стержня (рисунок 3.19) описывается функцией:  $\sigma = -0,04416 \cdot u + 11,03$ .

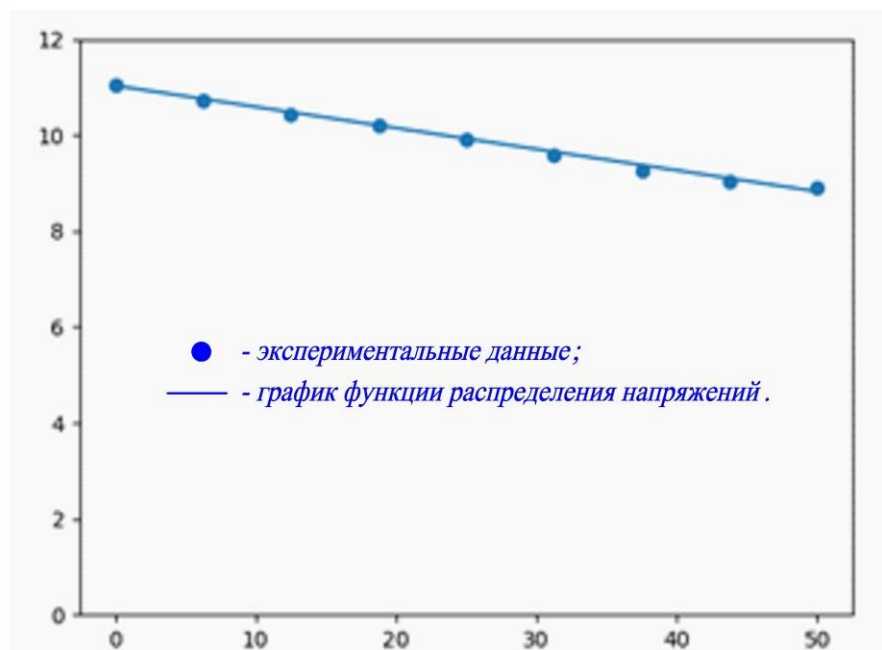


Рисунок 3.19 – Распределение напряжений по ширине плоского стержня

Для вычисления погрешности использовалась норма-максимум вектора, вычисляемая по формуле  $\|x\| = \max|x_i|$ .

### Распределение напряжений по длине плоского стержня

Закон распределения функции вдоль оси  $O_x$  представим в виде кусочной функции: на среднем интервале в виде константной, а на концах – в виде гиперболической, экспоненциальной или логарифмической.

**Гиперболическая функция.** Будем искать функцию в виде  $y = \frac{a}{x} + b$ .

Квадратичное отклонение в этом случае имеет вид:

$$S = \sum_{i=1}^n \left( \frac{a}{x_i} + b - y_i \right)^2. \quad (3.6)$$

Условие минимизации квадратичного отклонения описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2 \left( \frac{a}{x_i} + b - y_i \right) \frac{1}{x_i} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2 \left( \frac{a}{x_i} + b - y_i \right) = 0 \end{cases}; \quad (3.7)$$

или после преобразования:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2} + b \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{x_i} \\ a \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} + bn = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases}. \quad (3.8)$$

Решая систему линейных уравнений находим формулы для расчета коэффициентов линейного распределения напряжений вдоль оси  $O_y$ :

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{x_i} - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}}{n \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2} - \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \right)^2}; \quad (3.9)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{x_i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2}}{\left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \right)^2 - n \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2}}. \quad (3.10)$$

Для расчета коэффициентов и построения графика распределения была написана программа. Результаты работы программы (полученные коэффициенты, погрешность, график распределения) представлены ниже:

$a = 125,98783994731484$  (скорость убывания);

$b = 5,966860379037725$  (уровень, к которому стремятся значения напряжений на плечах).

Погрешность составила 2,3433477547760533 %.

Но при таких коэффициентах нарушалась непрерывность в точке  $x=25$  (переход от константного значения к гиперболическому), поэтому коэффициенты были скорректированы сдвигом вверх, что незначительно увеличило погрешность и увеличило расчетные значения напряжения:

$$a = 125,98783994731484; b = 5,990486402107405.$$

Погрешность составила 2,5575456067223943 %.

**Экспоненциальная функция.** Зависимость будем искать в виде:  $\sigma(x) = be^{ax}$ . Для удобства вычисления прологарифмируем выражение:  $\ln \sigma = ax + \ln b$  и введем замену:  $s = \ln \sigma$ ,  $B = \ln b$ .

Тогда квадратичное отклонение вычисляется по формуле:

$$S = \sum_{i=1}^n (ax_i + B - s_i)^2. \quad (3.11)$$

Условие минимизации квадратичного отклонения описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2(ax_i + B - s_i)x_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial B} = \sum_{i=1}^n 2(ax_i + B - s_i) = 0 \end{cases}; \quad (3.12)$$

или после преобразования:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + B \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n s_i x_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i + Bn = \sum_{i=1}^n s_i \end{cases}. \quad (3.13)$$

Решая систему линейных уравнений, находим формулы для расчета коэффициентов линейного распределения напряжений вдоль оси  $O_y$ :

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n s_i x_i - \sum_{i=1}^n s_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \quad (3.14)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n s_i x_i \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n s_i \sum_{i=1}^n x_i^2}{(\sum_{i=1}^n x_i)^2 - n \sum_{i=1}^n x_i^2}. \quad (3.15)$$

Для расчета коэффициентов и построения графика распределения была написана программа. Результаты работы программы (полученные коэффициенты, погрешность) приведены ниже:

$$a = -0,008253968; B = 2,44475313408; b = 11,527703450.$$

Погрешность составила 8,25063939 %.

**Логарифмическая.** Зависимость будем искать в виде  $\sigma(x) = a \ln x + b$ , тогда квадратичное отклонение вычисляется по формуле:

$$S = \sum_{i=1}^n (a \ln x_i + b - \sigma_i)^2. \quad (3.16)$$

Условие минимизации квадратичного отклонения описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2(a \ln x_i + b - \sigma_i) \ln x_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2(a \ln x_i + b - \sigma_i) = 0 \end{cases}; \quad (3.17)$$

или после преобразования:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n \ln^2 x_i + b \sum_{i=1}^n \ln x_i = \sum_{i=1}^n \sigma_i \ln x_i \\ a \sum_{i=1}^n \ln x_i + bn = \sum_{i=1}^n \sigma_i \end{cases}. \quad (3.18)$$

Решая систему линейных уравнений находим формулы для расчета коэффициентом линейного распределения напряжения вдоль оси  $O_y$ :

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n \sigma_i \ln x_i - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \ln x_i}{n \sum_{i=1}^n \ln^2 x_i - (\sum_{i=1}^n \ln x_i)^2}, \quad (3.19)$$

Для расчета коэффициентов и построения графика распределения была написана программа. Результаты работы программы (полученные коэффициенты, погрешность) приведены ниже:

$$a = -3,0232233; b = 19,35351655.$$

Погрешность составила 6,20350026 %.

Как видно из значений погрешностей, гиперболическая функция наиболее близко описывает полученные экспериментальные данные (рисунок 3.20).

Таким образом, распределение напряжений по длине плоского стержня описывается функцией:  $y = \frac{125,988}{x} + 5,99$ .

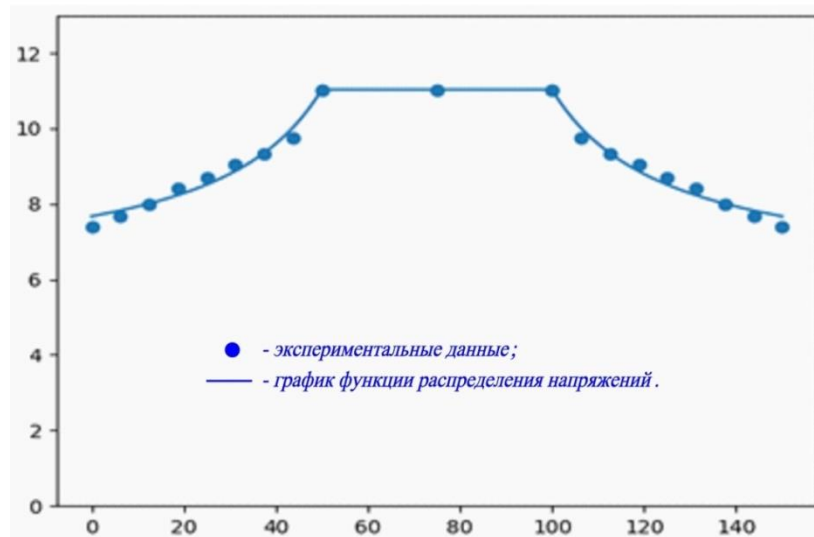


Рисунок 3.20 – Распределение напряжений по длине плоского стержня

### Распределение напряжений по поверхности стержня

Для описания распределения напряжений на всей поверхности плоского стержня принимаем, что распределение напряжений по ширине имеет линейный вид с постоянным угловым коэффициентом. Найдем общий вид функции распределения  $z = z(x, y)$  (значение напряжений в точке с координатами  $(x; y)$ ). Для этой функции верно следующее:

$$z(x, 0) = \begin{cases} z_{\max} & \text{при } |x| \leq x_1 = 25 \\ \frac{a}{x} + b & \text{при } |x| \geq x_1 = 25 \end{cases}, \quad (3.20)$$

что соответствует сечению 3-3;

$$z(x, y) = ky + m, \text{ при } |x| \leq x_1 = 25, \quad (3.21)$$

что соответствует сечению 1-1.

Тогда, для сечений параллельных сечению 1-1 функция будет иметь вид:

$$z(x, y) = ky + m', \text{ при } |x| \leq x_1 = 25.$$

Данные функции должны быть согласованы в точках  $(x, 0)$ :

$$\frac{a}{x} + b = z(x, 0) = k \cdot 0 + m'. \quad (3.22)$$

Следовательно:  $m' = \frac{a}{x} + b. \quad (3.23)$

Таким образом, функция распределения примет вид:

$$z(x, y) = \begin{cases} ky + b & \text{при } |x| \leq x_1 = 25 \\ ky + \frac{a}{x} + b & \text{при } |x| \geq x_1 = 25 \end{cases} \quad (3.24)$$

Выполнение уравнения  $\frac{a}{x_1} + b = z(x_1, 0) = k \cdot 0 + m$  обеспечивается внесенными ранее корректировками.

Поверхность распределения напряжений, полученная по результатам программной обработки, приведена на рисунках 3.21.

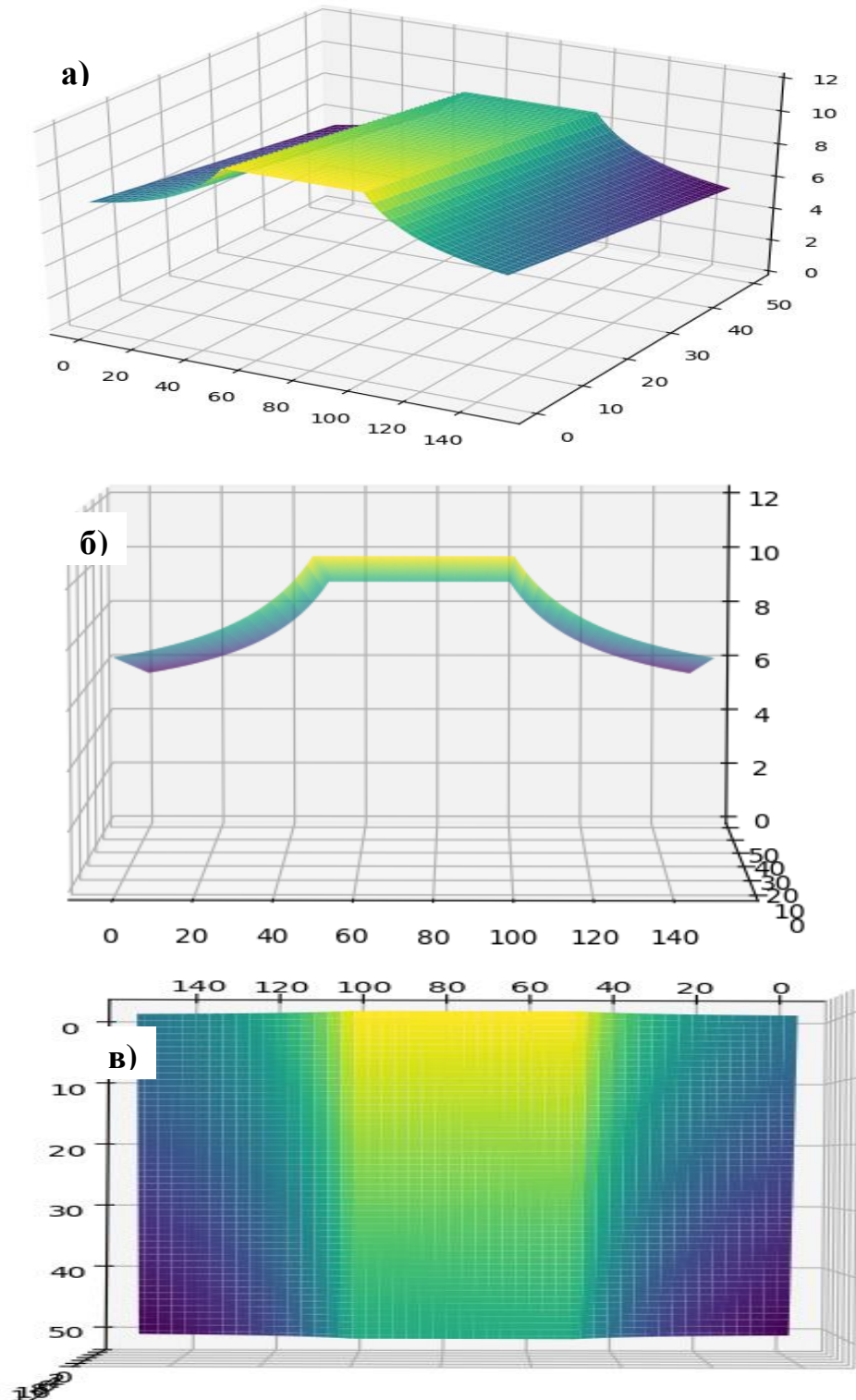


Рисунок 3.21 – Поверхности напряжений: а – изометрический вид; б – вид спереди; в – вид сверху

**Определение приведенных значений длины стержня при максимальном значении напряжений и расчетных напряжений на приведенной длине.**

Для оценки эффективности включения в работу соединительного элемента можно провести сравнение с эквивалентными напряжениями, равномерно распределенными на поверхности плоского стержня. В этом случае поверхность, образованная напряжением будет представлять некоторую прямоугольную область, лежащую в одной плоскости.

Выполним расчет площади эпюры напряжений по длине плоского стержня в сечении 3-3:

$$S = \int_{-x_{\max}}^{x_{\max}} f(x)dx = 2 \int_0^{x_{\max}} f(x)dx = 2 \left( \int_0^{x_1} z_{\max} dx + \int_{x_1}^{x_{\max}} \left( \frac{a}{x} + b \right) dx \right) \quad (3.25)$$

После интегрирования получим:  $2(z_{\max}x_1 + a \ln x_{\max} + bx_{\max} - a \ln x_1 - bx_1) =$

$$= 2 \left( \left( \frac{a}{x_1} + b \right) x_1 + a \ln \frac{x_{\max}}{x_1} + bx_{\max} - bx_1 \right) = 2 \left( a + bx_{\max} + a \ln \frac{x_{\max}}{x_1} \right) =$$

$$= 2 \cdot \left( 125,987839947 + 5,9904864021 \cdot 75 + 125,987839947 \cdot \ln \left( \frac{75}{25} \right) \right) =$$

$$= 1427,372219.$$

По данной величине рассчитаем приведенную длину стержня, если бы напряжение на отрезке равнялось максимальному 11,03:

$$x_{\text{пр}} = \frac{S}{\sigma_{\max}} = \frac{1427,372219}{11,03} = 129,4081794. \quad (3.26)$$

Выполним расчет объема эпюры напряжений на поверхности плоского стального стержня:

$$V = \iint_D z(x,y) dx dy = \int_0^{y_{\max}} dy \int_{-x_{\max}}^{x_{\max}} z(x,y) dx. \quad (3.27)$$

Функция  $\sigma(x,y)$  при фиксированном  $y$  совпадает с ранее вычисленным интегралом, только в этом случае константа  $b$  будет иметь вид  $ky+b$ , поэтому:

$$\int_{-x_{\max}}^{x_{\max}} z(x,y) dx = 2 \left( a + (ky + b)x_{\max} + a \ln \frac{x_{\max}}{x_1} \right) = \quad (3.28)$$

$$= 2 \left( kx_{\max} y + a + bx_{\max} + a \ln \frac{x_{\max}}{x_1} \right);$$



$$\begin{aligned}
V &= \iint_D z(x,y) dx dy = \int_0^{y_{\max}} dy \int_{-x_{\max}}^{x_{\max}} z(x,y) dx = \\
&= \int_0^{y_{\max}} 2 \left( kx_{\max} y + a + bx_{\max} + a \ln \frac{x_{\max}}{x_1} \right) dy = \\
&= k x_{\max} y_{\max}^2 + 2y_{\max} \left( a + bx_{\max} + a \ln \frac{x_{\max}}{x_1} \right) = \\
&= 2ay_{\max} \left( 1 + \ln \frac{x_{\max}}{x_1} \right) + 2bx_{\max}y_{\max} + kx_{\max}y_{\max}^2 = \\
&= 2 \cdot 125,987839947 \cdot 50 \cdot \left( 1 + \ln \frac{75}{25} \right) + 2 \cdot 5,9904864021 \cdot 75 \cdot 50 - 0,04416 \cdot 75 \cdot 50^2 = \\
&= 63088,61093.
\end{aligned}$$

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

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{V}{x_{\text{пр}} \cdot y_{\max}} = \frac{63088,61093}{129,4081794 \cdot 50} = 9,750328181. \quad (3.29)$$

### Определение величины коэффициента приведения.

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:

$$k_{\text{пр.1}} = \frac{x_{\text{пр}}}{l_{\text{ст}}} = \frac{129,41}{150} = 0,86. \quad (3.30)$$

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 как отношение расчетного сопротивления  $\sigma_{\text{расч}}$  к максимальному  $\sigma_{\text{max}}$ :

$$k_{\text{пр.2}} = \frac{\sigma_{\text{расч}}}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{9,75}{11,03} = 0,88. \quad (3.31)$$

Таким образом, переход к равномерно-распределенной эпюре распределения скальвающих напряжений по площади стержня, эквивалентной фактической неравномерно-распределенной эпюре как по длине, так и по ширине стержня

можно осуществить при помощи общего коэффициента приведения  $k_{пр}$ , который определим как:

$$k_{пр} = k_{пр.1} \cdot k_{пр.2} = 0,86 \cdot 0,88 = 0,75 . \quad (3.32)$$

Тогда при расчете несущей способности узла ферм должна быть учтена приведенная длина вклеенного плоского стержня:

$$l_{пр} = l_{ст} \cdot k_{пр} = 150 \cdot 0,75 = 112,5 \text{ мм} , \quad (3.33)$$

при этом значение ширины стержня  $b$  остается неизменным.

Далее определить несущую способность узла становится возможным по стандартным формулам элементарной теории прочности с учетом фактических параметров вклеенного плоского стержня, таких как его длина и ширина. Однако, как показали численные исследования, вид функций распределения скальвающих напряжений как по длине, так и по ширине стержня может изменяться в зависимости от фактического соотношения длины стержня к длине узловой фасонки, а также в зависимости от толщины вклеиваемого стержня. В этом случае потребуется подбор новых функциональных зависимостей.

В любом случае, как видно из рассмотренного примера, для теоретического расчета напряжений, возникающих в соединительном элементе, с заданными параметрами, требуется громоздкий математический аппарат. Изменение параметров плоского стержня требует внесения изменений в расчетные функции. Такой подход, для практических целей, является трудоемким и потому нецелесообразным. В связи с этим практические расчеты предлагается выполнять численными способами при помощи программных комплексов, основанных на методе конечных элементов, или приближенными методами, основанными на вышеприведенном алгоритме.

Тогда при инженерном расчете расчетная несущая способность узла фермы на вклеенных плоских стальных стержнях  $T$  для рассматриваемого примера может быть определена как:

$$T = 2 \cdot R_{ск}^{90} \cdot b \cdot l \cdot k_t \cdot k_{пр} \cdot n , \quad (3.34)$$

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

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

$b$  – ширина клеиваемого стержня, м;

$l$  – длина клеенной части стержня, м;

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

$k_{np}$  – 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.

Несомненно, что при расчете узлов ферм, в которых усилие, передаваемое на клеенный стержень, направлено под другим углом по отношению к волокнам древесины, необходимо в формулу (3.34) вводить соответствующее расчётное сопротивление древесины скалыванию под этим углом, определяемое по СП 64.13330.2017 [124].

### 3.5 Выводы по третьей главе

1. Разработаны новые конструктивные решения деревянных ферм с узловыми соединениями на стальных клеенных плоских стержнях для пролетов 9 – 18 м при их шаге в покрытии от 3,0 до 6,0 м.

2. За счет жесткости узловых соединений расчетная высота ферм в середине пролета может быть уменьшена до  $1/6 L$  вместо рекомендуемой высоты в  $1/5$  от её пролета.

3. Определены теоретические функции распределения скалывающих напряжений по площади стержня, позволяющие учесть характер их неравномерного распределения, как по длине, так и по ширине клеенного элемента.

4. Предложен общий вид расчетной формулы, позволяющие определять несущую способность предложенного типа узлов ферм с учетом их фактического напряженно-деформированного состояния в инженерных расчетах.

## **4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЗЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ С УЗЛАМИ НА СТАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЯХ**

### **4.1 Цель и задачи исследований**

Экспериментальные исследования выполнены с целью изучения фактической работы предлагаемых конструкций деревянных ферм и их узлов, определения степени точности результатов численных исследований, обоснования предложенной методики расчета. Программа испытаний предусматривала кратковременные и длительные нагружения опытных образцов.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- исследовать напряженно-деформированное состояние конструкций и узлов;
- исследовать напряженно-деформированное состояние плоских стальных стержней, работающих в составе узлов;
- определить действительную несущую способность и деформативность конструкций и узлов, выявить места и характер разрушения;
- определить сходимость результатов экспериментальных и теоретических исследований для установления пригодности использования программных комплексов и предложенной методики расчета;
- проверить эксплуатационную надежность предлагаемых ферм при действии длительных нагрузок.

### **4.2 Методика испытания**

Для оценки фактического напряженно-деформированного состояния и несущей способности соединений предложенного типа при работе в реальных узлах выполнены кратковременные испытания модели опорного узла треугольной фермы и опытной конструкции фермы пролетом 4,5 м [66]. Также, для исследования длительной прочности и деформативности соединений на

вклеенных стальных плоских стержнях, были проведены длительные испытания опытной конструкции фермы пролетом 4,5 м [67].

#### 4.2.1 Опытная конструкция опорного узла фермы

Испытание опорного узла треугольной фермы с применением вклеенных плоских стержней проводилось на треугольном образце, включающем в себя фактически два параллельно работающих узла (рисунок 4.1). Это исследование позволило определить фактическое напряженно-деформированное состояние вклеенных плоских стержней, работающих в составе опорного узла. Расчетная нагрузка  $N=58$  кН была определена из условия несущей способности вклеенных стержней по методике, изложенной в главе 3, раздел 3.4.

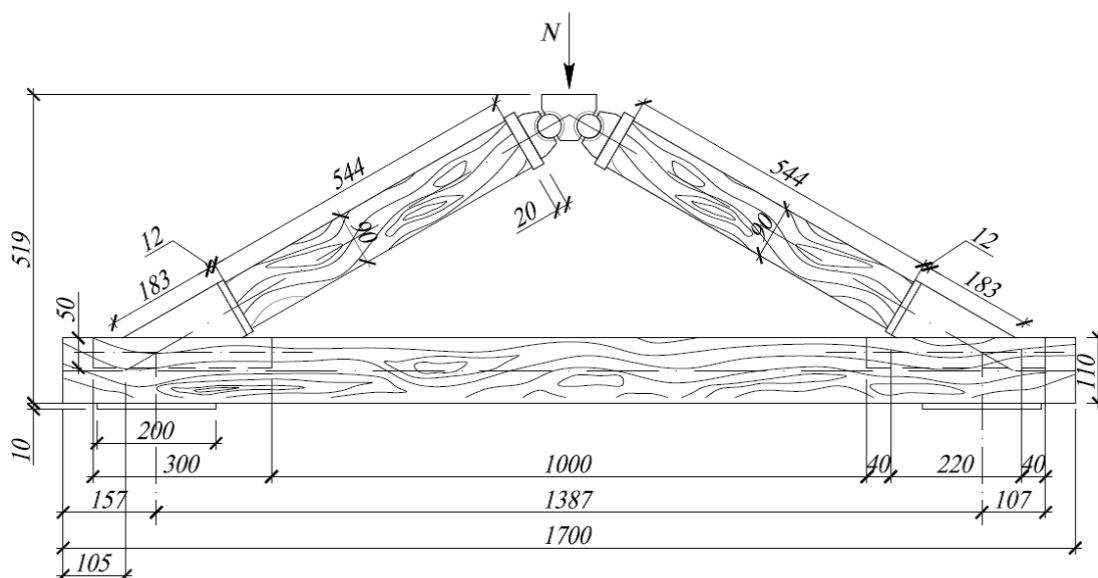


Рисунок 4.1 – Общий вид образца

Опытный образец для испытаний представляет собой треугольную конструкцию, с углом наклона верхних элементов  $30^\circ$  к нижнему поясу. Центрация опорного узла выполнена по продольной оси вклеенной части плоского стержня. Материал поясов – сосна 2-го сорта. Нижний пояс выполнен из бруса сечением  $110 \times 90$  мм общей длиной 1700 мм. На расстоянии 50 мм от каждого торца бруса нижнего пояса выполнено по два продольных глухих паза шириной 10 мм и длиной 300 мм на глубину 50 мм. Расстояние между пазами в осях составляет 50 мм. Верхние элементы выполнены из бруса сечением

90×90 мм общей длиной 540 мм каждый. В одном из торцов каждого бруса верхнего пояса выполнены цилиндрические углубления по 30 мм для центрации на опорах. Было изготовлено и испытано два аналогичных образца (четыре опорных узла).

Стальные опорные части представляют собой жесткую конструкцию, которую образуют плоские стальные стержни, вертикальные фасонки, опорные площадки, распорки, шканты (рисунок 4.2).

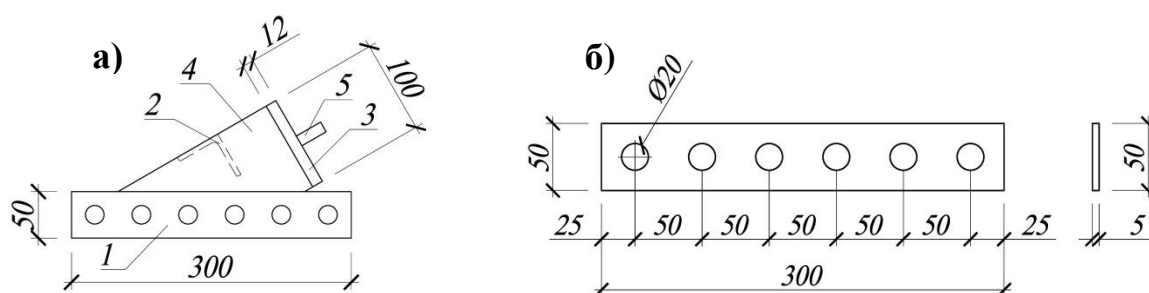


Рисунок 4.2 – Конструкция стальной опорной части (а) и схема расположения отверстий во вклеиваемой части плоского стержня (б): 1 – вклеиваемый стальной плоский стержень; 4 – распорка; 3 – опорная площадка; 4 – фасонка; 5 – шкант

Плоские стальные стержни выполнены из полосы стальной горячекатаной (сортамент по ГОСТ 103-76) и представляют собой пластины с размерами 300×50×5 мм с выполненными равномерно по всей длине отверстиями диаметром 20 мм. Шаг отверстий принят из условия возможности размещения и изоляции на плоском стержне тензорезисторов с базой 12 мм (общая длина тензорезистора 20 мм). Схема плоских стержней с расположением на них отверстий представлена на рисунке 4.2 (б).

Вертикальные фасонки выполнены из толстолистовой горячекатаной стали (сортамент по ГОСТ 19903-2015) толщиной 8 мм и обеспечивают своей формой угол наклона 30°. Опорные площадки выполнены из стали толщиной 12 мм и представляют собой квадратные пластины с размерами 100×100×12 мм с отверстием диаметром 10 мм в центре. Шканты выполнены из стального прутка и представляют собой круглый стержень общей длиной 55 мм диаметром 12 мм

на длине 30 мм с переходом на участок диаметром 10 мм и длиной 25 мм, на котором выполнена резьба М10. В каждой из опор два стальных плоских стержня соединены с двумя подкосами сваркой по длине, далее к торцам подкосов приварена опорная площадка. Для обеспечения равномерного расстояния между осями плоских стержней между подкосами вварена распорка. Распорки выполнены из равнополочного стального уголка 50×5 мм (ГОСТ 8509-93) длиной 42 мм. В отверстие опорной площадки установлен и прикручен шкантик. Также были приварены упорные стальные планки для возможности установки измерительных приборов. Этапы сборки стальной опорной части показаны на рисунке 4.3.

Коньковый узел решен в виде оправки с двумя канавками полукруглого очертания в которые установлены цилиндрические стержни, помещающиеся также и в ответные оправки с аналогичными канавками (рисунок 4.4). Такое конструктивное решение обеспечивало идеальный шарнир в коньковом узле и, соответственно, равномерность распределения прилагаемого усилия между двумя исследуемыми параллельно работающими опорными узлами.

На каждом торце обеих стержней выполнены буртики для исключения возможности смещения системы конькового двухшарнирного узла. К ответным оправкам также присоединены распределительные стальные пластины с размерами 100×100×20 мм.

Стальные опорные конструкции в собранном виде подготавливали к наклейке тензорезисторов с учетом рекомендаций [72, 109]. Подготовка заключалась в удалении окалины и брызг от сварки с поверхности плоских стержней, зачистки наждачной бумагой мест наклейки, а также в обезжиривании при помощи ацетона или растворителя. На подготовленные места наклеивались тензорезисторы пленочного типа ПКС-12-200 с константовыми проводниками. Для снятия показаний применена тензосистема ММТС-64, изготовленная в Сибирском научно-исследовательском институте авиации им. С.А. Чаплыгина. Станция позволяет применять датчики и аппаратуру при тензометрировании как древесины, так и стали, при условии их приклейки клеем «Циакрин».



Рисунок 4.3 – Этапы сборки стальной опорной части: а – часть комплекта деталей опорных башмаков; б – подкосы, приваренные к плоским стержням; в – сверление отверстий; г – сваренная конструкция; д – наклейка и распайка тензорезисторов; е – защита и прозванивание тензорезисторов

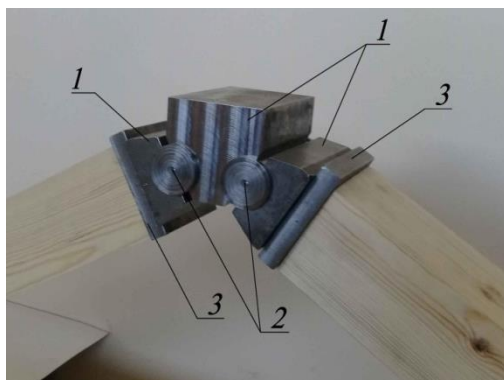


Рисунок 4.4 – Конструкция конькового узла: 1 – оправка; 2 – цилиндрические стержни; 3 – распределительные пластины



К датчикам припаивали провода малого сечения во фторопластовой изоляции, места пайки защищались от замыкания. После наклейки на все тензорезисторы наносили защитный слой парафина для обеспечения адекватности работы датчиков в среде клеевого шва. Общий вид стальной опоры и схемы расстановки тензорезисторов показаны на рисунке 4.5.

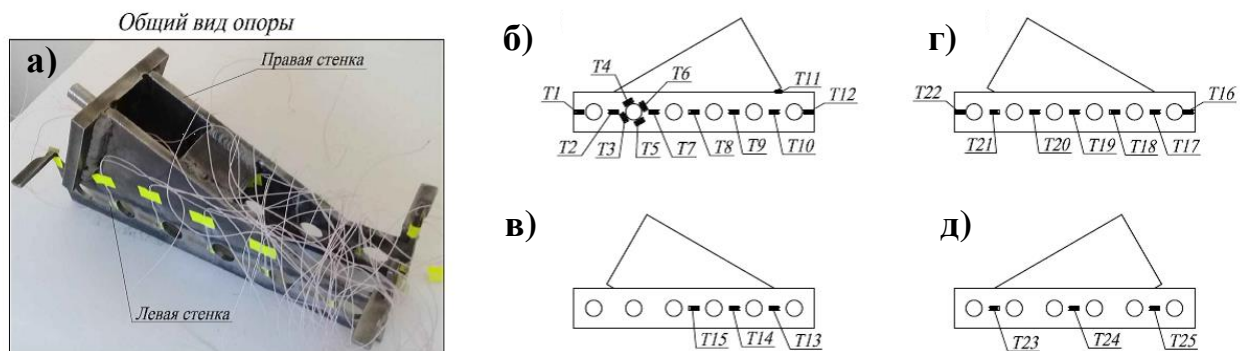


Рисунок 4.5 – Общий вид опоры и схемы расстановки тензорезисторов: а – опорный башмак; б – правая стенка наружная сторона; в – правая стенка внутренняя сторона; г – левая стенка наружная сторона; д – левая стенка внутренняя сторона

Установка в пазы плоских стальных стержней в проектное положение осуществлялась при помощи деревянных щепок, которые распирают и фиксируют их в пазе. После установки в зазоры пазов заливалась эпоксидная клеевая композиция марки ЭД-20 без наполнителя. После выдержки клеевого компаунда выполнялась проверка и разводка тензорезисторов. К выводам из пазов подпаивались провода, места пайки изолировались, парные провода разводились в клеммные колодки. Сборка образца выполнялась в следующей последовательности: в опорных зонах на нижние грани бруса нижнего пояса крепили стальные пластины размером  $200 \times 100 \times 12$  мм, к одному из торцов каждого бруса верхнего пояса крепили распределительные пластины, далее брусья устанавливали на опорные конструкции с центрацией углублений на шкантах, затем выполнялась сборка конькового узла.

После сборки образца устанавливали механические приборы. Процесс изготовления и сборки опытного образца показан на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6– Этапы сборки образца для испытания опорного узла фермы: а – выполнение пазов в нижнем поясе; б – комплект деревянных деталей; в – установка опорных башмаков; г – процесс вклеивания; д – нижний пояс с опорными башмаками; е – элементы шарнира конькового узла; ж – натурный образец в сборе; з – общий вид образца с приборами

Схема расстановки механических приборов представлена на рисунке 4.7.

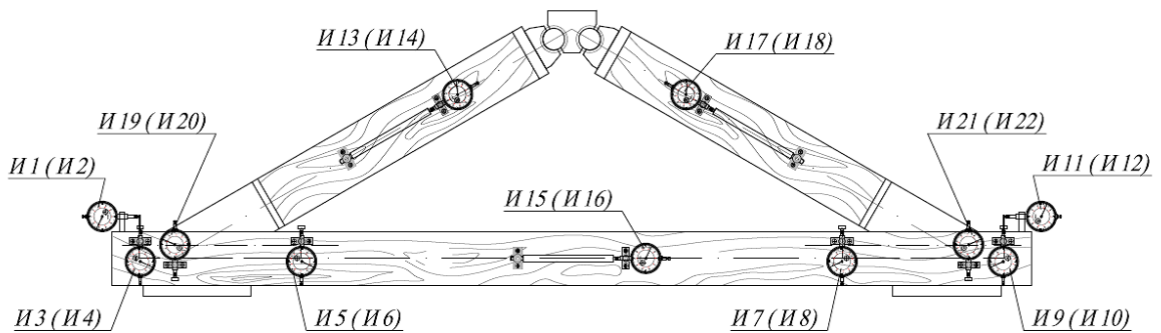


Рисунок 4.7 – Схема расстановки механических приборов (в скобках марки приборов, установленных с противоположной стороны)

В опорных зонах устанавливали индикаторы часового типа на верхней грани бруса нижнего пояса для измерения продольного перемещения плоских стержней (И1, И2, И11, И12 с ценой деления 0,001 мм). На боковых гранях бруса нижнего пояса размещали индикаторы часового типа вблизи обоих концов плоских стержней для фиксации и измерения их вращения (И3, И4, И5, И6, И7, И8, И9, И10 с ценой деления 0,001 мм). В середине бруса нижнего пояса по серединам боковых граней устанавливали системы для измерения относительных деформаций (И15, И16 с ценой деления 0,001 мм). На боковые грани брусков верхнего пояса также размещали индикаторы для измерения относительных деформаций для контроля равномерности передачи нагрузки на элементы (И13, И14, И17, И18 с ценой деления 0,001 мм). По оси опор были установлены индикаторы часового типа для измерения осадков опор относительно испытательного стенда (И19, И20, И21, И22 с ценой деления 0,01 мм). Провода от тензостанции разводились в клеммные колодки.

Испытание натурального образца проводили в лабораторном стенде, представляющем собой жесткую замкнутую раму. Образец был установлен на шарнирно-подвижной и шарнирно-неподвижной опорах. Нагружение осуществляли при помощи гидравлического домкрата с максимальным усилием до 50 т. Домкрат устанавливался на оправку конькового узла с центрацией. На

домкрат был установлен динамометр с индикатором часового типа (цена деления 0,01 мм). Для контроля нагрузки использовались таблицы, составленные при тарировании динамометра на испытательной машине ИР 5082-100.

Нагрузка от домкрата через оправку передавалась на брусья верхнего пояса, затем на упорные площадки опор, далее на подкосы, затем на плоские вклеенные стержни и от них через клеевую прослойку передавалась на брус нижнего пояса. Подготовленный образец для испытаний показан на рисунке 4.8.



Рисунок 4.8 – Образец, подготовленный к испытанию

Чтобы определиться с лучшим вариантом установки опор, конструкцию подвергали кратковременной нагрузке (до расчетного значения). В первом варианте центрация узла выполнялась по оси нижнего пояса, во втором – по оси плоского стержня.

Подготовка и проведение испытания выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 33082-2014 «Конструкции деревянные. Методы определения несущей способности узловых соединений» [28]. Испытываемое соединение по виду зависимости упругой деформации от прилагаемой нагрузки в диапазоне расчетной несущей способности относится к I группе.

Нагружение проводилось ступенями по 0,08-0,10 от величины разрушающей нагрузки с выдержкой 15 минут на каждой ступени. Во время выдержки и перед нагружением снимались показания с приборов. При достижении нагрузки  $1,5 N_{расч}$  приборы снимались с образца из соображений их сохранности.

На каждом из испытываемых образце было установлено 18 индикаторов с ценой деления 0,001 мм, четыре индикатора с ценой деления 0,01 мм, 25 тензорезисторов типа ПКС-12-200.

#### **4.2.2 Опытная конструкция фермы пролетом 4,5 м**

Натурная модель представляет собой треугольную ферму с углом наклона элементов верхнего пояса  $30^\circ$  к нижнему поясу (рисунок 4.9). Материал поясов – сосна 2-го сорта. Нижний пояс выполнен из бруса сечением  $140 \times 90$  мм и состоит из трех частей длиной 1500 мм каждая. В опорных узлах фермы для вклейки плоских стержней на расстоянии 50 мм от каждого торца нижнего пояса выполнено по два продольных глухих паза шириной 10 мм и длиной 300 мм на глубину 50 мм. Расстояние между пазами в осях составляет 50 мм.

Элементы верхнего пояса выполнены из бруса сечением  $90 \times 90$  мм общей длиной в осях 2520 мм каждый. В элементах верхнего пояса также выбраны глухие пазы в местах примыкания раскосов на глубину 40 мм.

Конструкция стальных элементы опорных узлов аналогична конструкции, показанной на рисунке 4.2. В ее состав входят клеиваемые плоские стержни, вертикальные фасонки, упорная плита, распорки для обеспечения совместности работы двух фасонки. Вклеиваемые стержни выполнены из стальной полосы размером  $300 \times 50 \times 5$  мм с отверстиями диаметром 20 мм.

Вертикальные фасонки выполнены из листовой стали толщиной 8 мм и обеспечивают своей формой угол наклона верхнего пояса к нижнему  $30^\circ$ . Упорная плита представляет собой пластину с размерами  $80 \times 80 \times 12$  мм.

Коньковый узел фермы решен в виде фланцевого соединения. В обоих элементах верхнего пояса, по торцам, сходящимся в коньке, в верхней и нижней

гранях выполнены полуглухие пазы на длину 200 мм. В пазы вклеены плоские стержни, к торцам которых приварены пластины толщиной 10 мм. В пластинах выполнены отверстия для установки болтов. Для вклеивания плоских стержней в массив древесины использован клей на базе эпоксидной смолы ЭД-20 с отвердителем ПЭПА.

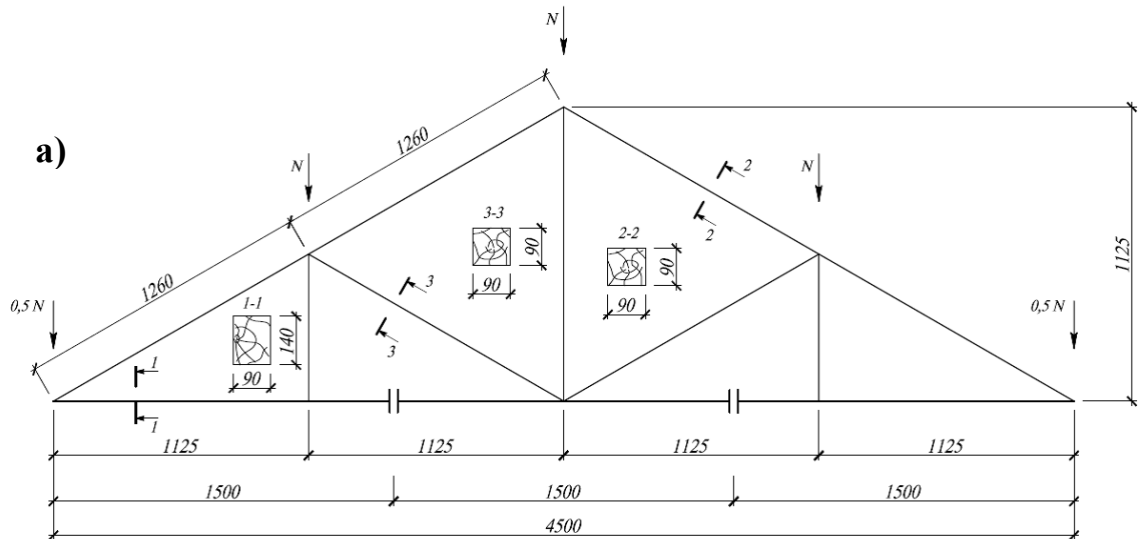


Рисунок 4.9 – Геометрическая схема опытной конструкции и схема её загрузки (а) и общий вид фермы, подготовленной к испытанию (б)

Промежуточные узлы фермы также были решены при помощи вклеенных стальных плоских стержней с упором подкосов в распределительные пластины.

Конструкции всех узлов фермы показаны на рисунке 4.10.

Для получения четкой картины работы опытной конструкции под нагрузкой при проведении испытаний измеряли основные деформации системы:

– прогиб фермы в середине и третях пролета;

- осадки опор;
- смещения вклеенных плоских стержней относительно древесины (выдергивание-вдавливание);
- величину сдвига вклеенных плоских стержней в опорном сечении относительно древесины бруса нижнего пояса.

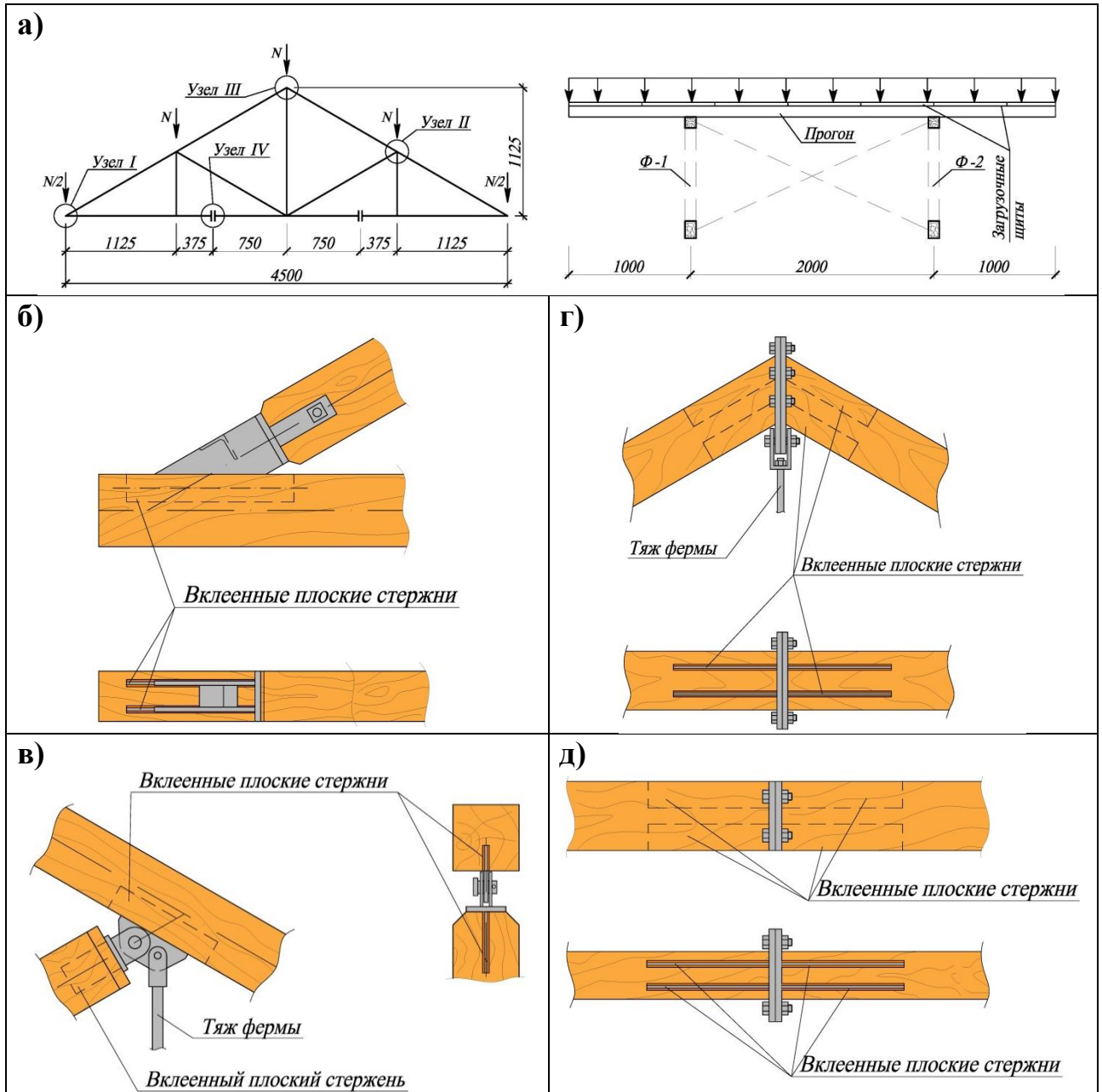


Рисунок 4.10 – Схемы опытной конструкции фермы: а – геометрическая схема опытной конструкции и её загрузки; б – узел 1; в – узел 2; г – узел 3; д – узел 4

Для измерения вышеперечисленных величин в опорных зонах

устанавливались индикаторы часового типа на верхней грани бруса нижнего пояса для измерения продольного перемещения плоских стержней (с ценой деления 0,001 мм). На боковых гранях бруса нижнего пояса устанавливались индикаторы часового типа (с ценой деления 0,001 мм) вблизи обоих концов плоских стержней для измерения их перемещения в вертикальной плоскости. В середине и третях пролета бруса нижнего пояса по серединам всех четырех граней наклеивались тензорезисторы для контроля равномерности передачи нагрузки на деревянные элементы. По аналогии тензорезисторы наклеивали и на панели верхнего пояса. По оси опор были установлены индикаторы часового типа для измерения осадок опор (с ценой деления 0,01 мм). Для измерения прогибов фермы в середине и третях нижнего пояса были установлены прогибомеры (П1, П2, П3 с ценой деления 0,01 мм), закрепленные на независимых опорах.

Для пространственной жесткости испытываемой конструкции, удобства нагружения и максимального приближения к реальным эксплуатационным условиям испытательная система состояла из двух аналогичных независимо установленных ферм, которые раскреплялись по верхнему поясу деревянными прогонами сечением 90×90 мм (рисунок 4.9, а). Поверх прогонов были закреплены распределительные щиты. Нагружение осуществлялось при помощи тарированных грузов массой 50 Н, укладываемых поверх щитов. Нагрузка распределялась равномерно по поверхности щитов и передавалась через прогоны в узлы фермы. Испытания проведены в соответствии с рекомендациями, изложенными в [98]. Нагружение осуществлялось ступенями по 0,2 от расчетной нагрузки с выдержкой на каждой ступени испытания. Испытания проводили до нагрузки, в 1,5 раза превышающей её расчетное значение (2,7 кН/м<sup>2</sup>). После проведения кратковременных испытаний и соответствующего отдыха опытная ферма была поставлена на длительные испытания. Схема опытной фермы с размещенными на ней приборами и общий вид фермы показаны на рисунке 4.11.



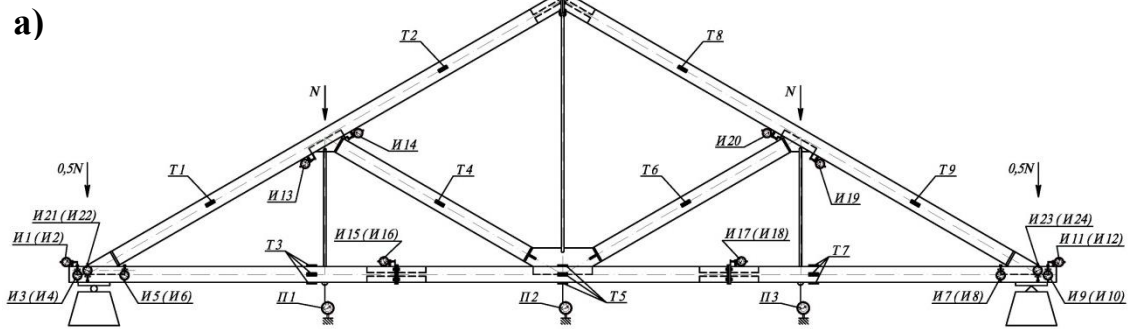


Рисунок 4.11 – Схема фермы с расстановкой измерительных приборов (а) и общий вид конструкции в процессе пробного испытания (б)

После монтажа ферм в проектное положение на них устанавливали приборы. На базовой ферме Ф-1 в узлах устанавливали индикаторы часового типа для измерения продольного и поперечного перемещений плоских стержней относительно массива древесины (с ценой деления 0,001 мм). По оси опор были установлены индикаторы часового типа для измерения осадок опор (с ценой деления 0,01 мм). Для измерения прогибов и отклонений от вертикали фермы в середине и третях нижнего пояса были установлены прогибомеры (с ценой деления 0,01 мм). На вспомогательной ферме Ф-2 контролировали ее отклонения от вертикали, прогибы в середине и третях пролета, осадки опор. Отклонение от вертикали испытываемых ферм контролировали при помощи прогибомеров

(П-4, П-5), которые измеряли горизонтальные смещения нижних поясов в середине пролета ферм. Всего на исследуемой конструкции Ф-1 было установлено 62 тензодатчика, четыре прогибомера, 20 индикаторов с ценой деления 0,001 мм и четыре индикатора с ценой деления 0,01 мм. На вспомогательной ферме Ф-2 было установлено четыре прогибомера и четыре индикатора с ценой деления 0,01 мм.

### **4.2.3 Длительные испытания фермы пролетом 4,5 м**

Для определения эксплуатационной надежности разработанного варианта фермы с соединениями элементов на клеенных плоских стержнях проведены длительные испытания двух опытных параллельно работающих конструкции пролетом 4,5 м (рисунок 4.9, 4.10). Для испытаний были использованы фермы (основная и вспомогательная), ранее испытанные кратковременной нагрузкой. Интервал времени между кратковременными и длительными испытаниями составил десять дней.

В лаборатории, где проводились длительные испытания, постоянно проводили запись температуры и влажности воздуха по термометру и психрометру в продолжение всего эксперимента. Для выравнивания влажности древесины конструкции, натурные фермы в течение полугода были выдержаны в помещении лаборатории (до проведения кратковременных испытаний).

Нагружение осуществлялось при помощи тарированных грузов массой 50 Н (силикатный кирпич), укладываемых поверх щитов. Нагрузка распределялась равномерно по поверхности щитов и передавалась через прогоны в узлы ферм. Общий вид испытательного стенда и загрузки опытных конструкций показан на рисунке 4.12.

Длительные испытания проведены в соответствии с рекомендациями ЦНИИСК по испытанию деревянных конструкций при действии на исследуемую конструкцию расчетной нагрузки, что обеспечивало более жесткие условия испытания в сравнении с нормативной нагрузкой, равной 2,0 кН/м<sup>2</sup>. По аналогии

с кратковременными испытаниями, нагружение до расчётной нагрузки  $2,7 \text{ кН/м}^2$ , осуществлялось ступенями по  $0,2$  от расчетной нагрузки с выдержкой 15 минут на каждой ступени. Испытания были начаты 27 ноября 2019 года и закончены 24 февраля 2020 года.



Рисунок 4.12 – Общий вид испытательного стенда (а) и загрузки опытных конструкций (б)

Все узловые соединения фермы были рассчитаны по методике, изложенной в третьей главе, раздел 3.4. Для исследования работы именно вклеенных стальных стержней поперечные сечения деревянных поясов и раскосов были определены из условия обеспечения их прочности и устойчивости с запасом 20-30 %.

### 4.3 Анализ результатов кратковременных испытаний

Для объективной оценки результатов испытаний было проведено определение фактических физико-механических характеристик примененной древесины при помощи испытания стандартных образцов. При проведении испытаний определяли прочность древесины на сжатие вдоль волокон, на сжатие поперек волокон и на изгиб (рисунок 4.13).

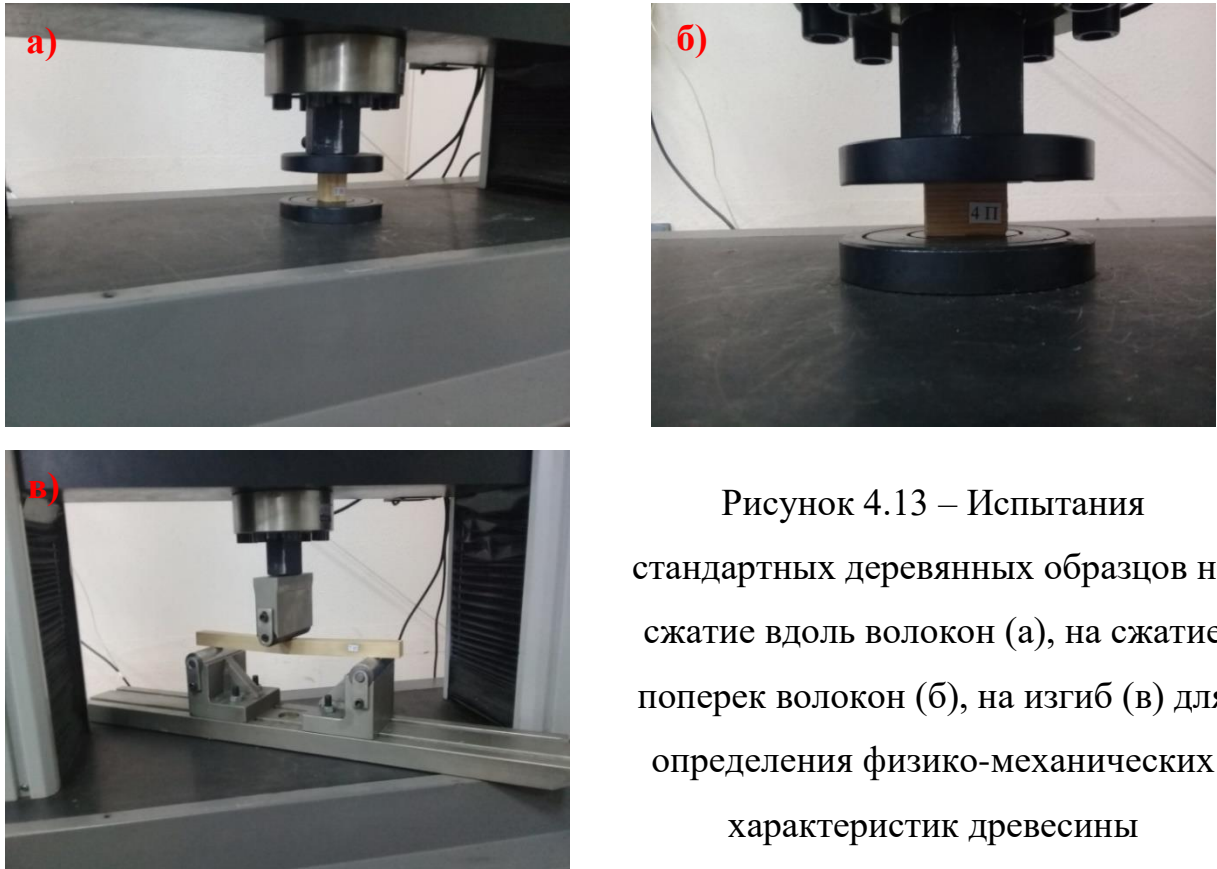


Рисунок 4.13 – Испытания стандартных деревянных образцов на сжатие вдоль волокон (а), на сжатие поперек волокон (б), на изгиб (в) для определения физико-механических характеристик древесины

Проведенные испытания деревянных стандартных образцов показали значения определяемых характеристик близкими к значениям, приведенным в [124] (отклонения в большую и меньшую сторону находились в интервале  $\pm 8\%$ ). Поэтому, в дальнейшем, в расчет вводили табличные значения расчетных характеристик древесины сосны второго сорта:

- модуль упругости вдоль волокон – 10 000 МПа;
- модуль упругости поперек волокон – 400 МПа;
- коэффициент Пуассона поперек волокон – 0,45;
- коэффициент Пуассона вдоль волокон – 0,018;

– модуль сдвига вдоль и поперек волокон – 500 МПа.

Также, при проведении испытаний соответствие фактического модуля упругости древесины нормативному значению было подтверждено его определением по относительной деформации древесины в поясах конструкций. Расхождение полученных значений с нормативными не превышало 4 %.

Физико-механические свойства стали Ст3пс приняты по данным сертификата поставки. Предел текучести составил 282 МПа, временное сопротивление – 400 МПа.

### 4.3.1 Результаты испытаний опорного узла фермы

Перемещение вдоль оси нижнего пояса каждого из двух плоских стержней в одной опоре происходило пропорционально увеличению нагрузки с характером, близким к линейному, при этом величины перемещений по всех четырех контролируемых узлах (в двух экспериментальных образцах) практически совпадали (разница в показаниях индикаторов не превышала 4 %). Характерные графики продольного перемещения конструкций опор относительно продольной оси нижнего пояса показаны на рисунке 4.14.

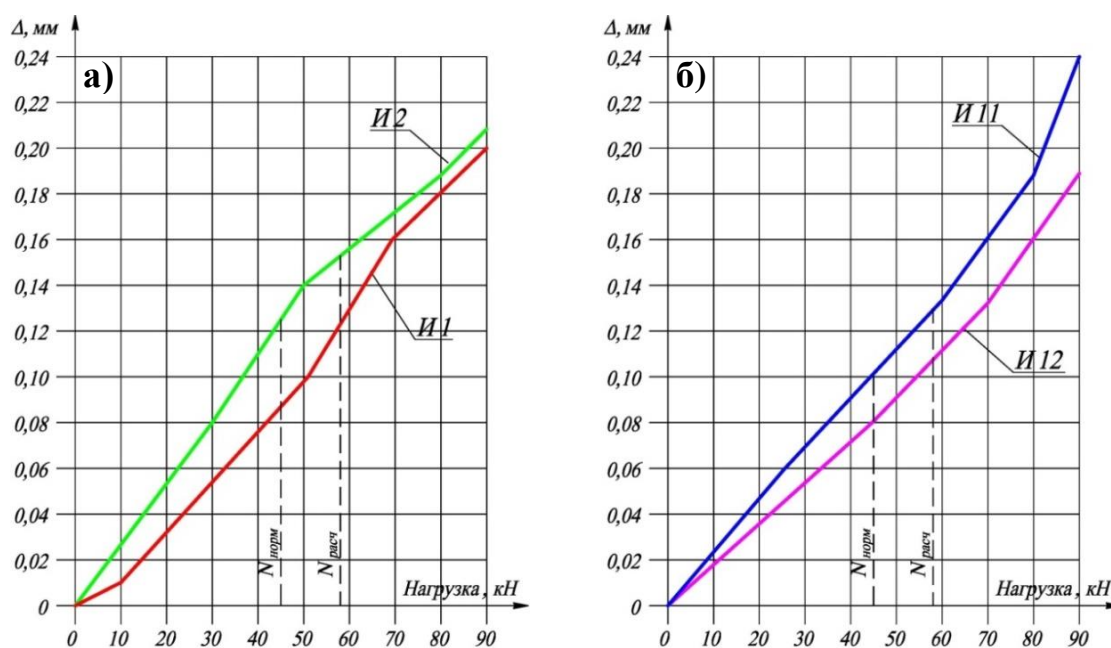


Рисунок 4.14 – Продольное перемещение конструкций опор относительно нижнего пояса: а – левая опора; б – правая опора

В процессе проведения испытаний наблюдалось также смещение вклеенных стержней и в вертикальной плоскости. Величина смещения конца стержня со стороны торца нижнего пояса была больше на 9-12 %, чем с противоположного конца, т.е. наблюдался некоторый поворот плоского стержня относительно своей оси. Такую разницу или такой поворот можно объяснить наличие эксцентриситета в узле, возникающего между осью приложения силы  $N$  и геометрическим центром вклеенной части стержня (рисунок 4.15). Данный факт хорошо согласуется с результатами численных и экспериментальных исследований, приведенными во второй главе в части испытания образцов на выдергивание-вдавливание при приложении силы под углом  $45^\circ$  по отношению к волокнам древесины.

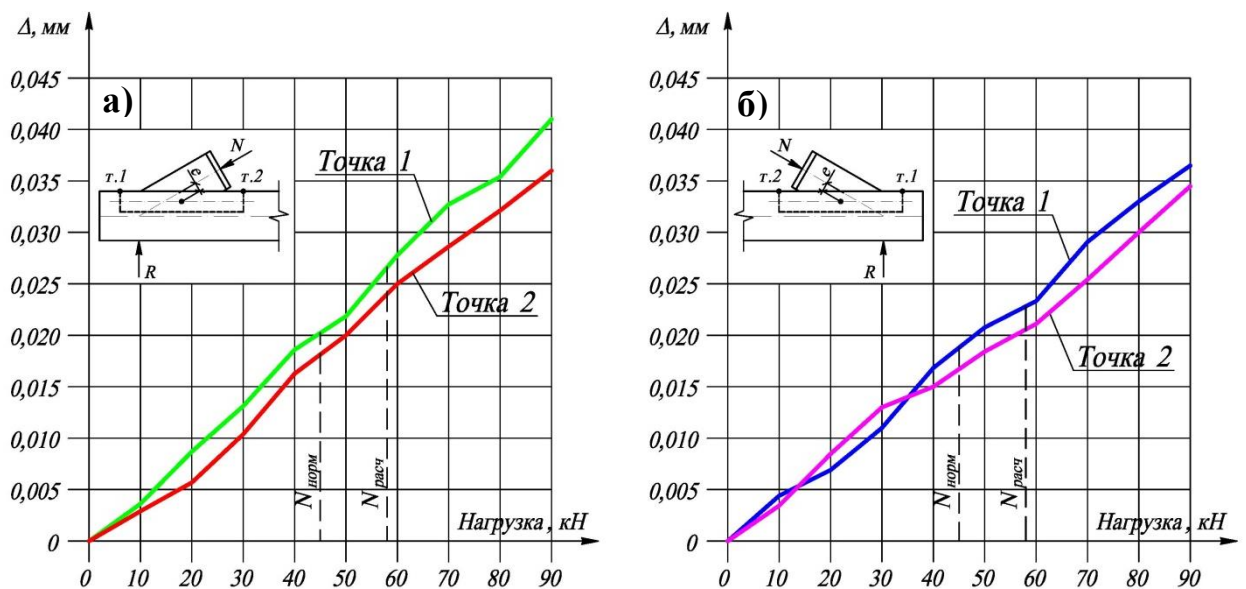


Рисунок 4.15 – Графики смещения концов стержней в вертикальной плоскости по ступеням загрузки: а – левая опора; б – правая опора

Отметим, что величины поворотов вклеенных стержней относительно своей оси (показатели индикаторов И7-И10), полученные при разной центрации узлов на опорах (по оси нижнего пояса и по оси вклеенного стержня), показали малое расхождение (не более 6 %), что свидетельствует о целесообразности выполнения центрации опорного узла ферм по оси нижнего пояса. Это позволит

избежать дополнительного изгибающего момента, возникающем в нижнем поясе в случае центрации опорного узла по оси стржня и соответственно определять расчётное сечение нижнего пояса ферм из условия его расчета только на растяжение.

Для второго экспериментального образца картины величины перемещений, приведенные на рисунках 4.14, 4.15, были полностью идентичными (с разницей контрольных величин не более 4 %), что свидетельствует о корректности полученных данных. Также о корректности проведенного эксперимента свидетельствуют показания индикаторов И13 – И18 и И19 – И22, при помощи которых были отмечены равномерное распределение усилия между двумя ветвями узла верхнего пояса и равномерные осадки каждой из опор соответственно.

Качественные и количественные картины распределения нормальных напряжений во вклеенных плоских стержнях по их продольной оси в первом образце показаны на рисунке 4.16.

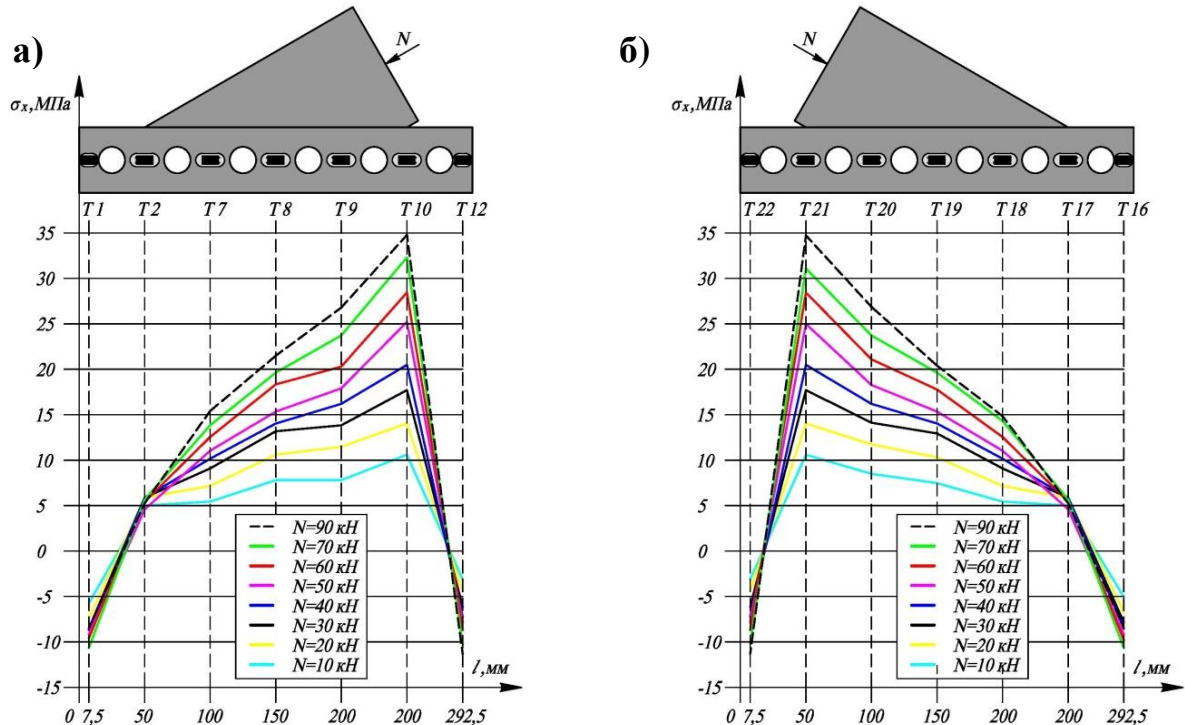


Рисунок 4.16 – Напряжения в плоских стержнях по показаниям тензорезисторов:

а – основной стержень; б – дублирующий стержень

Во втором контрольном образце полученные картины были полностью идентичными. В целом, распределение нормальных напряжений по длине вклеенного стержня характеризуется значительно степенью неравномерности, что хорошо коррелируется с результатами численных исследований и обосновывает неравномерный характер распределения скалывающих напряжений по линии контакта «клей-древесина».

Оба экспериментальных образца были доведены до разрушения, при этом разрушающая нагрузка  $N$  для первого образца составила 159 кН, для второго – 164 кН. Разрушение двух образцов было идентичным и произошло от скалывания древесины вдоль волокон в опорных зонах. Причем, непосредственно перед разрушением, при нагружении, усилие переставало расти и характерные щелчки и потрескивания свидетельствовали о быстро нарастающих деформациях и исчерпанию несущей способности древесины по скалыванию. При разрушении происходило мгновенное выкалывание «торцевых заглушек», сопровождаемое характерным резким звуком. Характер смещения опорных конструкций относительно массива древесины нижнего пояса и общие виды разрушенных узлов представлены на рисунке 4.17.

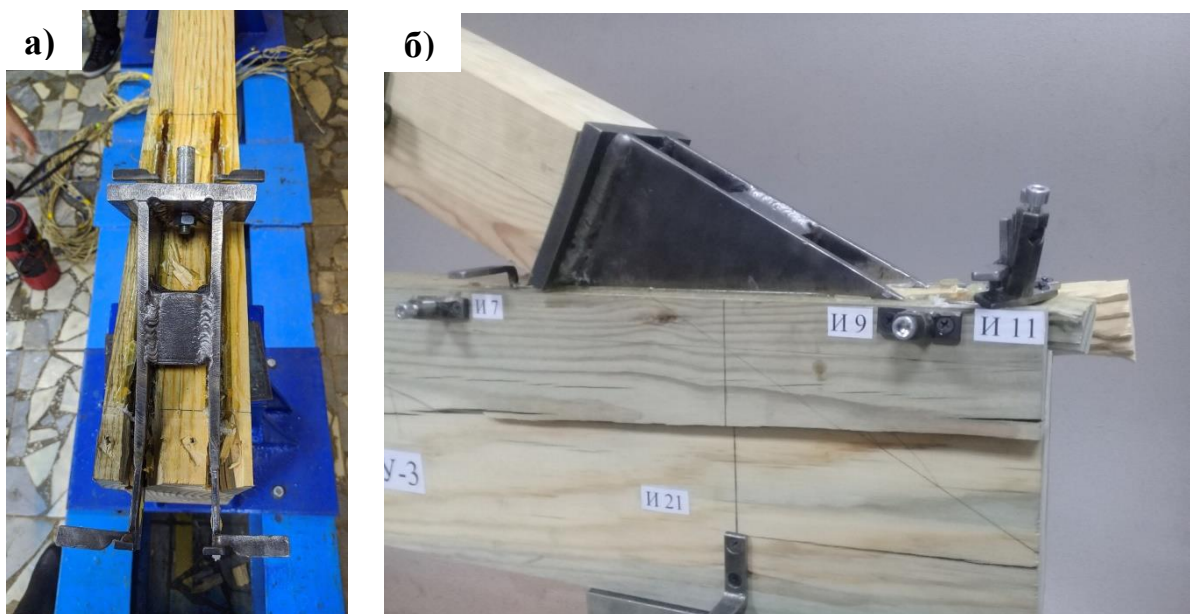


Рисунок 4.17 – Характер разрушения опорного узла первого (а) и второго (б) образцов



Разрушающая нагрузка для первого и второго образцов превысила расчетную нагрузку в 2,74 и 2,83 раза соответственно. Требуемый коэффициент надежности определим в соответствии с указаниями [28, 98] для I группы соединений в случае хрупкого разрушения по формуле:

$$\gamma_v = 1,64 \cdot (1,94 - 0,116 \lg t), \quad (4.1)$$

где  $t$  – время, приведенное к неизменному действию нагрузки, с, определяемое по формуле:

$$t = \frac{t_{max}}{38,2} \quad . \quad (4.2)$$

$$t_{max} = t_1 + t_2 \quad , \quad (4.3)$$

где  $t_1$  – время приложения нагрузки, для каждой ступени составило 1 мин или 60 с;

$t_2$  – время выдержки для снятия отсчетов и оценки момента появления ползучести, для каждой ступени составило 15 мин или 900 с.

В процессе испытаний, время доведения нагрузки до разрушающей  $t_{max}$  составило 14445 и 15400 секунд для первого и второго образцов соответственно.

Подставляя значения приведенного времени для образцов в формулу (4.1), получим значение коэффициента безопасности: для первого образца - 2,69, для второго – 2,68. Значения экспериментальных коэффициентов надежности для первого образца и второго образцов превышают значения требуемых коэффициентов безопасности в 1,02 и 1,06 раза соответственно, т.е. полученные данные позволяют гарантировать эксплуатационную надежность разработанных соединений, в том числе и при длительных нагрузках.

### 4.3.2 Результаты испытаний фермы пролетом 4,5 м

В процессе испытаний прогибы фермы как в третях, так и в середине пролета увеличивались пропорционально росту нагрузки (рисунок 4.18). При нормативной нагрузке (2,0 кН/м<sup>2</sup>) максимальная величина прогиба составила 6,38 мм или 1/705 L при допустимой величине для ферм покрытия 1/300L. При

достижении нагрузкой расчетной величины ( $2,7 \text{ кН/м}^2$ ) максимальное значение прогиба в середине пролета составило  $8,61 \text{ мм}$  или  $1/523$  от расчетного пролета. При значении нагрузки, в полтора раза превышающей расчетную ( $4,1 \text{ кН/м}^2$ ) эта величина была равна  $12,95 \text{ мм}$  или  $1/347L$ . Все величины прогибов были определены с учетом фактических значений осадок опор, которые определяли в опорных сечениях с двух сторон фермы, при этом в расчет вводили среднеарифметическое значение от измеренных величин. Отметим, что теоретические значения нормативной и расчетной нагрузок были определены по критерию расчетной несущей способности клеенных плоских стержней в опорном узле в соответствии с рекомендациями [68, 107].

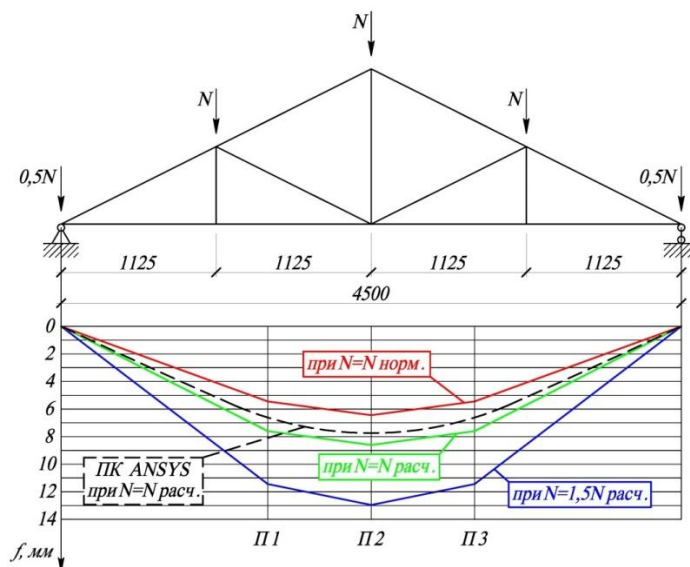


Рисунок 4.18 – Графики прогибов фермы при различных значениях нагрузки

Прогибы дублирующей фермы в середине пролета практически соответствовали прогибам основной испытываемой фермы с разницей показаний не более 4 %. Данный факт свидетельствует о равномерной передаче нагрузки на обе фермы. Нормальные напряжения в верхних и нижнем поясах, в деревянных раскосах нарастали пропорционально росту нагрузки, что говорит об общих деформациях испытываемой конструкции в своей плоскости без потери устойчивости сжатых элементов.

Также пропорционально росту нагрузки происходило смещение клеенных стержней относительно массива древесины (рисунок 4.19, 4.20).

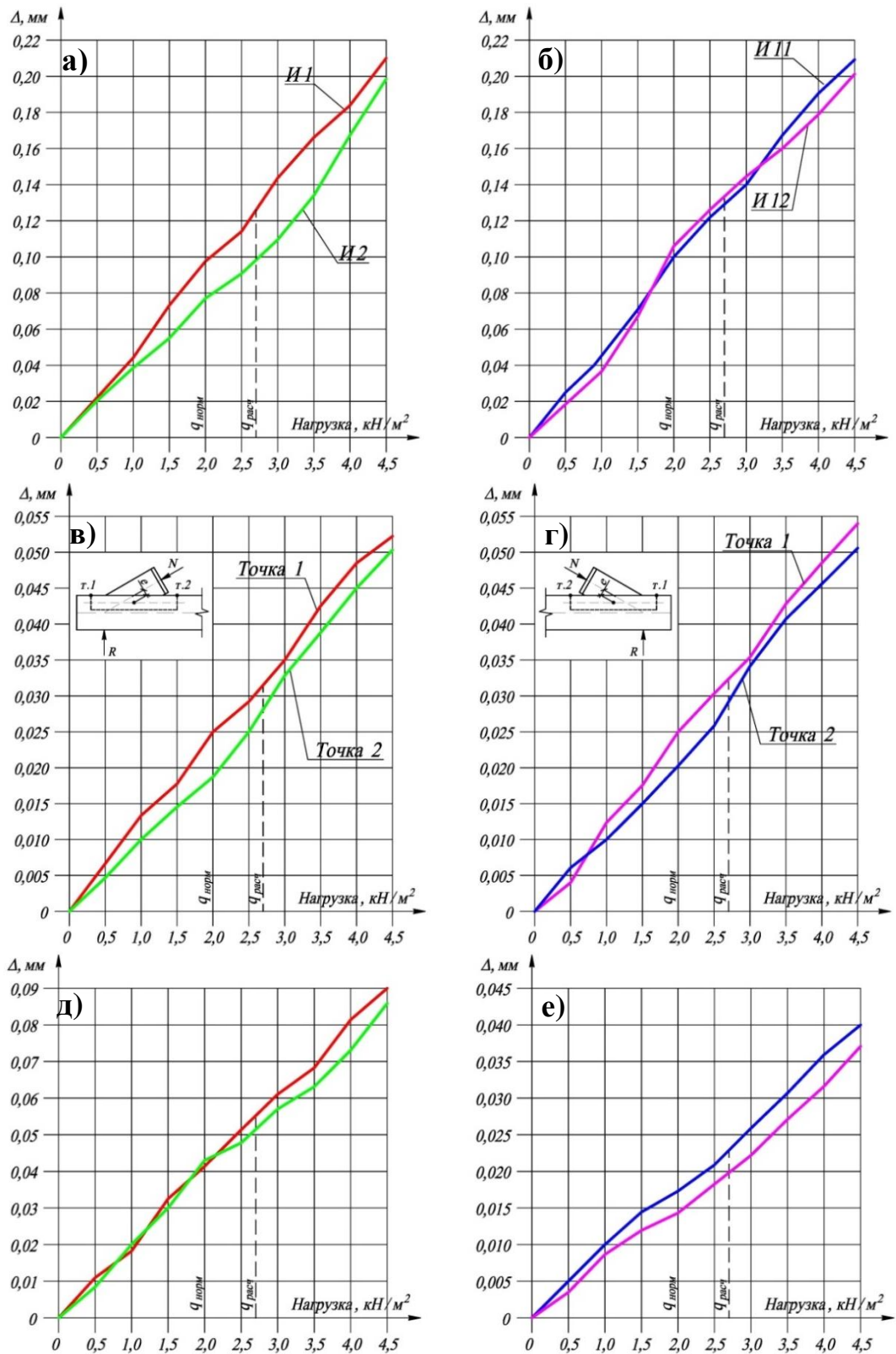


Рисунок 4.19 – Графики величин смещения стержней относительно массива древесины: а – на левой опоре вдоль оси нижнего пояса; б – то же, на правой опоре; в – на левой опоре перпендикулярно оси нижнего пояса; г – то же, на правой опоре; д – в промежуточном узле верхнего пояса параллельно его оси; е – то же, перпендикулярно его оси

В дублирующих узлах разница в величинах смещения не превышала 6 %. При этом при нагрузке, равной  $1,5 N_{расч}$ , максимальная величина смещения стержней в опорных узлах составила 0,21 мм в горизонтальном направлении и 0,054 мм в вертикальном направлении. В промежуточных узлах верхнего пояса максимальные величины таких смещений составили 0,09 мм в направлении оси верхнего пояса и 0,04 мм в перпендикулярном направлении. В стыках нижнего пояса вклеенные стержни сместились относительно древесины на величину 0,12 мм (среднеарифметическая величина по показаниям четырех индикаторов).

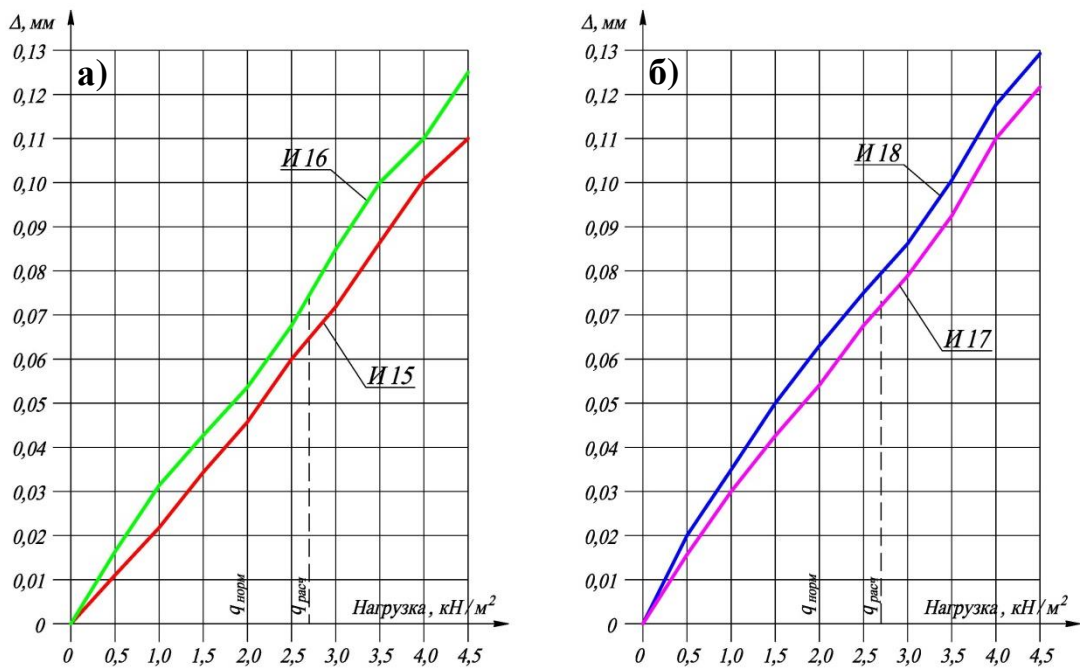


Рисунок 4.20 – Продольное перемещение вклеенных стержней относительно древесины в стыке нижнего пояса: а – левый узел; б – правый узел

В целом, величины смещения стержней относительно древесины свидетельствуют о том, что предложенный способ соединения деревянных элементов в узлах ферм можно отнести к жестким типам, т.е. при инженерных расчетах предложенного типа ферм по деформированной схеме величины деформаций в узлах возможно не учитывать. Следует отметить, что даже для жестких типов соединений на наклонно вклеенных стержнях круглого поперечного сечения (система ЦНИИСК), в соответствии с [124] допускаемая величина податливости соединения составляет 0,5 мм.

#### 4.4 Результаты длительных испытаний фермы пролетом 4,5 м

На рисунке 4.21 показаны графики, характеризующие прогибы опытных конструкций во времени в середине и третях пролета, а также температурно-влажностный режим лаборатории в период эксперимента. Отметим, что значения прогибов у ферм Ф-1 и Ф-2 были практически одинаковы с разницей не более 4 %. В связи с этим на графиках приведены результаты, полученные как среднеарифметические значения для параллельно работающих ферм.

При приложении к опытным конструкция расчетной нагрузки прогиб ферм составил 8,61 мм ( $1/523 L$ ) в середине пролета и 7,72 мм ( $1/583 L$ ) в третях пролета. Наиболее интенсивное нарастание прогиба ферм в середине пролета (рисунок 4.21, а) наблюдалось в первые 30 суток, а в последние 60 суток испытаний значение его практически не изменялось. Максимальный прогиб в середине пролета за период наблюдений составил 11,37 мм или  $1/396$  пролета, таким образом, он вырос по сравнению с кратковременным в 1,32 раза. Аналогично происходило и нарастание прогибов ферм в третях пролета. При проведении длительных испытаний влажность воздуха в лаборатории изменялась в диапазоне 33-37 %, температура – 21-23° (рисунок 4.21, б).

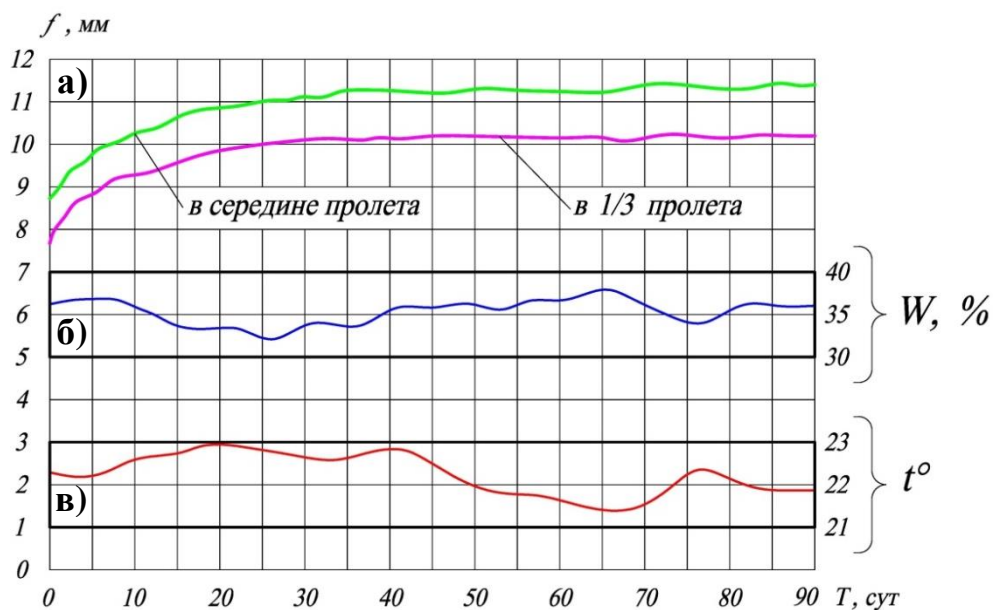


Рисунок 4.21 – Графики нарастания прогибов фермы в середине и третях пролета (а) и графики изменения влажности (б) и температуры (в) в лаборатории с течением времени

Характер изменения во времени величин сдвига вклеенных стержней относительно древесины поясов в опорном узле, стыке нижнего пояса и в промежуточном узле верхнего пояса показан на рисунке 4.22. Качественная картина изменения величин сдвига в вышеназванных узлах была идентичной и, в целом, соответствовала характеру изменения общих прогибов ферм. Так, в опорном узле сразу же после приложения расчетной нагрузки величина сдвига стержней относительно массива древесины составила 0,149 мм вдоль оси нижнего пояса и 0,041 мм в перпендикулярном направлении (рисунок 4.22, а). На завершающем этапе эксперимента эти величины составили 0,181 мм и 0,053 мм соответственно. Увеличение величины сдвига составило вдоль волокон древесины в 1,22 раза и поперек волокон древесины в 1,29 раза.

Наибольший рост величины сдвига вклеенных платин относительно древесины наблюдался в стыковом узле нижнего пояса (рисунок 4.22, б), в котором стержни работали на сдвиг в направлении вдоль волокон древесины. Так, при первоначальной величине сдвига в 0,081 мм после 90 суток испытания она увеличилась до 0,109 мм, т.е. увеличилась в 1,35 раза. При этом в соответствии с СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» для соединений на стальных вклеенных стержнях круглого поперечного сечения податливость соединения составляет 0,5 мм, т.е. полученные экспериментальные значения обеспечивают достаточную степень жесткости стыка нижнего пояса, работающего на восприятие растягивающих усилий.

В промежуточном узле верхнего пояса фермы, в котором вклеенные стержни работают на сдвиг в направлении вдоль волокон древесины и на вдавливание поперек волокон, длительное действие нагрузки обусловило увеличение величин сдвига стержней относительно древесины вдоль оси верхнего пояса в 1,31 раза (рисунок 4.22, в), а в направлении поперек волокон древесины в 1,32 раза.

Анализ графиков, приведенных на рисунках 4.21 - 4.22 говорит о том, что ползучесть вышеупомянутых прогибов и сдвигов имела установившийся характер в период первых 30 суток испытаний, а в последующее время – ограниченный. Качественно картины нарастания деформаций всех

элементов системы во времени совпадают. Отклонений плоскостей ферм от вертикали при проведении испытаний не выявлено.

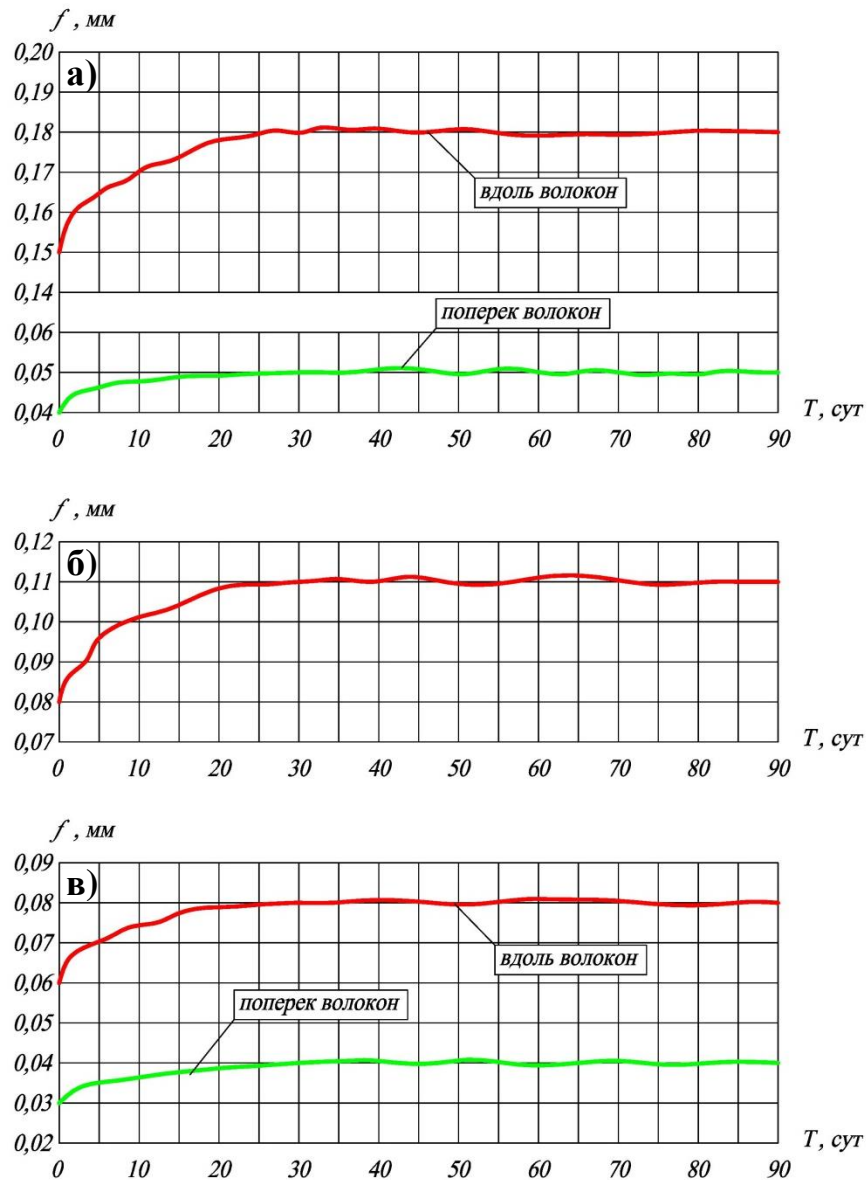


Рисунок 4.22 – Графики смещения плоских стержней относительно массива древесины во времени в характерных узлах фермы: а – опорный узел; б – стык нижнего пояса; в – промежуточный узел верхнего пояса

Опытные конструкции были выдержаны под расчетной нагрузкой  $q=2,70 \text{ кН/м}^2$  в течение 90 суток. В связи с практическим отсутствием процесса нарастания прогибов ферм и смещения вклеенных стержней относительно массива древесины испытания были завершены. За время наблюдений каких-либо признаков разрушений элементов и соединений ферм не обнаружено. В

целом, характеристики деформативности конструкций не превысили предельно допустимых значений, что подтверждает их надежность при воздействии длительно действующих нагрузок.

#### **4.5 Выводы по четвертой главе**

1. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили техническую целесообразность применения узлов на клеенных стальных плоских стержнях в конструктивных решениях деревянных ферм.

2. Узловые соединения на клеенных стальных стержнях обеспечивают эксплуатационную надежность деревянных ферм, в том числе при действии длительных нагрузок.

3. Различные варианты центрации опорных узлов ферм не оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние клеенных плоских стержней. При конструировании таких узлов рекомендуется их центрацию по отношению к опорной реакции выполнять по оси нижнего пояса для обеспечения его работы только на растяжение. Для снижения степени неравномерности распределения скалывающих напряжения в промежуточных узлах ферм их центрацию рекомендуется выполнять по оси клеенных плоских стержней.

4. Полученные значения смещения клеенных плоских стержней относительно массива древесины и фактические прогибы фермы позволяют отнести разработанные соединения к жесткому типу.



## **5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ, РАСЧЕТУ И ИЗГОТОВЛЕНИЮ ДЕРЕВЯННЫХ ФЕРМ С УЗЛАМИ НА СТАЛЬНЫХ ПЛОСКИХ СТЕРЖНЯХ И ИХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ**

### **5.1 Общие положения**

Так как предлагаемые конструкции цельнодеревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях являются новыми и, соответственно, отсутствует проверенная и обоснованная методика их расчета и конструирования, то, для оптимизации, предлагается в процессе проектирования придерживаться известных требований, предъявляемых к деревянным конструкциям.

При конструировании и расчете следует руководствоваться требованиями СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» [124], СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» [120], СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [121].

Защита древесины от возгорания, биоповреждений и увлажнения, а металлических частей от коррозии должна выполняться в соответствии с требованиями СТО 36554501-002-2006 «Деревянные клееные и цельнодеревянные конструкции. Методы проектирования и расчета» [126], СП 28.13330-2017 «Защита строительных конструкций от коррозии» [122]. Следует учитывать требования «Руководства по обеспечению долговечности деревянных клееных конструкций при воздействии на них микроклимата зданий различного назначения и атмосферных факторов» [139] для обеспечения долговечности деревянных конструкций в целом и особенно в части опирания ферм на колонны и стены из различных материалов.

Деревянные фермы с узлами на стальных плоских стержнях предназначены для применения в качестве конструкций покрытия зданий промышленного и гражданского строительства, при температурно-влажностных условиях эксплуатации 1а, 1б, 2 по СП 64.13330-2017 «Деревянные конструкции» [124], в отапливаемых зданиях с относительной влажностью воздуха до 65 %.

## 5.2 Материалы

Пояса и элементы решетки ферм следует принимать изготавливать из древесины хвойных пород не ниже 2-го сорта по ГОСТ 8486-86\* «Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия» [29]. Допускается выполнять пояса составными по длине с учетом размеров пиломатериалов, поставляемых на рынок по ГОСТ 24454-80 «Пиломатериалы хвойных пород» [27] с отбраковкой дефектных участков по требованиям [29] и ГОСТ 2140-81 «Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения» [26]. Влажность древесины, на момент изготовления деталей, допускается в пределах 8-12 %.

Для изготовления плоских стержней рекомендуется к применению сталь Ст3 обыкновенного качества с пределом текучести не менее 220 МПа. Стержни простой геометрической конфигурации рекомендуется изготавливать из полосового проката по ГОСТ 103-2006 «Прокат сортовой стальной горячекатанной полосовой» [24] нарезкой по длине с последующей обработкой или из листового проката сортамента по ГОСТ 19903-2015 «Прокат листовой горячекатанной. Сортамент» [25] путем нарезания или нарубания заготовок с последующей обработкой. Стержни более сложной геометрической конфигурации допускается выполнять цельными из листового проката, путем вырезания на плазменных установках, а также составными, путем соединения деталей на сварке.

Для клеивания плоских стержней рекомендуется применять эпоксидный клей марки ЭД20 с отвердителем ПЭПА.

Для сборки разъемных соединений ферм следует применять болты класса точности В по ГОСТ 7798-70, гайки класса точности В по ГОСТ 5915-70 (СТ СЭВ 3683-82), шайбы по ГОСТ 11371-78.

## 5.3 Конструирование и расчет

Все узловые соединения ферм, а также стыки элементов по длине,

рекомендуется выполнять разъемными. Применение в фермах разъемных соединений на болтах позволит упростить расчет и технологию изготовления, а также снизить стоимость транспортировки. Кроме того, соединения на болтах являются шарнирными, что в реальной конструкции более соответствует ее расчетной модели и более предпочтительно с точки зрения перераспределения напряжений, возникающих в элементах фермы в процессе ее эксплуатации. Стыки по длине, например в нижнем поясе, целесообразно выполнять разъемными или неразъемными, в зависимости от требований транспортировки и монтажа. Неразъемные стыки представляют собой две детали одного элемента конструкции, объединенные за счет вклеивания плоского стального стержня в пазы обеих деталей.

### 5.3.1 Указания по конструированию

При конструировании клеевых соединений стальных стержней с древесиной целесообразно руководствоваться следующими общими правилами, применение которых обосновано в главе 2 настоящего исследования.

1. Толщина вклеиваемого плоского стержня  $t_{cm}$  назначается 4 – 8 мм.
2. Ширина вклеиваемой части плоского стержня  $b_{cm}$  принимается в пределах 40 – 100 мм, но не более  $1/2$  высоты поперечного сечения элемента при односторонней вклейке и не более  $1/3$  высоты поперечного сечения элемента при двусторонней вклейке.
3. Длины вклеиваемых плоских стержней в стыках элементов ферм, работающих на растяжение-сжатие, определяются в зависимости от типа и местоположения узлового соединения по методике, приведенной в разделе 5.3.2, с учетом ранее разработанных рекомендаций [108].
4. Длина плоского стержня  $l_{cm}$  в стыках по длине, в том числе и неразъемных, назначается по расчету, но не менее  $2b_{cm}$  и не более  $8b_{cm}$  по рекомендациям [108]. Длина вклеиваемой части плоского стержня  $l_{cm}$  во всех остальных узлах назначается по расчету, но не более 5 длин фасонки  $l_{\phi}$  при ширине стержня  $b_{cm} =$

50 мм и не более  $8 l_{\phi}$  при ширине стержня  $b_{cm} = 100$  мм. Промежуточные значения определяются по интерполяции.

5. Глубина паза принимается равной ширине клеиваемой части плоского стержня  $b_{cm}$ . Ширина паза принимается на 4 – 5 мм больше толщины клеиваемого плоского стержня  $t_{cm}$ , тем самым обеспечивается зазор между стержнем и стенками паза в 2 – 2,5 мм. Такая толщина клеевого слоя обеспечивает хорошее проникновение компаунда во все пустоты. Длина паза принимается на 8 – 10 мм больше длины клеиваемой части плоского стержня  $l_{cm}$ , тем самым обеспечивается зазор между торцом стержня и торцевой стенкой паза. Таким образом, со всех сторон обеспечивается защита клеиваемой части плоского стержня от коррозии.

6. Размеры и конфигурация плоских стержней, применяемых в одном соединении (за исключением конькового узла), должны быть одинаковы.

7. Общая площадь отверстий на клеиваемой части плоского стержня должна составлять 30 – 40 % от общей площади клеиваемой части.

8. Диаметр отверстий принимается в пределах от 10 до 18 мм в зависимости от ширины клеиваемой части плоского стержня  $b_{cm}$  и количества рядов.

9. Количество рядов отверстий назначается из условия наилучшего заполнения поверхности клеиваемой части плоского стержня. Рекомендуемое количество рядов в зависимости от ширины клеиваемой части плоского стержня  $b_{cm}$  приведено в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Количество рядов отверстий в зависимости от ширины стержня

Ширина стержня ( $b_{cm}$ ), мм	Количество рядов отверстий			
	2	3	4	5
40	+			
50	+	+		
60		+		
70		+	+	
80			+	
90			+	+
100				+

10. Расстояния между центрами отверстий по длине и ширине клеиваемой части плоского стального стержня назначаются по диаметру отверстий  $d_{отв} + (4 \div 6)$  мм.

11. В качестве аварийной связи к плоскому клеиваемому стержню привариваются (или механически крепятся) шпильки, которые выводятся через отверстие с противоположной стороны от клейки.

12. Центрирование осей элементов, соединяемых в узле, выполняется по оси, проходящей через центр плоского стержня.

13. Конфигурация фасонки определяется размером плоского стержня и углом наклона элемента, присоединяемого к ней.

14. В случае работы плоских стержней на вдавливание поперек волокон или под углом к волокнам (опорный узел, соединение сжатых раскосов с поясом, соединение сжатой стойки с поясом) обязательна установка подкрепляющих ребер между фасонками. В случае невозможности установки ребер на фасонки следует выполнить их расчет на устойчивость по требованиям [120], вводя к расчетной длине, при определении условной гибкости стержня, повышающий коэффициент  $k=1,5$ , который позволит учесть возможность потери устойчивости в верхней зоне клеенной части.

### 5.3.2 Указания по расчету

В предлагаемой конструкции ферм на клеенных плоских стальных стержнях можно выделить основные типы узловых соединений, а именно:

- стыковые узлы;
- опорные узлы;
- узлы сопряжения элементов решетки ферм с нижним и верхним поясами.

Методика расчета узлов одинакова для всех типов, однако следует учитывать направление действия усилия по отношению к волокнам древесины. Изменение величины несущей способности пропорционально изменению угла между

приложенной силой и направлением волокон древесины, работающей на скалывание.

Проектирование фермы осуществляется в несколько этапов. Сначала выполняется компоновка. На этом этапе определяются генеральные размеры фермы, принимаются основные параметры решетки и формируется геометрическая схема фермы. На этапе статического расчета разрабатывается расчетная схема, выполняется сбор нагрузок и определяются расчетные усилия в элементах фермы. Эти этапы выполняются известными аналитическими и численными методами строительной механики.

Далее, из условий прочности, жесткости и устойчивости подбираются поперечные сечения деревянных элементов. Затем рассчитываются узловые соединения. Отличия в расчетах перечисленных узлов заключаются в направлении действия усилий в плоских стержнях относительно волокон древесины. Можно выделить три основных варианта работы плоских стержней:

- выдергивание/вдавливание вдоль волокон древесины;
- выдергивание/вдавливание поперек волокон древесины;
- выдергивание/вдавливание под углом к волокнам древесины.

С учетом направления действия усилий в плоских стержнях выбирают алгоритм расчет узлового соединения. Параметры обработки вклеиваемой части плоского стержня, указанные в технологической карте (диаметр отверстий или ширина пазов, их шаг, расстановка по ширине и т.п.), должны обеспечивать полное включение древесины в работу на скалывание.

При расчете стыковых узлов (выдергивание/вдавливание вдоль волокон древесины) выполняются следующие этапы:

1. Задаются количеством плоских стержней и их шириной по размерам поперечного сечения деревянного элемента.

2. По требованиям [120] определяют площадь поперечного сечения плоских стержней с учетом ослабления отверстиями:

$$\frac{N}{R_y \cdot A_n \cdot \gamma_c \cdot \gamma_m \cdot n \cdot k_{ст}} \leq 1, \quad (5.1)$$

где  $N$  – осевое усилие в элементе;

$R_y$  – расчетное сопротивление стали, МПа;

$A_n$  – площадь поперечного сечения плоского стержня, мм<sup>2</sup>;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы;

$\gamma_m$  – коэффициент надежности по материалу;

$n$  – количество плоских стержней в соединении, шт.;

$k_{cm}$  – коэффициент, учитывающий возможную неравномерность

распределения нагрузки между параллельно работающими плоскими стержнями.

3. При необходимости корректируют толщину и ширину плоского стержня.

4. В первом приближении определяют длину плоских стержней из условия обеспечения несущей способности соединения  $T$ , подставляя в формулу понижающий коэффициент  $k=0,7$ .

$$T \geq N. \quad (5.2)$$

5. Определяют значения всех корректировочных коэффициентов.

6. Определяют несущую способность клевого соединения по формуле:

$$T \leq 2 \cdot R_{ст} \cdot b_{ст} \cdot l_{ст} \cdot k_t \cdot k_l \cdot k_{ст} \cdot n, \quad (5.3)$$

где  $R_{cm}$  – расчетное сопротивление древесины скалыванию вдоль волокон, определяемое по [124], МПа;

$b_{cm}$  – ширина клеенной части плоского стержня, мм;

$l_{cm}$  – длина клеенной части плоского стержня, мм;

$k_t$  – корректировочный коэффициент, учитывающий влияние толщины стержня на прочность соединения, определяемый по формуле:

$$k_t = 0,85 + 30 \cdot t_{ст}, \quad (5.4)$$

где  $t_{cm}$  – толщина клеенной части плоского стержня, м;

$k_l$  – коэффициент снижения несущей способности клевого соединения в зависимости от длины клеенной части плоского стержня, определяемый по формуле:

$$k_l = 1,125 + 0,9l_{ст}^2 - 1,36l_{ст}, \quad (5.5)$$

$k_{cm}$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки между параллельно работающими плоскими стержнями ( $k_{cm} = 1$  – для 2-х

стержней;  $k_{cm} = 0,95$  – для 4-х стержней;  $k_{cm} = 0,90$  – для 6-ти стержней – по данным ранее проведенных исследований).

При расчете соединений элементов решетки с поясами, в случае перпендикулярного расположения осей соединяемого элемента и пояса (выдергивание/вдавливание поперек волокон древесины):

1. Задаются количеством плоских стержней (не более двух в соединении).
2. Предварительно назначают толщину плоского стержня.
3. Назначают ширину плоского стержня, руководствуясь следующими условиями:

$$\begin{cases} b_{ст} \leq \frac{1}{2} h; \\ 40\text{мм} \leq b_{ст} \leq 100 \text{ мм}; \end{cases}$$

4. В первом приближении определяют длину плоских стержней из условия обеспечения несущей способности соединения  $T$ , подставляя в формулу понижающий коэффициент  $k=0,7$ .

$$T \geq N. \quad (5.6)$$

5. Назначают длину распределительной фасонки ( $l_\phi$ ) из условий расположения соединительных элементов.

6. Определяют значения всех корректировочных коэффициентов.

7. Определяют несущую способность клеевого соединения по формуле:

$$T \leq 2 \cdot R_{ск}^{90} \cdot b_{ст} \cdot l_{ст} \cdot k_n \cdot k_t \cdot n, \quad (5.7)$$

где  $R_{ск}^{90}$  – расчетное сопротивление древесины скалыванию поперек волокон, определяемое по [124], МПа;

$b_{cm}$  – ширина клеенной части плоского стержня, мм;

$l_{cm}$  – длина клеенной части плоского стержня, мм;

$k_t$  – корректировочный коэффициент, определяемый по формуле (5.4);

$k_n$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений в древесине по площади клеенки стержня от соотношения  $l_{cm} / l_\phi$  и  $b_{cm}$ , определяемый по графикам, приведенным в главе 2, а также по таблице 5.2.



8. При необходимости изменяют параметры плоского стержня (длина, толщина) и выполняют проверку несущей способности.

9. При растяжении, по требованиям [120], рассчитывают ослабленное отверстием сечение фасонки на прочность по формуле:

$$\frac{N}{A_n \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (5.8)$$

где  $N$  – усилие, действующее на фасонку, Н;

$A_n$  – площадь сечения фасонки, поперек направления действия усилия в месте ослабления отверстием, мм<sup>2</sup>;

$R_y$  – расчетное сопротивление стали, МПа;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы.

Таблица 5.2 – Значения коэффициента неравномерности

Отношение длины плоского стержня к длине фасонки $l_{cm} / l_\phi$	Коэффициент неравномерности $k_n$ при ширине плоского стержня			
	50 мм	60 мм	80 мм	100 мм
1	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,85	0,86	0,87	0,89
3	0,72	0,75	0,76	0,79
4	0,60	0,64	0,68	0,71
5	0,50	0,55	0,61	0,64
6	-	0,48	0,54	0,58
7	-	-	0,49	0,54
8	-	-	-	0,5

Промежуточные значения коэффициента неравномерности определять по интерполяции

При сжатии выполняют расчет фасонки на прочность (формула 5.8) и устойчивость. Расчет на устойчивость выполняется по формуле:

$$\frac{N}{\varphi \cdot A \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (5.9)$$

где  $N$  – усилие, действующее на фасонку, Н;

$\varphi$  – коэффициент устойчивости при центральном сжатии, определяемый в зависимости от условной гибкости. При расчете условной гибкости к расчетной

длине вводится повышающий коэффициент  $k = 1,5$ , для учета потери устойчивости и обмятия в верхней зоне вклеенной части плоского стержня.

$A$  – площадь сечения фасонки, поперек направления действия усилия, мм<sup>2</sup>;

$R_y$  – расчетное сопротивление стали, МПа;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы.

10. При шарнирном креплении элементов выполняют расчет на срез и смятие в болтовом соединении по формулам [120]. На срез:

$$N_{bs} = R_{bs} \cdot A_b \cdot n_s \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c, \quad (5.10)$$

где  $N_{bs}$  – расчетное усилие среза, которое может быть воспринято одним болтом, Н;

$R_{bs}$  – расчетное сопротивление срезу одноболтового соединения, МПа;

$A_b$  – площадь сечения болта брутто, мм<sup>2</sup>;

$n_s$  – число расчетных срезов одного болта;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы;

$\gamma_b$  – коэффициент условий работы болтового соединения, определяемый по таблице 41 [120] и принимаемый не более 1,0.

При расчете на смятие:

$$N_{bp} = R_{bp} \cdot d_b \cdot \Sigma t \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c, \quad (5.11)$$

где  $N_{bp}$  – расчетное усилие смятия, которое может быть воспринято одним болтом, Н;

$R_{bp}$  – расчетное сопротивление смятию одно болтового соединения, МПа;

$d_b$  – наружный диаметр стержня болта, мм;

$\Sigma t$  – наименьшая суммарная толщина соединяемых элементов, сминаемых в одном направлении, мм;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы;

$\gamma_b$  – коэффициент условий работы болтового соединения, определяемый по таблице 41 [120] и принимаемый не более 1,0.

При расчете опорных узлов треугольных ферм и соединений элементов решетки с поясами, в случае расположения осей соединяемого элемента и пояса под углом (выдергивание/вдавливание под углом к волокнам древесины):

1. Задаются количеством плоских стержней (не более двух).
2. Предварительно назначают толщину плоского стержня.
3. Назначают ширину плоского стержня, руководствуясь следующими условиями:

$$\begin{cases} b_{ст} \leq \frac{1}{2} h; \\ 40\text{мм} \leq b_{ст} \leq 100 \text{ мм}; \end{cases}$$

4. В первом приближении определяют длину плоских стержней из условия обеспечения несущей способности соединения  $T$ , подставляя в формулу понижающий коэффициент  $k=0,7$ .

$$T \geq N. \quad (5.12)$$

5. Назначают длину распределительной фасонки ( $l_\phi$ ) из условий расположения соединительных элементов.

6. Определяют значения всех корректировочных коэффициентов.

7. Определяют несущую способность клееного соединения по формуле:

$$T \leq 2 \cdot R_{ск}^\alpha \cdot b_{ст} \cdot l_{ст} \cdot k_n \cdot k_t \cdot n, \quad (5.13)$$

где  $R_{ск}^\alpha$  – расчетное сопротивление древесины скалыванию под углом  $\alpha$  к направлению волокон древесины, МПа, определяется по формуле [124]:

$$R_{ск\alpha} = \frac{R_{ск}}{1 + \left(\frac{R_{ск}}{R_{ск90}} - 1\right) \cdot \sin^3 \alpha}, \quad (5.14)$$

$b_{ст}$  – ширина клеенной части плоского стержня, мм;

$l_{ст}$  – длина клеенной части плоского стержня, мм;

$k_t$  – корректировочный коэффициент, определяемый по формуле (5.4);

$k_n$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений в древесине по площади клейки стержня от соотношения  $l_{ст} / l_\phi$  и  $b_{ст}$ , определяемый по графикам, приведенным в главе 2, а также по таблице 5.2.

8. При необходимости изменяют параметры плоского стержня и выполняют проверку несущей способности.

9. Рассчитывают ослабленное отверстием сечение фанонки на прочность (при растяжении). При сжатии рассчитывают выступающие стальные части на устойчивость.

10. При шарнирном креплении элементов выполняют расчет на срез и смятие в болтовом соединении.

В качестве примера выполним расчет несущей способности соединения стойки с поясом под прямым углом (рисунок 5.1).

Исходные данные: растягивающее усилие, действующее в стойке, составляет 12 кН; стойка выполнена из металлического прута, для соединения с фанонкой плоского стержня предусмотрена проушина; крепление стойки к фанонке шарнирное через болт М20; пояс выполнен из деревянного бруса сечением 150×150 мм.

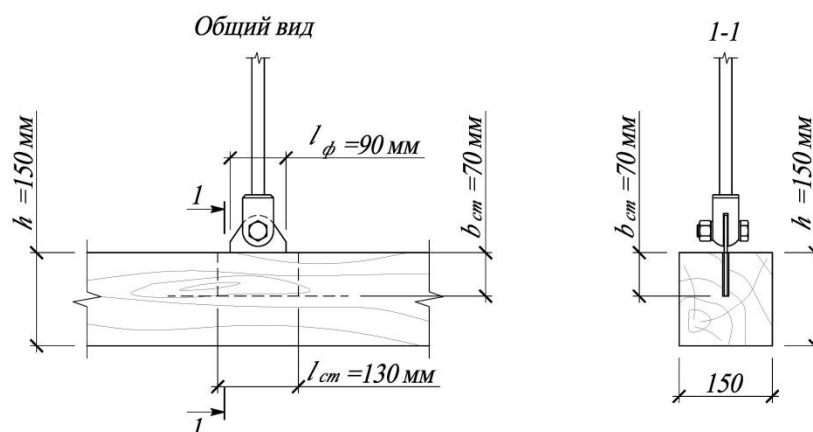


Рисунок 5.1 – Узел соединения стойки с поясом

Принимаем в узле один плоский стержень толщиной 4 мм. Так как рассматриваемый узел предполагает одностороннюю вклейку плоских стержней, то назначаем ширину, руководствуясь следующими условиями:

$$\begin{cases} b_{\text{ст}} \leq \frac{1}{2} h; \\ 40 \text{ мм} \leq b_{\text{ст}} \leq 100 \text{ мм}; \end{cases}$$

где  $h$  – высота поперечного сечения бруса пояса.

Так как  $\frac{1}{2}$  высоты поперечного сечения пояса составляет 75 мм, то предварительно назначаем ширину вклеиваемой части плоского стержня 70 мм.

В первом приближении определяем требуемую длину вклейки, подставляя в формулу расчета несущей способности понижающий коэффициент ( $k=0,7$ ), учитывающий влияние толщины плоского стержня и неравномерность распределения касательных напряжений в древесине по площади вклейки стержня. Выражая из расчетной формулы длину получим:

$$l_{ст} = \frac{N}{2 \cdot R_{ск}^{90} \cdot b_{ст} \cdot 0,7} .$$

Подставляя в формулу значения членов, получим ориентировочную длину вклеиваемой части плоского стержня 153 мм. Для расчета принимаем  $l_{см}=150$  мм. Назначаем длину фасонки из условия размещения соединительного болта  $l_{ф}=90$  мм. Отношение длины плоского стержня к длине фасонки  $l_{см}/l_{ф}$  составляет 1,67. Интерполируя данные таблицы 5.2 получим значение коэффициента  $k_n=0,955$ .

Рассчитываем значение коэффициента, учитывающего влияние толщины стержня на несущую способность:

$$k_t = 0,85 + 30 \cdot 0,004 = 0,97.$$

Выполняем расчет соединения по несущей способности с выбранными параметрами плоского стержня. Расчетное сопротивление древесины скалыванию поперек волокон с учетом коэффициента длительной прочности  $R_{ск}^{90}=0,8$  МПа. Тогда, несущая способность соединения равна:

$$T = 2 \cdot 0,8 \cdot 70 \cdot 150 \cdot 0,97 \cdot 0,955 = 15562 \text{ Н.}$$

Уменьшаем длину плоского стержня до 130 мм. Значение коэффициента  $k_n$  составит 0,92. Выполняя расчет, получим значение  $T = 12993$  Н. Несущая способность соединения обеспечена.

#### **5.4 Технология изготовления ферм с узлами на стальных плоских стержнях**

Изготовлению деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях предшествуют этапы расчета и конструирования. На этих стадиях определяются все геометрические размеры будущей конструкции в целом, а также отдельных

ее деталей. Процесс изготовления состоит из изготовления всех деталей фермы, их сборки, обработки собранной конструкции.

**Изготовление деревянных элементов.** По разработанным чертежам выполняются заготовки пиломатериалов с припусками на обработку по габаритным размерам. Заготовки обрабатываются на строгальных станках (рейсмусы, фуганки) до проектных размеров поперечных сечений, отрезаются в размер по длине. Пазы под плоские стальные стержни в деревянных элементах выполняются ручными фрезерами или на портальных 3-х координатных фрезерных станках концевыми фрезами. Диаметр фрез подбирается в зависимости от толщины вклеиваемого стержня с учетом обеспечения демпфирующего слоя толщиной 2 – 2,5 мм со всех сторон. Пазы предпочтительно выполнять глухими, в этом случае упрощается процесс вклеивания. В том случае, когда устроить глухой паз невозможно (торцевые пазы на всю ширину элемента или необходимо компактное решение опорного узла), дополнительно выполняется опалубка, обеспечивающая герметизацию паза с одной или нескольких сторон. В качестве основных элементов опалубки могут быть применены отрезки из жестких листовых материалов. Герметизация выполняется следующим образом. На поверхность деревянного элемента на расстоянии 1 – 1,5 см от паза по периметру наносится герметизирующий состав (мастика, герметик, пластилин), далее сверху накладывается отрезок листового материала, затем выполняется прижатие при помощи стяжек (струбцин). Если применение стяжек невозможно, допускается применять короткие саморезы.

**Изготовление стальных плоских стержней.** Плоские стержни выполняются по разработанным чертежам. Для стержней простой геометрической конфигурации заготовки выполняются из полосового проката нарезкой по длине. Стержни более сложной конфигурации могут быть выполнены цельными, из листового проката, разделкой на станках плазменной или лазерной резки либо вручную. А также допускается изготавливать сложные по конфигурации стержни составными, из двух или более частей, с последующим соединением на сварке. Сварные швы должны быть отшлифованы в плоскость стержня для

обеспечения доступа к пазу при клеивании. В зависимости от применяемого оборудования отверстия в плоских стержнях могут быть выполнены сверлением с предварительной разметкой или по шаблону (возможно применение кондукторов при большом количестве повторяющихся деталей), плазменной или лазерной резкой (при диаметре отверстий от 16 мм), пробивкой на прессах. Все острые кромки должны быть притуплены. При изготовлении более сложных конструкций, объединяющих в себе несколько стержней, например опорных башмаков, выполнение отверстий в элементах удобнее делать до сборки.

Объединение клеиваемых плоских стержней с другими деталями должно выполняться при помощи ручной, автоматической и полуавтоматической сварки с закреплением свариваемых частей для обеспечения сохранности их формы.

**Вклеивание плоских стержней.** Ко времени выполнения вклеивания плоских стальных стержней в местах, где это необходимо, должна быть установлена опалубка. Деревянные элементы должны быть расположены на ровных поверхностях, обеспечивающих возможность ровной заливки клеевого компаунда. Перед установкой плоского стержня паз необходимо очистить от пыли и опилок например продувкой сжатым воздухом. Плоские стержни перед установкой необходимо обезжирить при помощи ветоши и технических растворителей. Закрепление стержня в пазу рекомендуется выполнять при помощи калиброванных деревянных клинышков. Необходимо обеспечить зазор между стержнем и стенками паза 2 – 2,5 мм со всех сторон. Приготовление эпоксидного состава выполняется в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя и в указанных пропорциях. Объем компаунда определяется по объему паза за вычетом объема клеиваемой части плоского стержня (с учетом отверстий). Заполнение паза эпоксидным составом выполняется при помощи шприцов большого объема (например, шприц Жане). При необходимости повысить текучесть компаунда (увеличить проникающую способность) разрешается подогревать состав на водяной бане. В этом случае следует помнить, что сроки твердения клеевой композиции уменьшаются. После заливки, в течение 2 – 3 часов необходимо наблюдать за поведением залитого

состава и, при необходимости доливать. После заливки на поверхности клеевой композиции могут собираться вытесненные из паза пузырьки воздуха. Рекомендуется удалять их путем нагрева поверхности клеевого состава при помощи газовой горелки (открытое пламя) или технического фена (поток горячего воздуха). После вклейки выдерживать элементы не менее 24 часов без механического воздействия (транспортировки). Перед сборкой выдерживать не менее 3-х суток. Описание технологического процесса вклейки плоских стержней приведено в главе 2 и главе 4.

**Защита конструкции от эксплуатационных и чрезвычайных воздействий.** Части стальных плоских стержней или конструкций их объединяющих, выступающие из деревянных элементов (не вклеенные) должны быть огрунтованы, окрашены и покрыты огнезащитными составами. Выполнять защиту металлических частей следует после вклейки.

Защита деревянных элементов выполняется после вклейки всех стальных частей. Рекомендуется поверхностное нанесение защитных составов. Следует применять антисептические составы для предотвращения гниения и разрушения насекомыми и огнезащитные составы, снижающие горючесть древесины или же огнебиозащитные препараты (антипиросепт ББ-11, Сенега-ОБ, КСД-А, Сенеж огнебиопроф и им аналогичные), совмещающие в себе эти свойства.

**Сборка конструкции.** Сборку конструкции рекомендуется выполнять на специальном стенде в следующей последовательности:

- установка и закрепление нижнего пояса;
- установка раскосов и стоек с соединением крепежных элементов на болты к нижнему поясу;
- установка верхнего пояса с соединением крепежных элементов на болты к раскосам и стойкам;
- затяжка болтов.

Готовые конструкции транспортируются к месту монтажа как в полностью собранном виде, так и отправочными марками. Для возможности применения малогабаритного транспорта или при строительстве в стесненных условиях, а



также при реконструкционных работах возможна доставка к месту монтажа разобранных комплектов элементов ферм. При этом на строительной площадке должны быть обеспечены условия для сборки конструкции.

### 5.5 Оценка технико-экономической эффективности применения ферм с узлами на стальных плоских стержнях

Для оценки технико-экономической эффективности ферм с предлагаемыми узлами выполнили сравнительный анализ двух вариантов конструкций. В первом варианте рассмотрели ферму из цельной древесины с традиционными узловыми соединениями, во втором – ферму с узлами на стальных плоских стержнях. Очертания поясов, тип решетки, перекрываемый пролет, высота в коньке для обоих вариантов принимались одинаковыми. В качестве аналога (1 вариант) используем пример фермы рассмотренный в книге «Строительные конструкции из дерева и синтетических материалов. Проектирование и расчет» (автор – Гринь И.М.). Для удобства сравнения вариантов сортамент пиломатериалов принимали одинаковым для двух вариантов.

Треугольная ферма покрытия пролетом 15 м, шаг 3 м, высота 3 м. Расчет усилий в элементах фермы и подбор сечений для варианта с предлагаемыми узловыми соединениями выполнялись известными методами строительной механики и сопротивления материалов. Схемы первого и второго вариантов ферм для пролета 15 м представлены на рисунках 5.2 – 5.3.

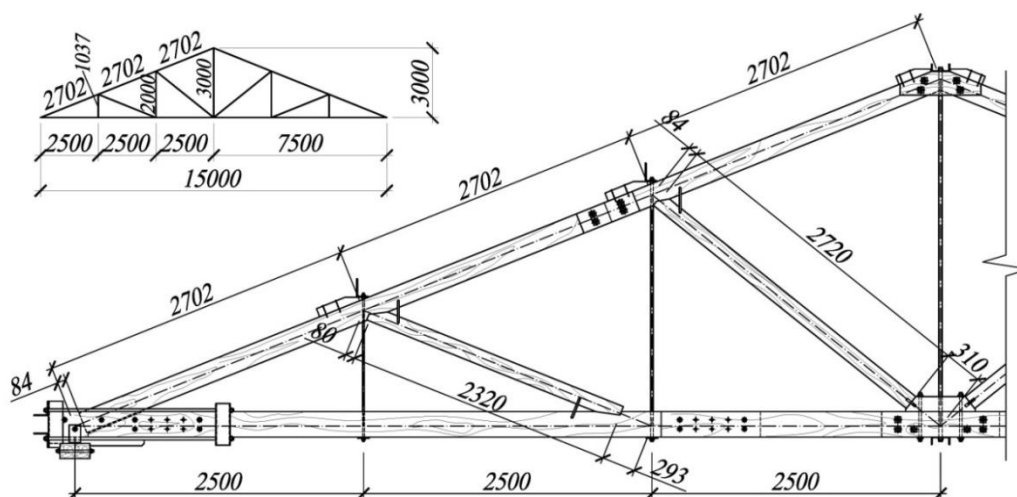


Рисунок 5.2 – Ферма 1-го варианта с узловыми соединениями на врубках

Расход древесины и металла, как основных конструктивных материалов, приведены в таблицах 5.3, 5.4 для первого и второго вариантов соответственно.

Таблица 5.3 – Расход материалов на ферму первого варианта

№ п/п	Материал	Общий объем (вес), м <sup>3</sup> (кг)
1	Древесина	1,751 м <sup>3</sup>
2	Металл	304,3 кг

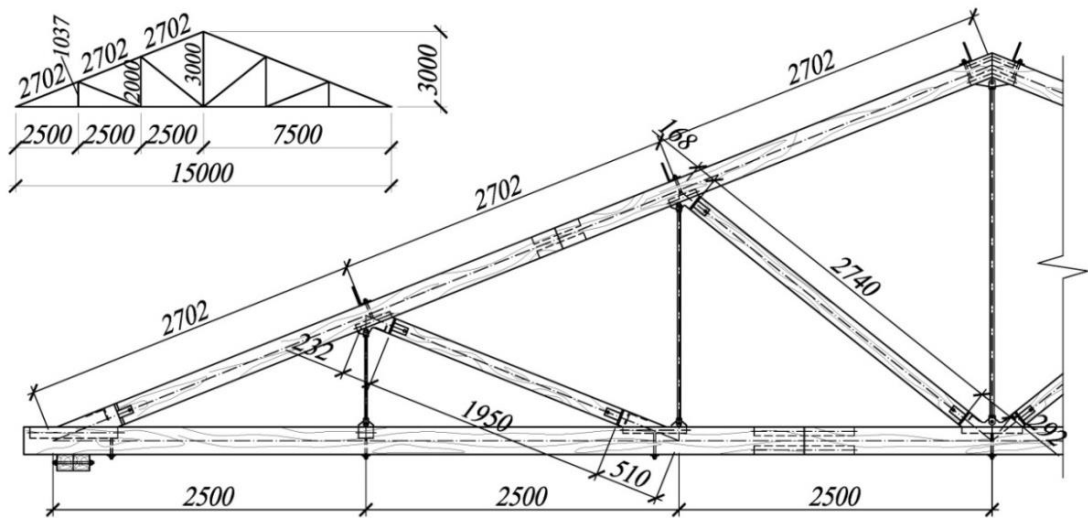


Рисунок 5.3 – Ферма 2-го варианта с узлами на стальных плоских стержнях

Таблица 5.4 – Расход материалов на ферму второго варианта

№ п/п	Материал	Общий объем (вес), м <sup>3</sup> (кг)
1	Древесина	1,321 м <sup>3</sup>
2	Металл	220,3 кг

Экономия материалов по рассмотренным вариантам составила: для древесины 0,43 м<sup>3</sup> (36 %), для металла 84 кг (27 %).

По аналогичной методике был проведен расчет ферм первого и второго вариантов исполнения при пролетах 12 м и 18 м. Угол наклона верхнего пояса к нижнему принимался таким же, как и для ферм пролетом 15 м. Шаг расстановки принят 3 м.

В расчете стоимости материалов учтены нормируемые потери на обработку и отходы. В сметах, составленных для каждого варианта, учтены и

вспомогательные материалы (гвозди, скобы, болты и т.п.). Стоимость материалов и стоимость изготовления ферм определена при помощи программы «Гранд-смета» по федеральным единичным расценкам. Трудоемкость изготовления определяли по чертежам сравниваемых вариантов ферм по единым нормам и расценкам. Величину накладных расходов определяли с учетом рекомендаций МДС 81-33.2004. Заработная плата рабочих принята по тарифным ставкам оплаты труда (база 2001 г.). Для перевода заработной платы из уровня 2001 года в уровень текущих цен применен индекс пересчета: 23,82 для основной заработной платы и 9,5 для эксплуатации машин и механизмов. Сметная прибыль согласно МДС 81-25.2001 принята в размере 65 % от средств на оплату труда.

Ниже приведены таблицы и гистограммы, в которых отражена информация для ферм двух вариантов исполнения для пролетов 12 м, 15 м, 18 м. Расход основных конструкционных материалов показан в таблице 5.5 и на гистограмме (рисунок 5.4). Основные технико-экономические показатели сравниваемых вариантов ферм приведены в таблице 5.6. Показатели стоимости материалов ферм, трудоемкости изготовления, стоимости изготовления, общей стоимости и стоимости 1м<sup>2</sup> покрытия для двух вариантов исполнения при пролетах 12 м, 15 м, 18 м показаны на гистограммах (рисунок 5.5 – 5.9).

Таблица 5.5 – Расход материалов для вариантов ферм при разных пролетах

№ п/п	Пролет, м	Расход материала			
		Фермы 1-го варианта		Фермы 2-го варианта	
		Древесина, м <sup>3</sup>	Металл, кг	Древесина, м <sup>3</sup>	Металл, кг
1	12	0,893	248,53	0,792	180,65
2	15	1,751	304,30	1,321	220,30
3	18	2,324	356,22	1,875	262,19

Таблица 5.6 – Основные технико-экономические показатели сравниваемых вариантов ферм для различных пролетов

Пролет, м	Вариант фермы	Трудоемкость изготовления, чел-час.	Стоимость		
			изготовления, руб.	материалов, руб.	общая, руб.
12	1	61	24400	43259	67659
	2	68	27200	31622	58822
15	1	65	26000	64565	90565
	2	71	28400	45174	73574
18	1	69	27600	80706	108306
	2	76	30400	58726	89126

Примечание. В предлагаемом варианте в стоимости материалов учтена стоимость клеевой композиции для вклеивания стержней.

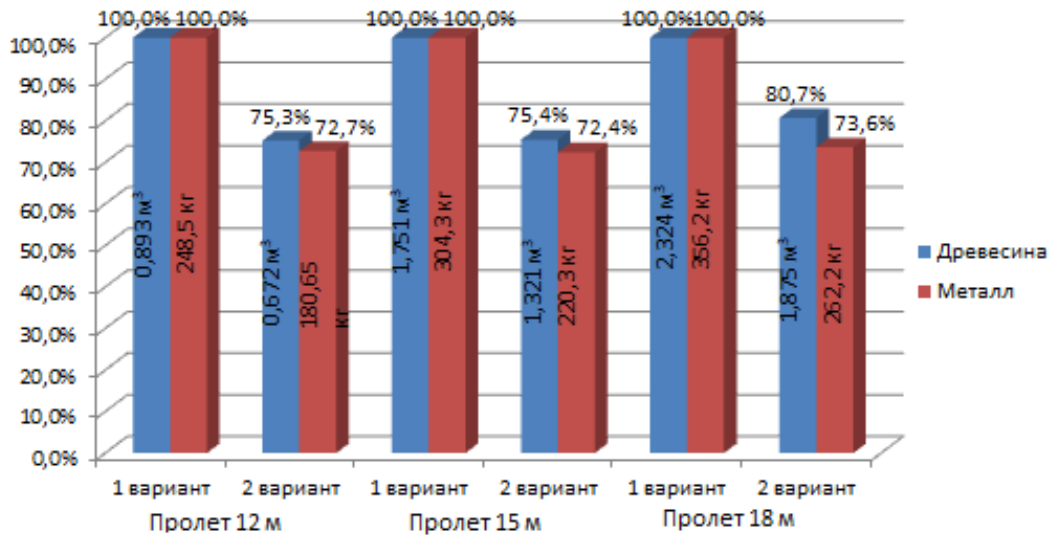


Рисунок 5.4 – Гистограмма расхода основных материалов сравниваемых вариантов ферм для пролетов 12 м, 15 м, 18 м

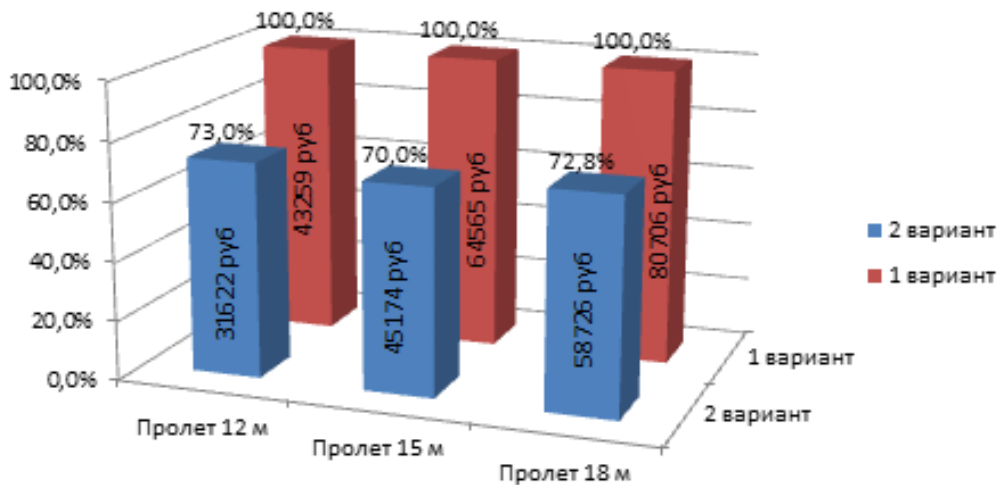


Рисунок 5.5 – Гистограмма стоимости материалов ферм сравниваемых вариантов для пролетов 12 м, 15 м, 18 м

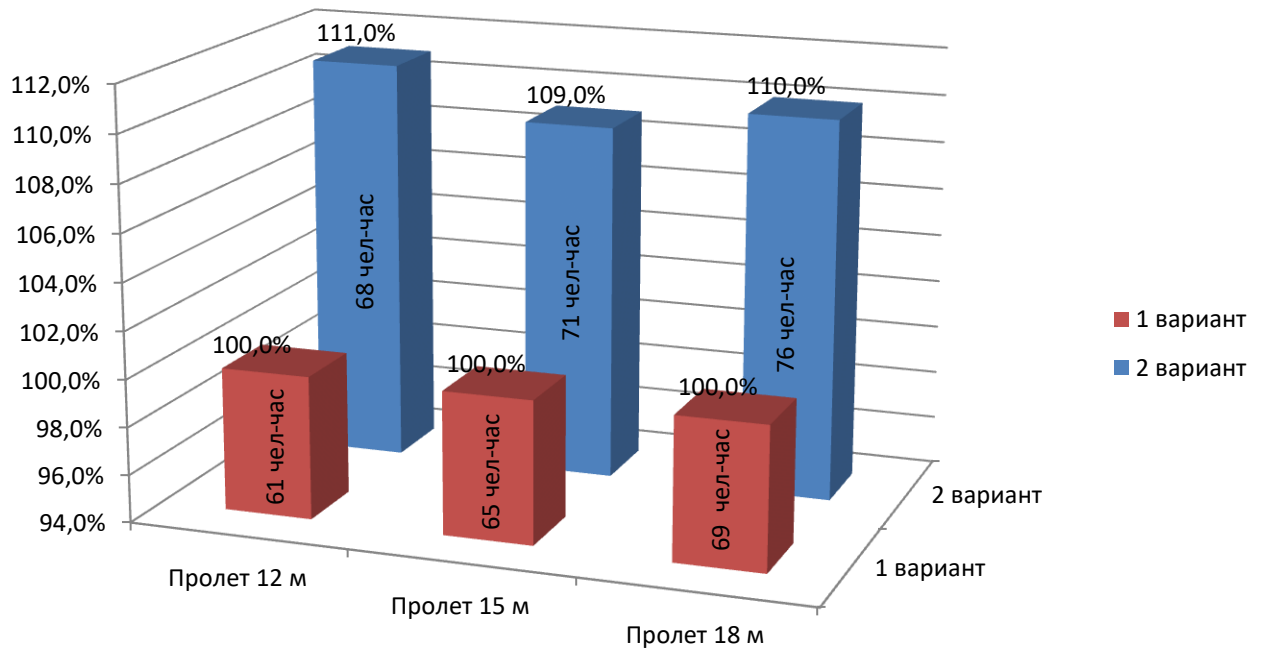


Рисунок 5.6 – Гистограмма трудоемкости изготовления ферм сравниваемых вариантов для пролетов 12 м, 15 м, 18 м

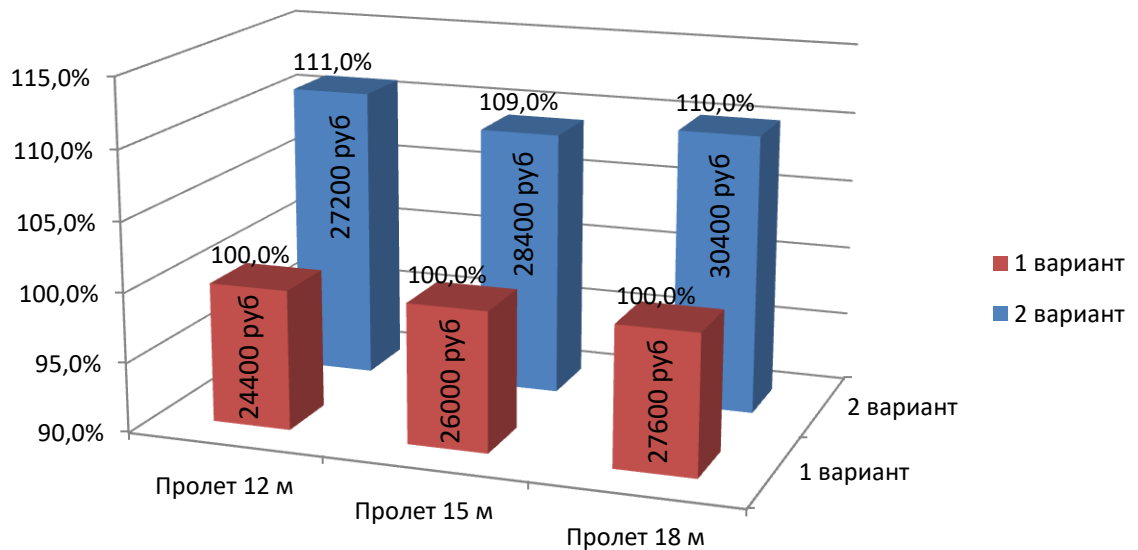


Рисунок 5.7 – Гистограмма стоимости изготовления ферм сравниваемых вариантов для пролетов 12 м, 15 м, 18 м

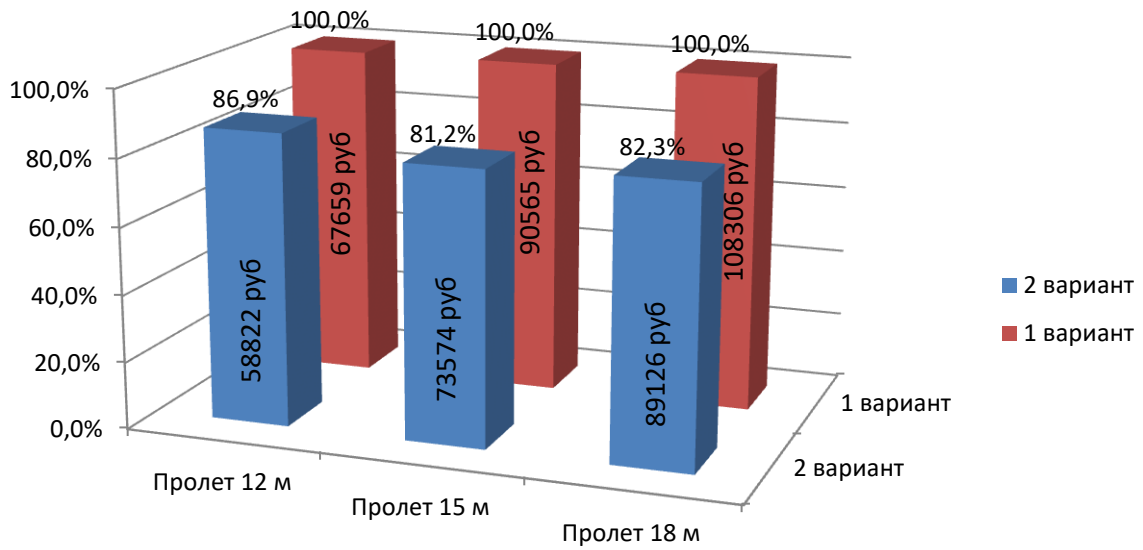


Рисунок 5.8 – Гистограмма общей стоимости ферм сравниваемых вариантов для пролетов 12 м, 15 м, 18 м

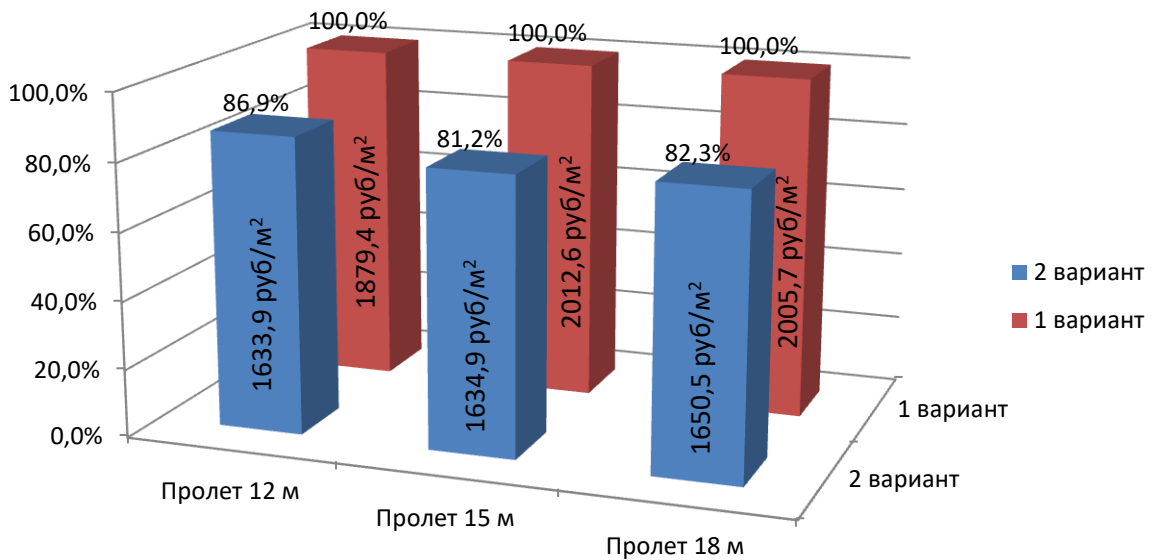


Рисунок 5.9 – Гистограмма распределения стоимости 1 м<sup>2</sup> покрытия сравниваемых вариантов для пролетов 12 м, 15 м, 18 м (без учета стоимости материалов кровельного пирога)

В ценах I квартала 2022 года сокращение стоимости в сравнении с рассмотренным аналогом на каждую стропильную ферму пролетом 12,0 м составляет 8837 рублей или 245,5 руб/м<sup>2</sup>, на стропильную ферму пролетом 15,0 м – 16991 рублей или 377,6 руб/м<sup>2</sup>, на стропильную ферму пролетом 18,0 м – 19180 рублей или 355,2 руб/м<sup>2</sup>.

## 5.6 Выводы по пятой главе

1. На базе проведенных комплексных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по конструированию, расчету и изготовлению деревянных ферм с узлами на стальных клеенных плоских стержнях.

2. Разработана инженерная методика расчета предложенного типа деревянных ферм, которая позволяет инженеру-проектировщику обоснованно конструировать и рассчитывать узловые соединения, анализировать полученные результаты, например, при численных расчетах или вариантном проектировании.

3. 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.

Дополнительную экономию материальных ресурсов возможно получить за счет уменьшения габаритной высоты фермы с 1/5 от расчетного пролета до 1/6L (сокращение эксплуатационных 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 отечественных и зарубежных 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 вклеиваемой 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 вклеиваемого стержня, которые составили:



толщина  $t_{cm} = 4 - 8$  мм, ширина  $50 \text{ мм} \leq b_{cm} \leq 100$  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 в независимости 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  $1/6 L$  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 вклеенных 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 вклеенных 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 экспериментов, 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 вклеенных 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 вклеенных 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 с узловыми соединениями на стальных клеенных плоских стержнях для пролетов 9...18 м;
- исследование возможности применения стальных клеенных плоских стержней в узлах других типов деревянных конструкций, в том числе пространственных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.С. 1807185 SU, МКИ Е 04 В 1/38. Узловое соединение стержней деревянных несущих конструкций / Б.В. Лабудин, В.Д. Попов, В.В. Яковлев, А.В. Вешняков. № 4930924/33; заявл. 23.04.91; опубл. 07.04.93. Бюл. № 13.
2. Адгезия, клей, цемент, припой / Под ред. Н. Дебройна, Р. Гувикка. – М.: Мир, 1954. – 584 с.
3. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова. – М.: Наука, 1986. – 279 с.
4. Аркаев М.А. Техничко-экономический анализ способов усиления деревянных конструкций / М.А. Аркаев, И.И. Лисицкий, М.М. Соболев, П.И. Веккер // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – №11. – С. 14 – 20.
5. Артюхин Ю.П. Напряжения в клеевых соединениях / Ю.П. Артюхин. – Исследование по теории пластин и оболочек. – Казань, 1973. – С. 3-27.
6. Ашкенази Е.К. Анизотропия механических свойств древесины и фанеры / Е.К. Ашкенази, И.П. Боксберг, Г.М. Рубенштейн, К.К. Туроверов. – М.-Л.: Гослесбумиздат, 1958. – 138 с.
7. Бойтемиров Ф.А. Испытание деревянной арки с соединениями на клеенных стержнях / Ф.А. Бойтемиров, Г.Н. Зубарев, В.М. Головина // Изв.вузов. Строительство и архитектура. – 1983. – №126. – С. 14-21.
8. Большаков В.В. Развитие и совершенствование отечественных норм проектирования деревянных конструкций / В.В. Большаков. – В сб.: Исследование физико-механических свойств древесины, строительной фанеры, пластмасс и конструкций с их применением. – М.: МИСИ, 1973. – № 95. – С. 92-98.
9. Бондин В.Ф. О прочности на сдвиг клеевых соединений стальных стержней с древесиной / В.Ф. Бондин, Ю.Б. Вылегжанин // Изв. вузов Стр-во и архитектура. – 1976. – №11. – С. 20-25.

10. Бондин В.Ф. О расчете клеевых соединений стальных стержней с древесиной в сборных узлах и укрупнительных стыках клеенных деревянных конструкций / В.Ф. Бондин, Ю.Б. Вылегжанин // Строительные конструкции и архитектура: Тр. / Краснояр. политехн. ин-т. – 1975. – Вып.3. – С. 36-38.
11. Бондин В.Ф. Расчет прочности на выдергивание стальных стержней, вклеенных в древесину / В.Ф. Бондин, Б.И. Евдокимов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1974. – №7. – С. 32-37.
12. Вдовин В.М. Вклеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: моногр. / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.
13. Вдовин В.М. Вклеенные кольцевые шпонки в соединениях деревянных конструкций / В.М. Вдовин, В.Н. Карпов, М.С. Галахов. – Пенза: Издательство ПГУАС, 2011. – 172 с.
14. Вдовин В.М. К оценке напряженно-деформированного состояния деревянных элементов, соединенных центровыми вклеенными шпонками / В.М. Вдовин, А.И. Мухаев, М.В. Арискин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 2. – С. 81–90.
15. Вдовин В.М. Клееметаллические соединения в несущих деревянных конструкциях / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, С.Ю. Кравцов // Региональная архитектура и строительство. – 2007. – № 1. – С. 122–128.
16. Вдовин В.М. Экспериментальные исследования жёстких узлов балочных структур из клеёных деревянных элементов / В.М. Вдовин, Д.Д. Ишмаева // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – С. 130-137.
17. Ветрюк И.М. Исследование работы когтевых шайб Леннова в соединениях клееных элементов / И.М. Ветрюк // Строительные конструкции и теория сооружений. Строительные конструкции. – Минск, 1971. – С. 157-164.

18. Водяников М.А. Деформативность и несущая способность узлов стыка деревянных конструкций на стальных и углепластиковых нагелях / М.А. Водяников, Г.Г. Кашеварова, П.С. Штро // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – Т. 2. – С. 50-56.
19. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика. – 1981. – 263 с.
20. Ву Ба Кием. Исследование прочностных и деформационных свойств эпоксидных клеев и клеевых соединений на их основе: Автореф. дис...канд. техн. наук / Ву Ба Кием. – М., 1989. – 15 с.
21. Вылегжанин Ю.Б. Исследование работы соединений на клеенных в древесину стальных стержнях: Автореф. дис. канд. техн. наук / Ю.Б. Вылегжанин. – М., 1980. – 18с.
22. Гаппоев М.М. Конструкции из дерева и пластмасс / М.М. Гаппоев, И.М. Гуськов, Л.К. Ермоленко [и др.] // Учебник. – М: Издательство АСВ, 2004. – 440 с.
23. Гете К.Г. Атлас деревянных конструкций / К.Г. Гете, Д. Хоор, К. Меллер, Ю. Наттерер, пер. с нем. Н.И. Александровой; под ред. В.В. Ермолова. М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.
24. ГОСТ 103-2006. Прокат сортовой стальной горячекатаный полосовой. Сортамент. Введ.01.07.2009. М.: Стандартиформ, 2009. – 10 с.
25. ГОСТ 19903-2015. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. Введ.01.09.2016. М.: Стандартиформ, 2016. – 12 с.
26. ГОСТ 2140-81. Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения. Введ. 1982.01.01. М.: Стандартиформ, 2006. – 118 с.
27. ГОСТ 24454-80\*. Пиломатериалы хвойных пород. Размеры. Введ. 1981.01.01. М.: ИПК издательство стандартов, 2000. – 3 с.

28. ГОСТ 33082-2014 Конструкции деревянные. Методы определения несущей способности узловых соединений / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – институт ОАО «НИЦ «Строительство». – М.: 2015. – 14 с.
29. ГОСТ 8486-86\*. Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия. Введ. 1988.01.01. М.: ИПК издательство стандартов, 2000. – 14 с.
30. ГОСТ Р 56710-2015 Соединения на клеенных стержнях для деревянных конструкций. Технические условия / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – институт ОАО «НИЦ «Строительство». – М.: Стандартиформ, 2019. – 8 с.
31. ГОСТ Р 58933-2020 Шпонки металлические кольцевые для деревянных конструкций. Технические условия / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – институт ОАО «НИЦ «Строительство». – М.: 2020. – 10 с.
32. Громацкий В.А. Составные клееные деревянные элементы с наклонно клееными металлическими связями / В.А. Громацкий, И.М. Зотова, С.Б. Турковский // Экспресс-информация. Строительство и архитектура. Серия II. Строительные конструкции, – М., 1983. – вып.10.
33. Губенко А.Б. Клееные деревянные конструкции в строительстве / А.Б. Губенко. – М.: Госстройиздат, 1957. – 240 с.
34. Деревягин В.С. Безметалльные составные балки и металлодеревянные сборные фермы / В.С. Деревягин. – Москва: Стройиздат, 1947. – 80 с.
35. Дмитриев П.А. Исследование клефанерных рам со сборными узлами / П.А. Дмитриев, В.Ф. Бондин, Ю.А. Добрынин, В.Г. Сипаренко // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. – 1975. – №3. – С. 23-25.
36. Дмитриев П.А. Основные положения по проектированию несущих и ограждающих конструкций деревянных каркасных зданий / П.А. Дмитриев, В.Ф. Бондин // Новосиб. инж.-строит. ин-т им. В.В. Куйбышева. – Новосибирск, 1980. – 80 с.

37. Дмитриев П.А. Цельнодеревянные треугольные фермы пролетом 12 м с креплениями на металлических пластинах с зубьями-дюбелями / П.А. Дмитриев, В.В. Пуртов // Инф. Листок №498-86. – Новосибирск: ЦНТИ, 1986. – 3 с.
38. Дмитриев П.А. Экспериментальные исследования соединений элементов деревянных конструкций на металлических и пластмассовых нагелях и теория их расчета с учетом упруго-вязких и пластических деформаций: Автореф. дисс. ... доктора техн. наук. / П.А. Дмитриев. – Новосибирск, 1975. – 67 с.
39. Евдокимов Б.И. Соединения элементов деревянных конструкций на клеенных вдоль волокон стержнях из стали и стеклопластика: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. / Б.И. Евдокимов. – Новосибирск, 1992. – 18 с.
40. Жаданов В.И. Результаты испытаний клефанерной совмещенной стеновой панели размером 1,5×3,0 м / В.И. Жаданов, Е.В. Тисевич, Д.А. Украинченко // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт», 2008. – № 2/18 (543). – С. 3-8.
41. Жилкин В.А. Экспериментальное определение функций перемещений точек деревянной поверхности при выдергивании из нее стального стержня / В.А. Жилкин, Л.А. Борыняк // Изв. вузов. Стр-во и архитектура, – 1979. – №5. – С. 135-136.
42. Зенкевич О. Метод конечных элементов. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
43. Знаменский Е.М. Совершенствование нормирования расчетных характеристик элементов деревянных конструкций / Е.М. Знаменский // Разработка и совершенствование деревянных конструкций: Сб. науч. тр./ ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1989. – С. 36-47.
44. Золотов М.С. Исследование напряженно-деформированного состояния анкерного соединения на эпоксидном клее: Автореф. дис. канд. техн. наук. / М.С. Золотов. – Харьков, 1971. – 20 с.



45. Зубарев Г.Н. Испытание и расчет соединений деревянных конструкций / Г.Н. Зубарев, М.П. Логинова, В.М. Головина // Сб. науч. тр. / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М., 1981. – С. 83-92.
46. Иванов В.Ф. Исследование работы нагельных соединений в пределах упругости / В.Ф. Иванов, Л.Н. Мальцев // Труды Ленинградского института инженеров коммунального строительства, – Л.-М., 1939. – вып.6. – С. 73-112.
47. Иванов Ю.М. Длительная несущая способность деревянных конструкций / Ю.М. Иванов // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. – 1972. – №11. – С. 6-12.
48. Инжутов И.С. Исследование напряженно-деформированного состояния крупноразмерной ребристой плиты с обшивкой, приклеенной на части длины конструкции / И.С. Инжутов, В.И. Жаданов, В.М. Никитин // Известия ВУЗов. Строительство. – 2008. – № 7. – С. 4-10.
49. Калугин А.В. Клееные деревянные конструкции в современном строительстве / А.В. Калугин // Промышленное и гражданское строительство. Труды Пермского государственного технического института. – М., 2011, №7(ч.2). – С. 32-37.
50. Карлсен Г.Г. Деревянные конструкции / Г.Г. Карлсен, В.И. Большаков и др., под ред. Г.Г. Карлсена, 3-е изд, перер. и доп. – М., Госстройиздат, 1961. – 644 с.
51. Кашеварова Г.Г. Композитные решения стыков клееных деревянных конструкций / Г.Г. Кашеварова, М.А. Водяников // Сборник: Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году. Сборник научных трудов Российской академии архитектуры и строительных наук. Москва, 2018. – С. 247-253.

52. Ковальчук Л.М. Склеивание древесных материалов с пластмассами и металлами / Л.М. Ковальчук – М.: Лесная промышленность, 1968. – 239 с.
53. Котлов В. Г. Пространственные конструкции из деревянных ферм с узловыми соединениями на МЗП: Автореф. дисс. ...канд. техн. наук: 05.23.01. / В. Г. Котлов – Казань, 1992. – 16с.
54. Котов Н.Ф. Металлические крепления деревянных конструкций / Н.Ф. Котов. - Технический отчет № 6207 за 1936 г., Техн. архив ЦНИПС.
55. Коченов В.М. Несущая способность элементов соединений деревянных конструкций / В.М. Коченов. – М.: Госстройиздат, 1953. – 320 с.
56. Курышев М.А. Деревянные конструкции аэродромных сооружений [Текст] / Инж.-подполк. М. А. Курышев ; Ленингр. краснознам. воен.-воздуш. инж. акад. – Ленинград : [б. и.], 1948-1949. – 2 т.; 22 см. Ч. 1 и 2 [Текст]. – 1948. – 258 с.: черт.
57. Лабудин Б.В. Влияние статико-геометрических параметров на материалоемкость пространственных деревянных конструкций / Б.В. Лабудин, А.В. Вешняков // Проблемы развития строительного комплекса в условиях становления рыночных отношений: тр. межд. науч.-техн. конф. 26-27 июня 1997 г. – Архангельск, 1997. – С. 32-34.
58. Лабудин Б.В. Металлодеревянные фермы / Б.В. Лабудин, А.Ю. Гурьев, Л.П. Каратеев, Ш.М. Мамедов. – Архангельск, 2015. – 205 с.
59. Лабудин Б.В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой / Б.В. Лабудин. – Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2007. – 267 с.
60. Леннов В.Г. Штампованные когтевые шайбы, как новый тип связей элементов деревянных конструкций / В.Г. Леннов // Труды Горьк. инженер.-строит. ин-т. Горький, 1949. – Вып. 1. – С. 169-181.

61. Лентяшин А.В. Расчет нагельных сопряжений / А.В. Лентяшин // Сборник статей и аннотаций по деревянным конструкциям. – М.-Л.: Госстройиздат, 1934. – С. 52-61.
62. Линьков В.И. Деревянные конструкции на основе составных элементов с соединениями на наклонных металлических стержнях без применения клея: автореферат дис. ... доктора технических наук / В.И. Линьков. – М., 1994. – 44с.
63. Линьков И.М. Сцепление арматуры с древесиной при склеивании эпоксидно-цементным клеем / И.М. Линьков, В.М. Соротокин // Изв.ву-зов. Стр-во и архитектура. – 1969. – №10. – С. 30-34.
64. Лисицкий И.И. Деревянные фермы с узловыми соединениями на стальных вклеенных пластинах / И.И. Лисицкий, И.И. Яричевский, В.И. Жаданов, И.В. Руднев // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – №11. – С. 8 – 13.
65. Лисицкий И.И. Деревянные фермы с узлами на вклеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Эффективные строительные конструкции: теория и практика. Сборник статей XIX Международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский дом знаний. – 2019. – С. 82-91.
66. Лисицкий И.И. Деревянные фермы с узловыми соединениями на вклеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – №4. – С. 9-15.
67. Лисицкий И.И. Длительные испытания деревянной фермы с соединениями элементов на вклеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2020. – №1. – С. 34-45.
68. Лисицкий И.И. Способы повышения несущей способности соединений деревянных конструкций на стальных вклеенных пластинах / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.В. Руднев, // Известия ВУЗов. Строительство. – 2018. – №5. – С. 31-43.

69. Лисицкий И.И. Узловые соединения ферменных конструкций на основе клеенных плоских стержней / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Вестник ПГТУ. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – Йошкар-Ола, 2019. – №3 (11). – С. 59 – 68
70. Лисицкий И.И. Численные исследования узлов цельнодеревянных ферм на стальных клеенных плоских стержнях / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов // Вестник ПГТУ. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – Йошкар-Ола, 2020. – №4. – С. 64 - 77
71. Маслов В.Н. Расчет болтового, работающего на разрыв, стыка деревянной фермы, как упругой балки / В.Н. Маслов // Науч. тр. Моск. ин-та инженеров ж.-д. трансп. – 1926. – Вып. 2. – С. 46-64.
72. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
73. Миронов В.Г. Влияние влажности древесины на ползучесть соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах / В.Г. Миронов, В.А. Цепаев, А.В. Авдеев // Деревообраб. промышленность. – 2000. – №1. – С. 26-28.
74. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. – М.: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
75. Найчук А.Я. Численные исследования прочности деревянных балок со сквозными трещинами усиленных наклонно клееными стержнями / А.Я. Найчук, В.С. Чернолоз, А.Н. Иванюк // Сборник научных трудов. Ресурсосберегающие материалы, конструкции, здания и сооружения. Украина, Ровно, НУВХП, 2008. – Вып.16, часть 2. – С. 278-281.
76. Накашидзе Б.В. Распределение продольных напряжений в уровне контактного слоя арматуры и древесины / Б.В. Накашидзе // Исследование мостовых конструкций: Сб.научн.тр. / Хабаровский политехнический институт, 1972. – С. 40-43.

77. Наумов А.К. Исследование соединений легких деревянных несущих конструкций на металлических зубчатых пластинах. Дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. / А.К. Наумов. — Москва, ЦНИИЭПсельстрой, 1975. — 143 с.
78. Николаи Б.Л. Теория расчета нагельных соединений в деревянных конструкциях / Б.Л. Николаи. — Харьков, Гостехиздат, 1935. — 62 с.
79. Овчинникова И.Г. Исследование клееных деревянных ферм на вклеенных стержнях / И.Г. Овчинникова // Строительная механика и расчет сооружений. — 1981. — №4. — С. 70-83.
80. Овчинникова И.Г. Оценка напряженно-деформированного состояния вклеенных в древесину стержней при выдергивании / И.Г. Овчинникова // Несущие деревянные конструкции: Сборник научных трудов / — М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1981. — С. 25-28.
81. Орлович Р.Б. Решение плоской контактной задачи для анизотропных тел методом конечных элементов / Р.Б. Орлович // Конструкции из клееной древесины и пластмасс. — Л. 1983. — С. 91-96.
82. Орлович Р.Б. Тенденции в развитии соединений деревянных конструкций в строительстве за рубежом / Р.Б. Орлович, З. Гиль, П.А. Дмитриев // Известия ВУЗов. Строительство. — 2004. — № 11. — С. 4-9.
83. Оспанова Ж.Н. Несущая способность и деформативность соединений элементов деревянных конструкций на вклеенных стальных стержнях с учетом действия основных эксплуатационных факторов. Дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. / Ж.Н. Оспанова. — Москва, 1984. — 262 с.
84. Пат. 144669 Российская Федерация, МПК E04B 1/38. Жёсткий узел сопряжения элементов балочных конструкций на вклеенных шайбах и стальных накладках / В.М. Вдовин, Д.Д. Ишмаева; патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУАС — №2014103649/03; заявл. 03.02.2014; опубл. 27.08.2014. — Бюл.№24. — 2 с.

85. Патент 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. – Оpubл. 19.10.17. М.: Бюлл. № 29. – 6 с.
86. Патент 2693984 Российская Федерация, МПК E04B 1/58, E04C 3/16. Опорный узел деревянной фермы / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.П. Пинайкин. Оpubл. 08.07.19. М.: Бюлл. № 19
87. Патент 2705118 Российская Федерация, МПК E04B 1/58. Узловое соединение деревянных стержней / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.В. Руднев, Е.А. Чайкин Оpubл. 05.11.19. М.: Бюлл. № 31.
88. Патент 2727977 Российская Федерация, МПК E04B 1/38. Шарнирный опорный узел деревянной фермы / И.И. Лисицкий, А.О. Эрзяйкина, Р.В. Жабасова. Оpubл. 28.07.20. М.: Бюлл. № 22.
89. Патент 2763279 Российская Федерация, МПК E04B 1/14. Узел соединения элементов деревянных и металлодеревянных конструкций / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.И. Лисицкий. Оpubл. 28.12.2021. М.: Бюлл.№1.
90. Патент № 5521, МПК B27F 1/16, E04B 1/38. Соединение деревянных частей в конструкциях посредством кольцевого шипа, вставляемого в кольцевые пазы соединяемых частей / К. Тухшерер. № 12755; заявл. 11.09.1926; опубл. 31.05.1928.
91. Патент №2763280 Российская Федерация, МПК E04B 1/14. Узловое соединение элементов деревянных и металлодеревянных конструкций / И.И. Лисицкий, В.И. Жаданов, И.И. Лисицкий Оpubл. 28.12.2021. М.: Бюлл.№1.
92. Пинайкин И.П. Работа стальных стержней, вклеенных поперек волокон древесины, в узлах деревянных конструкций: автореф. дис. канд. тех. наук. / И.П. Пинайкин. – Новосибирск, 1988. – 15 с.
93. Пискунов Ю.В. Соединения типа «нагельные группы» и пути их использования для изготовления конструкций комплектной поставки /

- Ю.В. Пискунов // Проектирование и изготовление деревянных конструкций с соединениями на металлических нагельных пластинах и нагельных группах: Сб. докл. к Международной конф. 1-3 сент. 1992 г. – Киров, 1992. – С. 26-34.
94. Попов Е.В. Испытание на сдвиг элементов деревянных конструкций, соединенных с применением зубчатых шайб «Bulldog» / Е.В. Попов, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Курск, 2015. – С. 189-198.
95. Пособие по расчетным характеристикам клеевых соединений строительных конструкций / Под ред. Иванова Ю.М. – М.: Стройиздат, 1972. – 57 с.
96. Пуртов В.В. Легкие деревянные стропильные фермы с соединениями на стальных пластинах и дюбелях. Дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. / В.В. Пуртов. – Новосибирск, НИСИ, 1988. – 279 с.
97. Пуртов В.В. Сборные фермы из клееной древесины с соединениями на металлических пластинах с зубьями-дюбелями / В.В. Пуртов, А.В. Павлик // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2004. – № 9 (549). – С. 113-118.
98. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1981. – С. 41.
99. Рекомендации по контролю качества клеевых соединений деревянных клеёных конструкций. – М.: Стройиздат, 1981. – С. 63.
100. Римшин В.И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах / В.И. Римшин, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов [и др.] // Вестник МГСУ. – 2016. – № 9. – С. 35-50.
101. Роличюс И.В. Исследование соединений растянутых элементов на наклонно-вклеенных и клеевинченных стержнях / И.В. Роличюс, В.П. Кассиров, С.Б. Турковский // Исследование зависимости прочности деревянных конструкций от технологии их изготовления. – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1982. – С. 171-176.

102. Рощина С.И. Армирование деревянных балок стальной тросовой арматурой по криволинейной траектории в зонах анкеровки. Анализ напряженного состояния и технологических перспектив / С.И. Рощина, М.В. Лукин, М.С. Сергеев, Т.О. Глебова, А.А. Кощев // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2017. – №6. – С. 80-81.
103. Рощина С.И. Армированные деревянные конструкции / С.И. Рощина, М.С. Сергеев, А.В. Лукина // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2013. – №4. – С. 80-85.
104. Рощина С.И. Исследование показателей прочности клеенных в древесину стержней из различных материалов / С.И. Рощина, М.В. Лукин, А.С. Грибанов, А.А. Кощев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2019. – №4. – С. 57-62.
105. Руднев И.В. Выдергивание стальных пластин, клеенных в древесину. Аналитический расчет и эксперимент / И.В. Руднев, В.И. Жаданов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – Чебоксары, 2015. – №3. – С. 109-121.
106. Руднев И.В. Методика расчета соединений элементов деревянных конструкций на клеенных стальных пластинах / И.В. Руднев, В.И. Жаданов // Вестник Оренбургского государственного университета. – Оренбург, 2015. – №5. – С. 155-161.
107. Руднев И.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин / И.В. Руднев, В.И. Жаданов, С.В. Лисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. Новосибирск, 2014. – №4. – С. 5–8.
108. Руднев И.В. Узловые соединения деревянных элементов на клеенных стальных пластинах. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. / И.В. Руднев. – Оренбург, 2015. – 171 с.
109. Руководство по тензометрированию строительных конструкций и материалов: Отдел научно-технической информации НИИЖБ. –



Москва: Производственные экспериментальные мастерские ЦИНИСКА Госстроя СССР, 1971. – 313 с.

110. Руководство по изготовлению и контролю качества деревянных клееных конструкций / Центр, н.-и. ин-т строит, конструкций им. В.А. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1982. – 79 с.
111. Руководство по обеспечению долговечности деревянных клеёных конструкций при воздействии на них микроклимата зданий различного назначения и атмосферных факторов. – М.: Стройиздат, 1981. – 96 с.
112. Руководство по проектированию клеёных деревянных конструкций. – М.: Стройиздат, 1977. – 189 с.
113. Рыбин Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов / Ю.И. Рыбин. – СПб.: Наука, 2004. – 644 с.
114. Сарычев В.С. Экономика деревянных конструкций / В.С. Сарычев // Московский инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева. – М.: МИСИ им. Куйбышева, 1977. – 129 с.
115. Сарычев В.С. Эффективность применения железобетонных, металлических и деревянных конструкций / В.С. Сарычев. – М.: Стройиздат, 1977. – 223 с.
116. Слицкоухов Ю.В. Конструкции из дерева и пластмасс / Ю.В. Слицкоухов, В.Д. Буданов, М.М. Гаппоев и др.; под ред. Г.Г. Карлсена и Ю.В. Слицкоухова. – М.: Стройиздат, 1986. – 543 с.
117. Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте. // Материалы III Международной научно-технической конференции. – Самара, 2005. – 270 с.
118. Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс. // Материалы 12 Международного симпозиума. – Одесса, 2007. – 288 с.

119. Соротокин В.М. О прочности и деформативности клеевого соединения арматуры с древесиной / В.М. Соротокин, А.Б. Шолохова, А.С. Фрейдин // Разработка и исследование клееных деревянных и фанерных армированных конструкций: Труды ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М. 1972. – Вып.24. – С. 40-46.
120. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\* / Министерство регионального развития РФ. – М: 2011. – 145 с.
121. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – институт ОАО «НИЦ «Строительство». М.: 2011. – 80 с.
122. СП 28.13330.2012. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11–85 / Министерство регионального развития РФ. – М: ФАУ «ФЦС», 2012. – 93 с.
123. СП 382.1325800.2017. Конструкции деревянные клееные на клеенных стержнях. Методы расчета. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – институт ОАО «НИЦ «Строительство». – М.: 2017. – 38 с.
124. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная версия СНиП II-25-80. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – институт ОАО «НИЦ «Строительство». – М.: 2017. – 97 с.
125. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М.Н. Степнов, А.В. Шаврин. - М.: Машиностроение, 2005. – 399 с.
126. СТО 365544501-002-2006. Деревянные клееные и цельнодеревянные конструкции. Методы проектирования и расчета. Стандарт организации – М: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2006. – 74 с.
127. Суменко М.А. Податливость наклонно клеенных связей составных деревянных балок / М.А. Суменко // Строительный эксперт. №19/2004.
128. Турков А.В. Экспериментальная оценка степени податливости укрупнительных стыков балок по результатам динамических

- исследований / А.В. Турков, П.А. Гвозков, О.В. Бояркина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – №7. – С. 122-124.
129. Турков А.В. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок из деревянных элементов на динамические и статические нагрузки / А.В. Турков, А.А. Макаров // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – №3. – С. – 275-280.
130. Турковский С.Б. Исследование монтажных узловых соединений клеёных деревянных конструкций / С.Б. Турковский, В.В. Саяпин // Несущие деревянные конструкции: Сборник научных трудов / ЦНИИСК им. Кучеренко, – М., 1981. – С. 92-105.
131. Турковский С.Б. Клееные деревянные конструкции с узлами на вклеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК) / С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев, И.П. Преображенская. – М.: РИФ «Стройматериалы», 2013. – 308 с.
132. Турковский С.Б. Создание деревянных конструкций системы ЦНИИСК на основе наклонно вклеенных стержней / С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев // Промышленное и гражданское строительство. Труды института. – М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2007. – №3. – С. 6-8.
133. Федосов С.В. Индустриальные деревянные конструкции на металлических зубчатых пластинах / С.В. Федосов, В.Г. Котлов, А.А. Актуганов // Известия вузов. Строительство. – 2013, № 11-12. – С. 39-42.
134. Фрейдин А.С. Выносливость соединений элементов деревянных конструкций на вклеенных арматурных стержнях / А.С. Фрейдин, Ж.Н. Осипова, С.В. Поветкин // Строительство и архитектура. Сер. 8. Строительные конструкции: Экспресс-информ.: отечеств. произв. опыт. ВНИИС. – М., 1985. – Вып. 12. – С. 5-11.

135. Халтурин Ю.В. Соединения элементов деревянных конструкций с передачей усилий стальным стержням, клееным поперек волокон: автореф. дис. канд. тех. наук. / Ю.В. Халтурин. – Новосибирск, 1986. – 23 с.
136. Хисамов Р.И. Покрытия из пространственных деревянных ферм с соединениями на МЗП / Р.И. Хисамов, В.Г. Котлов // Прогрессивные пространственные конструкции и перспективы их применения: тез. докл. науч.-техн. конференции. – Свердловск. – 1985. – 74 с.
137. Цвигман Г.А. Расчет гвоздевых сопряжений // Сборник статей и аннотаций по деревянным конструкциям. – 1934. – С. 61-88.
138. Цапаев В.А. Коэффициент надежности соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах / В.А. Цапаев, М.В. Колобов // Жилищное строительство, 2008. – №5. – С. 26-27.
139. Шевченко А.Е. Вклеенные нагели в соединениях элементов деревянных конструкций: Автореферат диссертации канд. техн. наук. / А.Е. Шевченко. – Киев, 1985. – 21 с.
140. Шмидт А.Б. Атлас строительных конструкций из клееной древесины и водостойкой фанеры: учеб. Пособие / А.Б. Шмидт, П.А. Дмитриев. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 291 с.
141. Щуко В.Ю. Оценка работы армированных деревянных балок во времени / В.Ю. Щуко, С.А. Щуко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1969. – № 7. – С. 28-31.
142. Blass H.J., Schädle P. Ductility aspects of reinforced and non-reinforced timber joints / H.J. Blass, P. Schädle // Engineering Structures. 2011. Vol. 33. Pp. 3018–3026.
143. Coland M. The stress in cemented joints / M. Coland, E. Reissner // Tr. ASME. v. 11. 1944. №1. – P. A-17.
144. Goodier J.H. Transmission of tension from a bar to plate. Trans. / J.H. Goodier, C.S. Hsu // ASME Ser. E.J. Appl. Mech. – 1954. – vol.21. №2. – Pp. 147-150.

145. Gustafsson P.J. Predicting the pull-out strength of glued-in rods. Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort / P.J. Gustafsson, E. Serrano. - Canada, July-August 2000.
146. Hilson B.O. Joints with Dowel-type Fasteners — Theory. Paper C3: Timber Engineering Step 1: Basis of Design, Material Properties, Structural Components and Joints / B.O. Hilson // Almere, The Netherlands, Centrum Hout. 1995. C3/1-C3/11.
147. Johanson K.W. Theory of timber connections / K.W. Johanson // International Association for Bridge and Structural Engineering. 1949. – No. 9. – Pp. 249–262.
148. Lantos G. Test results on Midl Steel Reinforced Glulam Tumber Beams Reprint in Timber Technology / G. Lantos. – 1966. – v.11. №9. – P. 11.
149. Malinowski C. Zur Geschichte der Verbindungstechnik-Verbinder aus Stahlblech / C. Malinowski // Bauen mit Holz. 1989. – Bd. 11. Pp. 776–779; Bd. 12. Pp. 872–877.
150. Muki R., Sternberg E. Elastolatic load-transfer to half-space from a partially embedded axially loaded rod / R. Muki, E. Sternberg // Jnt. J. Solids Structures. – 1970. – vol. 6. – Pp. 69-90.
151. Reissner E. Note on the problem of the distribution of stress in a thin stiffened elastic sheet / E. Reissner // Proc. Nat. Acad. Sci. (USA). – 1940. – vol. 26. №4. – P. 300-305.
152. Smith I. Short-term load-deformation relationship for joints with dowel type connectors. Ph.D. Thesis / I. Smith. - CNAА , 1983.
153. Wilkinson T.L. Dowel bearing strength / T.L. Wilkinson // Res. Pap. FPL - Rp-505. US DA Forest Serv., Forest Prod. Lab, Madison, WI, 1991. 12 p.
154. Wood construction connectors. 2009-2010. [Electronic resource]. - Access mode: [http: // www.who-sells-it.com](http://www.who-sells-it.com).

## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

**Акты о внедрении результатов диссертации**

Утверждаю  
 проректор по учебно-методической работе

  
 А.И. Моргучев  
 «22» марта 2022 г.



**АКТ**  
**о внедрении результатов**  
**диссертационного исследования в учебный процесс**

Результаты диссертационного исследования по теме «Деревянные фермы с узлами на стальных плоских стержнях», выполненного на кафедре «Строительные конструкции» в Оренбургском государственном университете внедрены в учебный процесс на кафедре «Строительные конструкции» Архитектурно-строительного института Уфимского государственного нефтяного технического университета на основании решения кафедры (протокол №10 от «17» марта 2022 г.).

Указанные результаты включены в курс «Инновационные конструкции из дерева и полимеров» для направления подготовки 08.04.01 «Строительство» по магистерской программе «Промышленное и гражданское строительство» (МПГ04).

Доцент кафедры  
 «Строительные конструкции»,  
 канд. техн. наук



П.А. Федоров

Профессор кафедры  
 «Строительные конструкции»,  
 д-р техн. наук



И.В. Недосеко

Заведующий кафедрой  
 «Строительные конструкции»,  
 профессор PhD



А.Н. Рязанов



# АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «МЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАВОД»

462403, Оренбургская область, город Орск, проспект Мира 4 корпус 3А  
ИНН 5614057287; КПП 561401001; ОГРН 1115658026131  
тел.: +7(3537)450-200, факс: +7(3537)450-300

e-mail: office@amz-orsk.ru

" 21 " \_\_\_\_\_ июня 20 22 г.

№ \_\_\_\_\_

## АКТ

### о внедрении результатов научных исследований

Данным актом свидетельствуем, что при разработке проектно-строительной документации на восстановление конструкций покрытия здания склада хранения комплектующих материалов, размерами в плане 12,0 x 54,0 м, применены фермы из цельной древесины с узлами на клеенных стальных плоских стержнях, разработанные сотрудниками кафедры строительных конструкций Оренбургского государственного университета д.т.н. Жадановым В.И. и инженером Лисицким И.И.

Применение деревянных ферм с узлами на стальных плоских стержнях позволило снизить общую стоимость восстановления на 23% в сравнении с вариантом покрытия из стальных конструкций.

Генеральный директор  
АО «Механический завод»



М.В. Иванюк



ДЕКЛАРАЦИЯ  
Eurasian Conformity  
О СООТВЕТСТВИИ





Акционерное общество  
**«ОРЕНБУРГСКИЙ  
СТАНКОЗАВОД»**

Ногина ул., д. 6, Оренбург, 460009  
Телефон (3532) 37-59-00, Факс (3532) 37-26-00  
<http://www.orstan.ru> e-mail: [orstan2008@mail.ru](mailto:orstan2008@mail.ru)  
ОКПО 00221540, ОГРН 1025601719043,  
ИНН/КПП 5611021211/561101001

«16» февраля 2022г. № 16/02-01

**АКТ**

**о внедрении результатов научной работы**

Настоящим актом свидетельствуем, что разработанные инженером кафедры «Строительные конструкции» Оренбургского государственного университета Лисицким И.И. (под руководством д.т.н., профессора Жаданова В.И.) деревянные фермы с узлами на клеенных стальных плоских стержнях утверждены к применению в проекте реконструкции стропильной системы административно-бытового корпуса АО «Оренбургский станкозавод». Здание АБК имеет размеры в плане 12,0 x 36,0 м. Применение деревянных ферм в покрытии позволило снизить стоимость проекта на 14%, в сравнении с представленными аналогами, разработанными на основе стальных конструкций.

По плану развития завода реконструкция стропильной системы здания АБК назначена на III квартал 2024 года.

Генеральный директор  
АО «ОРСТАН»



С.А. Севрюков



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по воспитательной работе,  
д.т.н., профессор,  
Поволжского государственного  
технологического университета

Котлов В.Г.

«19» мая 2022.

## АКТ

о внедрении результатов диссертации Лисицкого Ивана Ивановича в учебный процесс кафедры «Строительные конструкции и водоснабжение» института строительства и архитектуры Поволжского государственного технологического университета

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что основные научные положения, выводы и рекомендации кандидатской диссертации Лисицкого Ивана Ивановича на тему «Деревянные фермы с узлами на стальных плоских стержнях» внедрены в учебный процесс кафедры «Строительные конструкции и водоснабжение» при изучении дисциплины «Конструкции из дерева и пластмасс», читаемой бакалаврам и магистрантам по направлению подготовки "Строительство".

ИО Директора  
строительства и архитектуры

(подпись)

Толстухин А.И.  
(ФИО)

Заведующий кафедрой  
«Строительные конструкции и водоснабжение»

(подпись)

Поздеев В.М.  
(ФИО)

Директор департамента образовательной  
деятельности

(подпись)

Конохова Т.А.  
(ФИО)

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор АО «Марийскгражданпроект»

А.Я. Черваков

«*И*» \_\_\_\_\_ 2022 г.**АКТ**

о применении результатов диссертационной работы И.И. Лисицкого  
«Деревянные фермы с узлами на стальных плоских стержнях»

Результаты диссертационной работы И.И. Лисицкого были использованы компанией АО «Марийскгражданпроект» и послужили основой для выполнения проекта стропильной системы в здании столярного цеха на 750м<sup>2</sup>.

Методика расчета и конструирования узлов деревянных ферм на стальных плоских стержнях, разработанная инженером Лисицким И.И. (научный руководитель, д.т.н., профессор Жаданов В.И.), применена при разработке несущих деревянных конструкций покрытия пролетом 15 м. Использование нового типа соединительных элементов в узлах позволило снизить общую материалоемкость конструкций по сравнению с традиционными решениями на 14%.

Результаты разработок планируется применять в проектной деятельности организации и в дальнейшем.

Главный инженер  
АО «Марийскгражданпроект»

А.А. Григорьев



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный  
университет»  
(ОГУ)

АКТ

№ \_\_\_\_\_

г. Оренбург

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

С.Н. Летуга

2022 г.



АКТ

о внедрении в учебный процесс результатов научного исследования  
Лисицкого Ивана Ивановича  
*«Деревянные фермы с узлами на стальных плоских стержнях»*

Мы, нижеподписавшиеся, комиссия в составе:

- начальника управления научной и инновационной деятельности, к.т.н., доцента П.А. Болдырева;
  - декана архитектурно-строительного факультета, к.т.н., доцента А.И. Альбакасова;
  - заведующего кафедрой «Строительные конструкции», д.т.н., профессора В.И. Жаданова
- составили настоящий акт о том, что материалы диссертационного исследования И.И. Лисицкого внедрены в учебный процесс кафедры «Строительные конструкции» для студентов направления подготовки Строительство при изучении дисциплин «Конструкции из дерева и пластмасс», «Спецкурс по деревянным конструкциям», «Деревянные конструкции для малоэтажного строительства», «Специальные вопросы реконструкции зданий» на лекционных и практических занятиях, при научно-исследовательской работе студентов, в т.ч. при подготовке магистерских диссертаций.

Начальник УНИД, к.т.н., доцент

П.А. Болдырев

Декан АСФ, к.т.н., доцент

А.И. Альбакасов

Зав. кафедрой СК, д.т.н., профессор

В.И. Жаданов