

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

На правах рукописи

ДАНИЛОВ ЕГОР ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КЛЕЕНОГО БРУСА С
КОГТЕВЫМИ ШАЙБАМИ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор технических наук,

профессор Черных А. Г.

Санкт-Петербург -2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Анализ состояния вопроса и задачи исследований соединений деревянных конструкций с когтевыми шайбами.....	11
1.1 Общая характеристика и опыт применения когтевых шайб в деревянных конструкциях.....	11
1.2 Существующие теоретические основы расчета нагельных соединений с использованием когтевых шайб в деревянных конструкциях.....	18
1.3 Анализ методов исследований нагельных соединений с использованием когтевых шайб и определение научно- исследовательских и инженерно-прикладных задач	23
Глава 2 Определение НДС нагельных соединений с когтевыми шайбами в LVL.....	44
2.1 Определение связи между усилием, воспринимаемым нагелем и его смещением	44
2.2 Определение связи между усилием, воспринимаемым когтем шайбы, и его смещением.....	48
2.3 Разработка методики расчета нагельных соединений на когтевых шайбах.....	54
2.4 Вывод по главе.....	63
Глава 3 Прочностные характеристики материалов соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из LVL.....	65
3.1 Определение прочностных и жесткостных характеристик материала LVL.....	66
3.2 Определение расчетных характеристик древесины LVL при смятии штампом различной формы.....	68
3.2.1 Исследование влияния высоты треугольного штампа на прочность LVL при смятии и на коэффициент постели при действии кратковременной нагрузки.....	69
3.2.2 Исследование влияния высоты треугольного штампа на прочность при смятии и коэффициент постели LVL при действии длительной нагрузки.....	77
3.2.3 Исследование влияния диаметра цилиндрического штампа на прочность при смятии и на коэффициент постели LVL при действии кратковременной нагрузки.....	86
3.2.4 Исследование влияния диаметра цилиндрического штампа на прочность при смятии и коэффициент постели LVL при действии длительной нагрузки.....	93
3.3 Определение прочностных характеристик металла соединителей	101
3.4 Привидение параметров к расчетным значениям.....	107
3.5 Выводы по главе	109
Глава 4 Исследование НДС соединений и конструкций из однаправленного клееного бруса LVL с когтевыми шайбами...	110

4.1	Действие на соединение осевого усилия.....	110
4.1.1	Исследование соединений фиксированной толщины элементов...	110
4.1.2	Исследование зависимости НДС соединений от изменения толщин элементов LVL.....	123
4.2	Исследование влияния изгибающего момента на НДС нагельного соединения с когтевыми шайбами.....	126
4.3	Исследование НДС нагельных соединений с когтевыми шайбами при действии длительного усилия.....	133
4.4	Исследование НДС ферм из LVL с когтевыми шайбами при действии статической нагрузки.....	136
4.4.1	Конструирование и сборка образца конструкции для испытания	136
4.4.2	Методика и проведение испытаний ферм	141
4.4.3	Исследование НДС фермы с параллельными поясами из LVL с когтевыми шайбами.....	147
4.5	Сравнение расчетных и экспериментальных результатов несущей способности фермы	156
4.6	Выводы по главе	160
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	162
	Рекомендации по проектированию.....	163
	Список сокращений и условных обозначений	165
	Список литературы.....	166
	Приложение А.....	176
	Приложение Б.....	178
	Приложение В.....	182
	Приложение Г.....	185
	Приложение Д.....	186

Введение

Актуальность темы. Ограничения, свойственные для древесины, затрудняют ее использование в строительных конструкциях конкурентно-способных с другими строительными материалами. Однако, прочностными характеристиками конструкционных материалов из инженерной древесины значительно выше, и возможности применения их в строительстве существенно возрастают. Одним из таких материалов является клеёный брус из однонаправленного шпона (*LVL*), преимущества, которого позволяют применять его в ответственных несущих деревянных конструкциях. В России этот конструкционный материал, как правило, используется в несложных строительных конструкциях с излишним запасом прочности и жесткости, что удорожает строительство и сдерживает повсеместное его использование. Одним из наиболее используемых видов соединений элементов конструкций из *LVL* является нагельное. В узловых соединениях данного типа, как правило, назначаются завышенные размеры сечений элементов соединений из-за необходимости размещения расчетного количества нагелей. В таких ситуациях обосновано использование когтевых шайб, что позволяет сократить количество нагелей при требуемой несущей способности. При расчете по существующим методикам невозможно учесть факторы, влияющие на характер одновременной работы двух разных соединителей. Поэтому развитие методов расчета нагельных соединений с когтевыми шайбами и в конструкциях из *LVL* является актуальной и современной задачей.

Степень разработанности проблемы. Исследование и испытание конструкций с использованием когтевых шайб в мировой практике началось с начала XX века. В Советском союзе изучению новых видов и методов расчета когтевых шайб посвящены работы Леннова В. Г. и Котова Н. Ф. В наше время известны работы Лабудина Б. В., Попова Е. В., Павлик А. В., Пуртов В. В., Найчук А. А., Blass H.J., Schlager M.N., Mettem C. J., Page A. V., Hirashima Y. и др. Основываясь на результатах исследований были разработаны нормы и указания к проектированию и производству соединений конструкций. Зарубежный опыт

применения клееных конструкций с когтевыми шайбами показал большую надежность по сравнению с использованием классических нагельных соединений, сокращение сроков монтажа и увеличение жесткости соединений конструкций.

Результатов специальных исследований соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из *LVL* в литературных источниках не найдено. Отсутствуют сведения о длительной несущей способности соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из *LVL*, нет информации о коэффициентах постели при воздействии штампов различных форм.

Цель и задачи исследований

Целью диссертационной работы является исследование напряженно-деформированного состояния нагельных соединений конструкций с когтевыми шайбами и разработка методики расчета.

Для достижения цели требуется решить поставленные **задачи**:

- разработать математическую модель соединения с нагельными и когтевыми шайбами, а также предложить методику расчета;
- уточнить механические свойства материалов элементов соединения при воздействии кратковременных и длительных статических нагрузок;
- провести экспериментальные исследования НДС соединений при воздействии продольного, поперечного усилия и изгибающего момента;
- разработать модель деревянной конструкции из *LVL* с когтевыми шайбами и реализовать экспериментальные исследования её несущей способности и жесткости;
- провести апробацию разработанной методики расчета и составить практические рекомендации по проектированию деревянных конструкций с использованием когтевых шайб.

Объект исследования – узловые соединения в конструкциях из *LVL* с применением когтевых шайб.

Предмет исследования – НДС нагельных соединений конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности шифр 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения, а именно п. 3. «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности».

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния нагельных соединений конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами на основе уравнений наследственности с учетом влияния влажности материала, длительности действия нагрузки, угла приложения силы к волокнам и геометрических характеристик сминающего штампа;
- получены значения коэффициентов постели для материала *LVL* при смятии треугольным и цилиндрическим штампом в зависимости от размера штампа, наклона волокон, влажности материала, продолжительности воздействия нагрузки;
- разработана новая методика расчета соединений с когтевыми шайбами по прочности и деформациям с учетом длительности воздействия нагрузок;
- создано уникальное устройство для запрессовки когтевых шайб для сборки деревянных конструкций (патент на полезную модель №146232, заявка №2014123970).

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новой методики расчета соединений с когтевыми шайбами, позволяющей достоверно определять НДС узлов за счет устранения неоправданных коэффициентов запаса прочности и жесткости.

Практическая значимость работы заключается:

- в разработке полезной модели устройства для запрессовки когтевых шайб, позволяющей сокращать трудозатраты, повышать качество и надежность соединений при сборке конструкций;

- в определении деформационно-прочностных характеристик *LVL* при смятии треугольным и цилиндрическим штампом в зависимости от направления волокон, влажности *LVL*, размера штампа, времени действия нагрузки;

- в разработке рекомендаций по проектированию соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из *LVL*, позволяющей более рационально использовать ресурсы используемых элементов соединения.

Методология исследований основывается на использовании классических положений теории расчета деревянных конструкций, планировании экспериментов и математической статистики, выполнении исследований образцов соединений и натурных испытаний полноразмерной конструкции с использованием методов тензометрирования, анализе результатов экспериментальных и численных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

- алгоритм и методика расчета нагельных соединений с когтевыми шайбами;

- результаты теоретических исследований воздействия нагрузки на когтевые шайбы и её смещения в гнезде до и после образования пластического шарнира в когте;

- результаты экспериментальных исследований параметров наследственного ядра уравнения деформирования *LVL*, прочностных, жесткостных характеристик материалов, коэффициента постели при смятии треугольными и цилиндрическими штампами;

- результаты экспериментальных исследований НДС фермы из *LVL* с когтевыми шайбами при действии статической нагрузки.

Степень достоверности результатов обеспечивается использованием общепринятых гипотез и допущений, применением сертифицированных расчетных программных комплексов, использованием прецизионного поверенного измерительного оборудования, удовлетворительной сходимостью результатов экспериментальных и теоретических исследований.

- **Апробация работы.** Основные выводы и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

- I-ая Международная конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Инновационные технологии строительства» 7 – 8 октября 2011 г. СФУ, Красноярск;

- IV Международный съезд - конгресс Ассоциации деревянного домостроения 25-26 ноября 2011 г. СПбГАСУ, Санкт-Петербург;

- 65-ая Межвузовская научно-практическая конференция студентов «Актуальные проблемы строительства и архитектуры», 10 апреля 2012 г., СПбГАСУ, Санкт-Петербург.

- Первый международный конгресс молодых учёных (аспирантов, докторантов и студентов) посвящённому 180-летию СПбГАСУ, 10 октября 2012г., СПбГАСУ, Санкт-Петербург;

- V Международный съезд ассоциации деревянного домостроения, 15-16 декабря 2012 г., МИСИ, Москва;

- XLII Научная и учебно-методическая конференция, январь 2013 г., НИУ ИТМО, Санкт-Петербург;

- 66-ая Межвузовская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», 1-3 апреля 2013 г., СПбГАСУ, Санкт-Петербург;

- XVII Международный симпозиум «Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмассы» 03-06 июня 2013 г., ОГАСА, Одесса, Украина;

- 67-ая Межвузовская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» 7-9 апреля 2014 г., СПбГАСУ, Санкт-Петербург;

- 70-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» 5-7 апреля 2017 г., СПбГАСУ, Санкт-Петербург;

- 9-ая Международная научно-практическая конференция «Инновации в деревянном строительстве», 11-13 апреля 2018 г., СПбГАСУ, Санкт-Петербург.

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 научных работах, в том числе 5 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, 1 монографии, 1 патенте

Внедрение результатов работы. Результаты исследований внедрены в практической области:

- использованы при проектировании каркаса здания гольф-клуба, расположенного в коттеджном комплексе «Горки Гольф Клуб» Ломоносовского района Ленинградской области и подтверждаются актом о внедрении результатов научно-исследовательской работы.

Структура и объем диссертационной работы. Работа состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, общих выводов. Диссертация содержит 185 страниц машинописного текста, 23 таблицы, 99 рисунков. Список использованной литературы состоит из 150 наименований работ, в том числе 36 – на иностранных языках.

Во введении сформирована проблема и обоснована актуальность рассмотренной темы, представлена степень разработанности определены и сформированы цели и задачи исследований, указана научная новизна, представлена методология исследований и практическая значимость диссертации.

В первой главе «Анализ состояния вопроса и задачи исследований соединений деревянных конструкций с когтевыми шайбами» приведен анализ литературных данных по теме диссертации, приведены основные технические характеристики когтевых шайб, рассматриваются конструкции из *LVL* с когтевыми шайбами, приводится информация об использовании таких конструкций в отечественной и зарубежной практике.

Во второй главе «Определение НДС нагельных соединений конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами» определены теоретические зависимости между усилием, действующим на цилиндрический нагель и коготь шайбы и их смещениями с учетом теории наследственности. Приводится методика

определения линейной и угловой жесткости (K_1 , K_2 , K_3), а также предложен алгоритм расчета соединений деревянных конструкций с когтевыми шайбами.

В третьей главе «Исследование прочностных характеристик материалов нагельных соединений конструкций из LVL с когтевыми шайбами» представлены результаты экспериментальных исследований прочностных и жесткостных параметров LVL при смятии треугольными и цилиндрическими штампами различных размеров под воздействием кратковременных и длительных нагрузки, определены механические характеристики металла соединителей. В третьей главе представлена методика экспериментальных исследований и анализ полученных результатов.

В четвертой главе «Исследование НДС нагельных соединений с когтевыми шайбами конструкции из однонаправленного клееного бруса» изложена методика и результаты испытаний соединений с когтевыми шайбами при воздействии кратковременного и длительного нагружения. Приведена методика и описан процесс испытания четырехугольной фермы с параллельными поясами. Представлены результаты сравнения теоретических и экспериментальных исследований.

В заключении изложены основные выводы по результатам диссертационной работы, представлены рекомендации по проектированию деревянных конструкций с использованием когтевых шайб.

Работа выполнена во время учебы в очной аспирантуре при Санкт-Петербургском Архитектурно-Строительном Университете (СПбГАСУ).

Глава 1. Анализ состояния вопроса и задачи исследований соединений деревянных конструкций с когтевыми шайбами

1.1. Общая характеристика и опыт применения когтевых шайб в деревянных конструкциях

Соединения на когтевых шайбах являются разновидностью шпоночных соединений. За свою историю эволюции шпонки претерпели изменения от призматических деревянных форм до сложных соединителей, выполняемых из специальных сплавов. Видоизменения соединителей шпоночного типа были направлены на предотвращение таких недостатков, как неравномерное распределение нагрузок при многорядовой расстановке, скалывающие напряжения. Поэтому следующие за предыдущими разновидностями шпоночных соединений наделялись качествами достаточной вязкости и податливости (чтобы предотвратить опасное скалывающее напряжение), равнопрочности, применения принципа дробности воспринимаемого усилия, увеличения поверхности скалывания, увеличения плотности и мощности соединения.

С 1941 года в Советском Союзе появляются штампованные когтевые шайбы В. Г. Леннова [53] достаточно технологичные и надежные для разборных соединений деревянных элементов конструкций при знакопеременных усилиях. Несущая способность данных соединений приблизительно одинакова в соединениях вдоль и поперек волокон. Вдавливание когтевых шайб в деревянный элемент производится ударным способом, что способствует плотному прилеганию когтей к волокнам древесины без обрыва волокон в гнезде [53]. Возможна так же постановка шайб с использованием специального пресса или закручивания гаек болтового соединения.

На сегодняшний день шайба Леннова (Рисунок 1.1) не выпускается, хотя обладает достаточными преимуществами при использовании в строительной практике:

- такие соединения являются сборно-разборными;

- шайбы могут запрессовываться по отдельности (а отличие от зубчато-кольцевых или двусторонних шайб «Бульдог»;
- в готовом узле есть возможность контролировать качество запрессовки и правильность постановки;
- конструкции с использованием шайб Леннова имеют высокую ремонтпригодность.

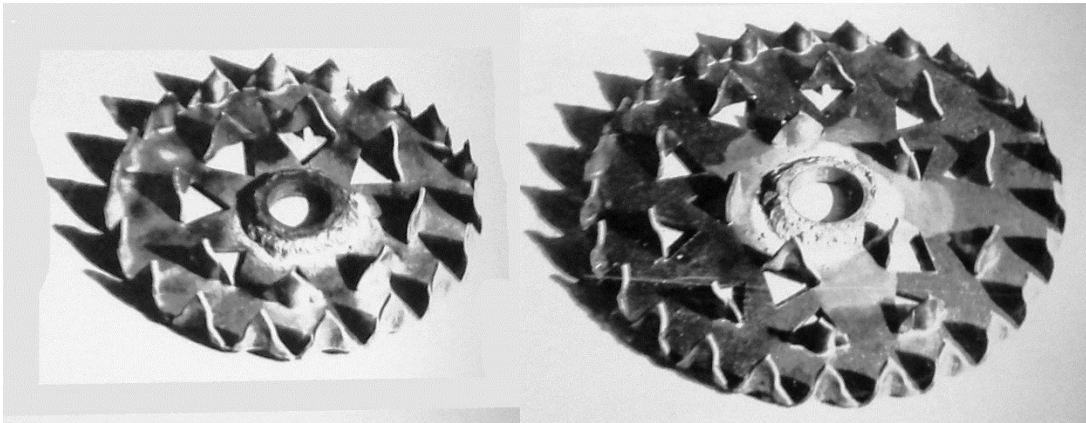


Рисунок 1.1. Когтевая шайба Леннова [1].

В 1889 году в Америке инженером Теодорсеном была запатентована шайба «Бульдог», но в связи с обилием поставок древесины в то время она не была широко принята до первой мировой войны. Однако уже с 20-х годов XX века находит широкое распространение в Германии и Швеции [129].

Когтевые шайбы типа «Бульдог» – двусторонний (односторонний) соединитель, выполненный из круглой пластины, края которой должны быть надрезаны и наклонены перпендикулярно к пластине, создавая треугольные когти, которые выступают попеременно с разных сторон пластины для двусторонних шайб или с одной для односторонних. Каждая шайба имеет два отверстия под гвоздь, для закрепления в проектном положении [92].

Существует широкий сортамент форм и размеров шайб «Бульдог» который отражен в *EN 912*. [124].

Двусторонний «Бульдог» работает аналогично зубчато-кольцевой шпонке (Рисунок 1.2). В соединении с древесиной каждый зубец работает

самостоятельно, как консоль, зацементированная в жесткой пластинке. В односторонних «Бульдогах» усилие передается от болта к шайбе и через когти шайбы передается на древесину. С помощью когтей усилие распространяется на большую поверхность смятия древесины. Это увеличивает несущую способность и дает необходимую пластичность болтового соединения и повышает его надежность.

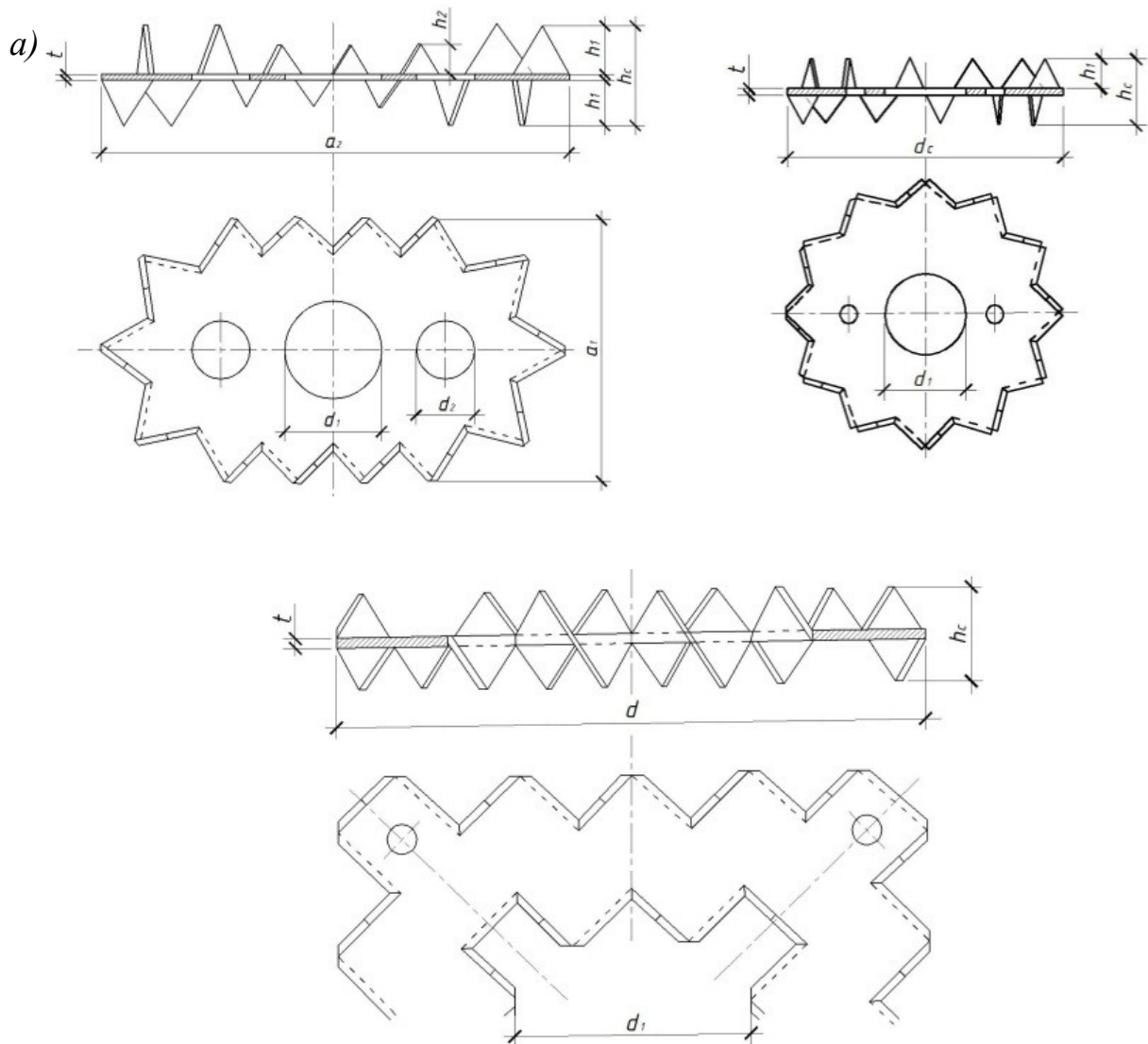


Рисунок 1.2. Когтевые шайбы: различные типы шайбы «Бульдог».

Сборка конструкций с таким соединителем производится аналогично сборке на зубчато-кольцевых шпонках. Для мягких пород древесины вдавливание шайб осуществляется затяжкой болтов с широкими шайбами. Для более плотных пород

(более 500 кг/м³) используется специальный пресс. Возможна установка шайб и с помощью ударного метода или метода выжигания [113].

Когтевая шайба «Бульдог», на сегодняшний день, выпускается такими крупными компаниями как *Rothoblaas* (Италия), *Simpson* (США), *TECO* (Англия), *BPC Fixings* (Англия), *Expamet* (Англия) [133] и другими. На производство данных шайб существует европейский стандарт *EN 912*, который нормирует производство данных соединителей из холоднокатанных покрытых (непокрытых) низкоуглеродистых узких стальных полос методами холодной штамповки. Материал должен соответствовать типам сталей *DC01+C390* ($R_y = 310 \text{ Н/мм}^2$, $R_y = 510 \text{ Н/мм}^2$) согласно *EN 10139*, или холоднокатанной высокопрочной стали для холодной штамповки *H320M* ($R_y = 360 \text{ Н/мм}^2$, $R_y = 500 \text{ Н/мм}^2$) в соответствии с *EN 10268*. Оба материала эквивалентны по характеристикам стали *C390* ($R_y = 380 \text{ Н/мм}^2$, $R_y = 525 \text{ Н/мм}^2$) по ГОСТ 27772.

В России когтевые шайбы «Бульдог» не выпускаются, производятся поставки из Европы и США.

Положительные качества когтевых шайб отражаются в увеличении несущей способности нагельного соединения в 1,8-2,5 раза. Испытаниями было выявлено, что несущая способность когтевой шайбы примерно одинакова в соединениях вдоль и поперек волокон древесины сосны из-за фактора «дробности» приложения усилий смятия [7]. Узлы, выполняемые с использованием когтевых шайб, имеют высокую плотность соединения. Использование шайб, так же, предохраняет разрушение узлов конструкции от опасных хрупких разрушений.

А так же необходимы особенные требования к технологии запрессовки когтевых шайб для недопущения изгиба когтей в направлении их наименьшей жесткости.

Существует ряд недостатков соединений с когтевой шайбой «Бульдог»:

- незначительные размеры когтей при усушке древесины могут приводить к выходу их из гнезд;
- когти, внедренные в древесину, перерезают волокна и вызывают некоторое местное ослабление древесины;

- существуют когтевые шайбы более высокой несущей способности (такие как шайба Леннова, шайба КСВЗШ, предложенная Лабудиным Б. В. [51] и другие соединители).

В мировой практике использование когтевых шайб «Бульдог» встречается в конструкции церкви в горах на Винкельмоозальм в Германии (архитектор Й. Видеймана, инженер Х. Шлегель) [120], детского сада в Эрдведе в Германии [121], спортивного зала в Вайнфельде в Германии [132] и других зданиях.

В России когтевые шайбы «Бульдог» использовались при строительстве спортивного комплекса «Фламинго» в г. Курган (Рисунок 1.3). Шайбы устанавливались при сплочении колон и балок из *LVL*. Для запрессовки использовалась специальная установка для одновременной запрессовки 6 когтевых шайб «Бульдог».



Рисунок 1.3. Конструкция части здания спортивного комплекса «Фламинго» в г. Курган.

Примером строительства с использованием когтевых шайб в конструкциях из клеенной древесины является здание гольф-клуба, расположенного в пос. Гостилицы Ленинградской области (Рисунок 1.4). Когтевые шайбы использовались для увеличения жесткости соединений элементов фахверка ввиду малого количества вертикальных связей.



Рисунок 1.4. Гольф-клуб в пос. Гостилицы, Ленинградская область.

Конструкции в которых применяются и могут применяться когтевые шайбы большое количество. Примеры типов конструкций с использованием когтевых шайб представлены на Рисунке 1.5.

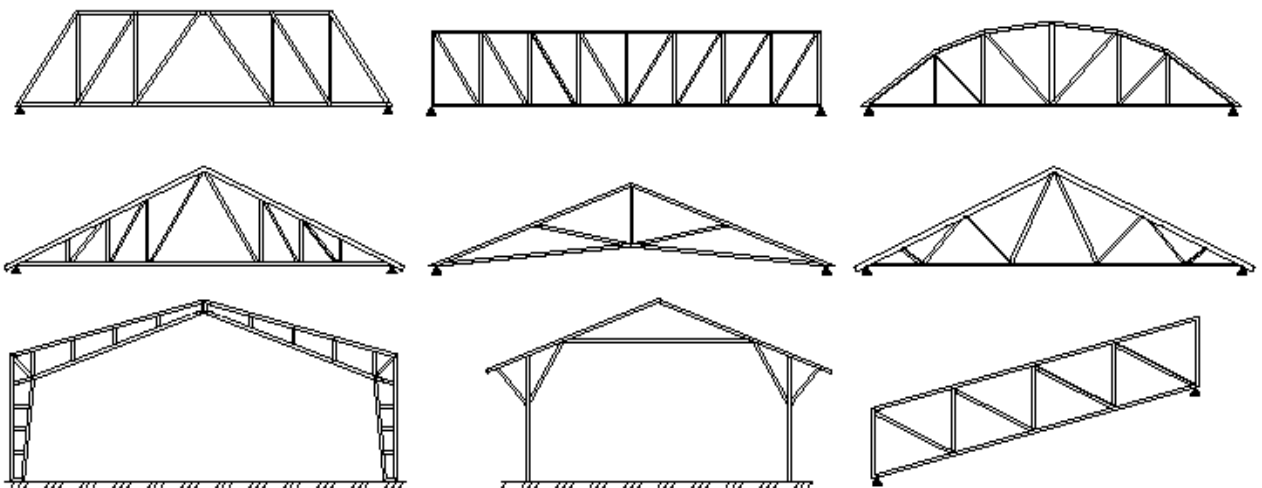


Рисунок 1.5. Типы конструкций с использованием когтевых шайб.

Помимо совершенствования соединителей деревянных конструкций современные разработки в области деревянного строительства движутся в направлении поиска новых материалов на основе древесины. За последнее время появились новые материалы такие, как: *OSB*, *LVL*, *LSL*, *PSL*, *Glulam*, *CLT*, и другие, которые могут быть использованы в строительстве как в качестве ответственных несущих конструкций, так и в нуждах отделки, производства мебели и других работ.

LVL это материал, который получен путем прессования листов шпона хвойных пород древесины, с предварительным нанесением на них формальдегидного клея с параллельным расположением волокон (в некоторых случаях несколько слоев склеивают перпендикулярно волокнам). Технология производства может быть сравнима с технологией производства фанеры. Этот материал был разработан в США [119], массовое производство было осуществлено компанией *TrustJoist* (США), на сегодняшний день являющейся подразделением крупнейшей деревообрабатывающей компании *Weyerhaeuser* (США). Материал создавался в 1960-е годы с целью получения бруса, значительно превышающего габариты существующего сортамента древесины высокой прочности. С каждым годом потребление *LVL* по всему миру увеличивается. *LVL* используется не только в области строительства, но и в производстве мебели, опалубки, лестниц, дверных оконных и дверных блоков [114].

На сегодняшний день в России существует 2 завода по производству *LVL*: "ЛВЛ-ЮГРА" г. Нягань (объем производства до 90 тыс. м³/год) по данным на 2018 г., «Талеон Терра», г. Торжок (объем производства 150 тыс. м³/год по данным на 2018 г), который выпускает *LVL* с маркой «*Ultralam*».

1.2. Существующие теоретические основы расчета нагельных соединений с использованием когтевых шайб в деревянных конструкциях

Соединения на когтевых шайбах в конструкциях из *LVL* рассчитываются по методу предельных состояний. Для расчета, согласно данной теории, необходимо выполнить расчет по прочности (по несущей способности) – первое предельное состояние, и расчет по деформациям – второе предельное состояние. Когда соединение теряет способность к сопротивлению внешним нагрузкам – наступает первое предельное состояние, при котором считается, что несущая способность исчерпывается полностью. В случае, когда деформации сдвига элементов достигают предельных значений, регламентируемых нормами, считается, что наступает второе предельное состояние. Для нагельных соединений всех типов согласно СП 64.13330-2011 и СП 64.13330-2017 [89, 90] при полном использовании несущей способности величина сдвига не должна превышать 2 мм. При нагрузке, передаваемой соединению, ниже длительной несущей способности *LVL* деформации обычно уменьшаются с течением времени. При значении нагрузок выше длительной несущей способности материалов на основе древесины деформации имеют свойство увеличиваться до полного разрушения [27, 28, 31]. Соединение разрушается при исчерпании несущей способности по смятию при достижении предельных значений, равных $R_{см}^{вр}$ или $R_{см}^{дл}$. Исчерпание несущей способности по изгибу металлического соединителя принимается при возникновении по его длине пластического шарнира.

Расчет соединений когтевых шайб по несущей способности описан в европейских нормах *EuroCode 5* [125, 126]. Х. Д. Блассом, Д. Эхлбэком и М. Шаглером в работе [117] было предложено использование выражения для определения несущей способности соединения на когтевых шайбах, что позже было использовано в качестве основы расчета в *EuroCode 5*. Данная математическая модель была основана на предположении о распределении нагрузки на соединение между нагелем и когтями шайбы и была дополнена рядом работ [115, 116, 128]. Таким образом, прочность соединения может быть

описана выражением:

$$R_{j,k} = R_{c,k} + n \cdot R_{b,k} \quad (1.1)$$

где $R_{j,k}$ – нормативное значение несущей способности соединения с когтевой шайбой и болтом, Н; $R_{c,k}$ – нормативное значение несущей способности когтевой шайбы, Н; $R_{b,k}$ – нормативное значение несущей способности болта, принимаемое по существующим нормам, Н; n – коэффициент, учитывающий влияние распределения нагрузки между когтевыми шайбами и болтами, принимаемый от 0 до 1.

Допустимая нагрузка, которую сможет нести когтевая шайба может быть определена как:

$$R_{c,k} = Ad_{к.ш.}^{1.5}; \quad (1.2)$$

где A – величина, зависящая от типа когтевой шайбы и параметров соединения; $d_{к.ш.}$ – диаметр когтевой шайбы.

Для двусторонних шайб типа С1, С3, С5, С6, С8 [4] значение величины A можно определить, как:

$$A = 25k_1k_2k_3d^{1.5}; \quad (1.3)$$

Для односторонних шайбы С2, С4, С7, С9 значение величины A определяется как:

$$A = 18k_1k_2k_3d^{1.5}; \quad (1.4)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий влияние толщины соединяемых элементов; k_2 – коэффициент, учитывающий влияние расстановки соединителей относительно края соединения; k_3 – коэффициент, учитывающий влияние изменения плотности материала древесины соединения.

Коэффициент k_1 можно определить из выражения:

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \frac{t_1}{3h_e} \\ \frac{t_2}{5h_e} \end{array} \right. \quad (1.5)$$

где величины t_1 , t_2 – толщины крайних и средних сплавляемых элементов соответственно, причем: $t_1 \geq 2.25 h_e$, $t_2 \geq 3.75 h_e$, мм; h_e – величина проникновения когтей шайбы в толщу соединяемых элементов, мм.

Формула (2.5) отражает влияние на несущую способность используемые толщины соединяемых элементов. При использовании толщин $t_1 > 3 h_e$, $t_2 > 5 h_e$, изменения несущей способности происходить не будет. При использовании минимальных допустимых толщин элементов несущая способность когтевой шайбы снизится до $0,75R_{c,k}$.

Коэффициент k_2 для когтевых шайб типа С1-С9 [124] можно определить из выражения:

$$k_2 = \min \left\{ \frac{a_{3,t}}{1,5d_{к.ш.}}; 1 \right. \quad (1.6)$$

здесь $a_{3,t}$ – расстояние от центра стяжного болта до края элемента вдоль волокон, величину c принимают как максимальное значение величин 80, $7d_b$, $1,1d_c$, мм; $d_{к.ш.}$ – диаметр когтевой шайбы, мм, d_b – диаметр болта, мм.

Коэффициент k_3 равен:

$$k_3 = \min \left\{ \frac{\rho_k}{350}; 1,5 \right. \quad (1.7)$$

здесь ρ_k – нормативное значение плотности древесины в соединении, кг/м³.

Выражение (2.6) отражает зависимость несущей способности соединения с когтевыми шайбами от плотности элементов конструкции. Коэффициент k_3 учитывает изменение плотности от 350 кг/м³ до 525 кг/м³. Это ограничение вызвано значительным исчерпанием несущей способности когтей шайбы при значениях плотности выше указанных. При использовании материалов плотностью выше 525 кг/м³ значительного увеличения несущей способности соединения не происходит.

Чтобы определить величину несущей способности болта $R_{b,k}$ рассмотрим симметричное соединение, в котором элементы из *LVL* сопрягаются под различными углами приложения нагрузки по отношению к волокнам и соединены стальным болтом поставленным перпендикулярно соединяемым элементам, нагрузка приложена к среднему элементу и передается на боковые элементы. Расстановка соединителей выполнена таким образом, что не происходит скалывающего разрушения соединения. Величина несущей способности болта $R_{b,k}$

по [90] определится из условий разрушения по причине:

- смятия в крайних элементах;
- смятия в среднем элементе;
- изгиба нагеля.

Расчет по каждому из условий выполняется по следующим формулам [90]:

$$T = \min \begin{cases} 0,5cd_n k_\alpha; \\ 0,8ad_n k_\alpha; \\ (2,2d_n^2 + 0,025a^2)\sqrt{k_\alpha} \leq 3,1d^2; \end{cases} \quad (1.8)$$

где T – несущая способность одного нагеля одного среза в соединении, кН;

c – толщина среднего элемента, см;

a – толщина крайнего элемента, см;

d_n – диаметр нагеля, см;

k_α – коэффициент, учитывающий угол приложения нагрузки.

Расчетная несущая способность цилиндрических нагелей определяется по [90] с умножением на коэффициенты условий эксплуатации m_b и m_t , учета величин напряжения более 80% m_d , учета использования глубокого антипирирования m_a .

$$R_{b,k} = m_b m_t m_d m_a \min(T) n_{ш} n_n, \quad (1.9)$$

где $n_{ш}$ – число расчетных швов одного нагеля; n_n – число нагелей в соединении.

Необходимая надежность из условия не допущения скалывания обеспечивается соблюдением расстановки нагелей согласно существующих норм СП64.13330-2017 [89, 90]. За расчетную несущую способность нагеля на один шов (срез) принимается наименьшее из полученных значений. Рекомендуется подбирать диаметр нагеля таким образом, чтобы несущая способность соединения определялась равнопрочной работой нагельного соединения по смятию и по изгибу или только по изгибу нагеля [89, 90].

При расчете несущей способности нагельного соединения по *EuroCode 5* [125, 126] задаются четырьмя условиями разрушения симметричного двухсрезного соединения элементов деревянных конструкций:

- смятие в крайних элементах;
- смятие в среднем элементе;
- изгиб нагеля;
- изгиб нагеля с растяжением при значительном его закреплении в крайних элементах.

Выполняется расчет несущей способности по каждому из условий согласно [125, 126]:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases} \quad (1.10)$$

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$$

где $F_{v,Rk}$ – нормативная несущая способность одного нагеля одной плоскости среза в соединении, кН;

t_i – толщина элемента, см;

$f_{h,i,k}$ – нормативное сопротивление смятию LVL , МПа;

d – диаметр нагеля, см;

$M_{y,Rk}$ – нормативный момент пластической деформации нагеля, МПа;

β – масштабный коэффициент для нормативного сопротивления смятию LVL ;

$F_{ax,Rk}$ – нормативное сопротивление нагеля выдергиванию, кН.

При этом считается, что стальной цилиндрический нагель с контролируемым усилием затяжки гаек работает как болт на изгиб без учета эффекта нити, т.е. его нормативное сопротивление выдергиванию $F_{ax,Rk}=0$, а $M_{y,Rk}$ и $f_{h,i,k}$ рассчитываются в соответствии с [125]. Для различных схем соединений задаются углы приложения нагрузки к волокнам крайних и среднего элементов отдельно.

Из рассчитанных значений несущей способности определяется минимальное. Оно является нормативной несущей способностью одного нагеля в

одной плоскости среза $F_{v,Rk}$. Для получения расчетной несущей способности соединения необходимо умножить это значение на количество нагелей и число срезов одного нагеля, коэффициент модификации $k_{mod}=0,65$ и разделить на частный коэффициент свойств материала (LVL) $\gamma_m=1,2$ по [125].

$$R_{b,k} = \frac{\min(F_{Rk}) n n_s k_{mod}}{\gamma_m}, \quad (1.11)$$

где $R_{b,k}$ – расчетная несущая способность соединения, кН;

$\min(F_{Rk})$ – минимальная нормативная несущая способность одного нагеля одной плоскости среза в соединении по четырем условиям, кН;

n – количество нагелей в соединении;

n_s – число срезов нагеля;

k_{mod} – коэффициент модификации;

γ_m – частный коэффициент свойств материала.

1.3. Анализ методов исследований нагельных соединений с использованием когтевых шайб и определение научно-исследовательских и инженерно-прикладных задач

Соединение на когтевых шайбах является совмещением использования разновидностей соединений – нагельного и шпоночного. Среди исследований, посвященных вопросам нагельным соединениям деревянных конструкций, отмечаются работы Дмитриева П. А., Никитина Г. Г., Шапоникина В. Н., Кононова В. А., Михайлова Б. К., Шешуковой Н. В., Пуртова В. В., Павлика А. В., Базенкова Т. Н., Гаппоева М. М., Исупова С. А., Бутова Е. В. и др.

В работах Дмитриева П. А. [27-34] подробно прослеживается теоретическое обоснование расчета соединений на цилиндрических нагелях. Расчеты основываются на теории сопротивления нагельного соединения за счет способности древесины противодействовать смятию, при достижении предельных значений. Предполагается, что несущая способность при смятии

нагельного гнезда исчерпывается в тот момент, когда достигаются временные напряжения смятия $R_{см}^{вр}$ или длительные $R_{см}^{дл}$, при этом напряжения на каждом участке смятия одинаковы, а ось нагеля до образования пластического шарнира принимается прямолинейной.

По вопросам длительной прочности и жесткости деревянных конструкций с нагельными соединениями известны работы Михайлова Б. К., Шешуковой Н. В. [55, 56, 111]. Авторы раскрывают методику расчета соединений на нагелях, которая основана на расчете нагеля как балки, лежащей на неупруго-вязком основании. Параметры НДС древесины с учетом влияния влажности и угла наклона волокон древесины определяются из условия прочности по деформациям. Уравнение описания вязко-упругих свойств, где нелинейность зависимостей факторов учитывается за счет формы деформирования нагеля, предложенное Работновым Ю. Н. [70]:

$$c \cdot y(x, t) = p(x, t) + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau; \quad (1.12)$$

где C – коэффициент постели от действия цилиндрического штампа;

$p(x, t)$ – реакция гнезда нагеля;

$K(x, t)$ – наследственное ядро уравнения.

При этом изогнутая ось нагеля описывается уравнением:

$$EIy^{IV}(x, t) + Cy(x, t) + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau = q(x, t); \quad (1.13)$$

где $q(x, t)$ – внешняя нагрузка.

Для решения данного уравнения принимается разложение функции $y(x, t)$ в ряд:

$$y(x, t) = \sum C_{ij} z_{ij}; \quad (1.14)$$

где z_{ij} – представляет собой балочную функцию.

При этом балочная функция принимается как:

$$z_{1j} = \sin \xi x + sh \xi x - \lambda (\cos \xi x + ch \xi x); \quad (1.15)$$

где ξ и λ принимаются из граничных условий.

Используя метод Бубнова-Галеркина можно получить:

$$C_{1j} EI z_{1j}^{IV}(x, t) + C_{1j} C y(x, t) + C_{1j} \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau = q(x, t). \quad (1.16)$$

При интегрировании на участке длины нагеля в каждом деревянном элементе и умножении уравнения (1.16) на величину $z_{1j}(x, t)$ получается выражение для крайних элементов:

$$\begin{aligned} C_{11} \int_0^{l_1} \left[EI z_{11}^{IV}(x, t) + C\varphi[z_{11}(x, t)] + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau \right] z_{11}(x, t) dx = \\ = \int_0^{l_1} q(x, t) z_{11}(x, t) dx. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Для среднего элемента получится выражение:

$$\begin{aligned} C_{12} \int_{l_1}^{l_2} \left[EI z_{12}^{IV}(x, t) + C\varphi[z_{12}(x, t)] + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau \right] z_{12}(x, t) dx = \\ = \int_{l_1}^{l_2} q(x, t) z_{12}(x, t) dx. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Ядро уравнения $K(t, \tau)$ принимается в результате аппроксимации кривых ползучести древесины и принимается в виде:

$$K_0(t) = A \frac{e^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}}; \quad (1.19)$$

где A, α, δ – постоянные уравнения;

t – время нагружения.

Предложенная методика хорошо подходит для расчетов нагельных соединений, учитывающий вязко-упругие свойства древесины и пластичность металла нагеля, что подтверждается сходимостью результатов испытаний и теоретических исследований.

В Советском Союзе разработкой соединений на когтевых шайбах занимался Леннов В. Г. [53]. В ходе работы над корректировкой недостатков существующих соединителей с учетом требований, предъявляемых в конструкциях были получены более совершенные типы когтевых шайб, расчет которых подразумевал уравнение, полученное по результатам аппроксимации кривых взаимодействия диаметра шайбы и несущей способности без учета плотности, влажности древесины и возможных модификаций формы шайбы.

Работа когтевых шайб схожа по своему характеру с работой металлических зубчатых пластин (МЗП). Вопросами разработки эффективных зубчатых пластин занимался Дурновский А. М. [35]. Автором представлена

методика расчета элементов соединения с МЗП, которая определяет их эффективные геометрические параметры (форму, длину, ширину, шаг, толщину зубьев) с учетом жесткого закрепления зубьев на пластине и возможного зазора между пластиной и соединяемой деталью.

Вопросами длительной прочности и деформативности соединений элементов деревянных конструкций на МЗП известны работы Цепаева В. А., Ермолаева В. В. [36, 98-108]. Цепаевым В. А. предложена методика расчета соединений на МЗП, позволяющий рассчитывать соединения с учетом фактора времени при любых прочностных характеристиках древесины и материала пластины. Для описания процесса деформирования древесины гнезда зуба под действием распределенной нагрузки $q(x,t)$ Цепаевым В. А. использовался закон деформирования упруго-вязких материалов в виде [99]:

$$y(x, t) = \frac{q(x,t)}{c_n} + \int_0^t k_0(t, \tau) \cdot q(x, \tau) d\tau; \quad (1.20)$$

где c_n – коэффициент постели;

$k_0(t, \tau)$ – функция наследственности.

Считая справедливой гипотезу плоских сечений и приняв материал пластины упругим, рассматривалось уравнение изогнутой оси зуба:

$$EI \left[\frac{1}{c_n} \cdot \frac{\partial^3 q(x,t)}{\partial x^3} + \int_0^t k_0(t, \tau) \cdot \frac{\partial^3 q(x,t)}{\partial x^3} d\tau \right] = -T + \int_0^x q(\xi, t) d\xi; \quad (1.21)$$

где T – нагрузка на зуб пластины.

Уравнение (1.10) решалось разложением функции $q(x,t)$ в ряд.

В свою очередь Крицин А. В в своей работе [50] использовал линейный закон деформирования упруго-вязких материалов, который был представлен в следующем виде:

$$c_n \cdot y(x, t) + EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + EI \int_{t_0}^t \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} k_0(t, \tau) d\tau = 0; \quad (1.22)$$

Уравнение (1.11) решалось аппроксимированием с помощью кусочно-линейных функций, что позволяет привести интегро-дифференциальное уравнение (1.22) к системе нескольких линейных уравнений в указанных точках.

Исследования Крицина А. В., Лоскутовой Д. В., [50, 54] показали, что справедливость предложенной методики подтверждается экспериментальными исследованиями и может являться предпосылкой к расчету деревянных конструкций с соединениями на металлических зубчатых пластинах по II-й группе предельных состояний. Приняв в своей основе необходимые изменения, учитывающие отличие форм когтей и расположение зубьев для МЗП и когтевых шайб, возможно использование методик для расчета соединений с когтевыми шайбами по II группе предельных состояний.

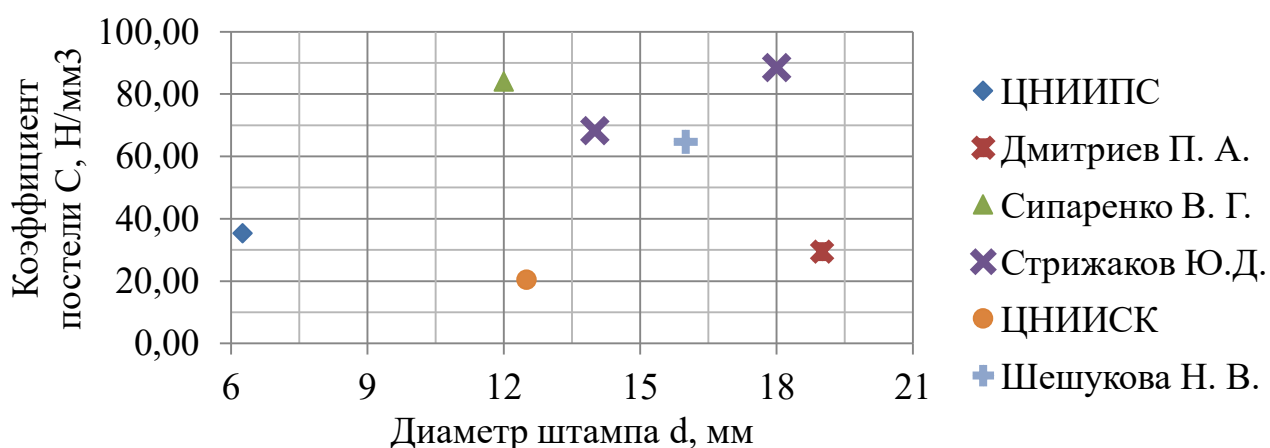
Работы по определению прочности и жесткости древесины разных пород на местное смятие цилиндрическими штампами были проведены отечественными учеными такими, как Коченов В. М., Панферов К. В, Наумов А. К., Дмитриев П. А. Стрижаков Ю. Д., Шешуковой Н. В. и другими авторами [49, 63, 57, 27, 30, 111]. Авторами получены зависимости коэффициента постели от влажности древесины при разных диаметрах штампов. Результаты исследований коэффициентов постели для древесины при действии нагрузки вдоль волокон приведены в Таблице 1.1. Полученные данные могут использоваться для сравнения с результатами испытаний при использовании материалов основания на основе древесины. Если привести полученные значения коэффициентов постели к влажности древесины $W=12\%$ по формуле (1.32), можно проследить, что полученные авторами значения имеют большие расхождения (Рисунок 1.6). Данное обстоятельство требует проведения уточняющих испытаний для определения коэффициента постели для *LVL* при различных диаметрах цилиндрического штампа. Перечисленные выше работы были выполнены для уточнения методик расчета нагельных соединений и соединений на МЗП. Так, например, Наумов А. К. использует в своих работах по изучению соединений на МЗП зависимости сопротивления древесины смятию под зубом при смятии вдоль волокон:

$$R_{см,0}^{вр} = 0.7R_{сж}^{вр}; \quad R_{см,0}^{длит.} = 11 \text{ МПа}; \quad (1.23-1.24)$$

где $R_{сж}$ – прочность древесины сжатию вдоль волокон.

Таблица 1.1. Значения коэффициентов постели [49, 63, 57, 27, 30, 111]

Автор	Диаметр штампа d , мм	Влажность, $W\%$	Коэффициент постели C , Н/мм ³
Вдоль волокон			
ЦНИИПС	6,25	13	34
Сипаренко В. Г.	12	15	75
ЦНИИСК	12,5	10	22,25
Стрижаков Ю.Д.	14	15	61
Шешукова Н. В.	16	8	94,23
Шешукова Н. В.	16	12	64,65
Шешукова Н. В.	16	30	25,40
Стрижакова Ю.Д.	18	15	79
Дмитриев П. А.	19	11	31,97
Поперёк волокон			
Шешукова Н. В.	16	8	17,62
Шешукова Н. В.	16	12	11
Шешукова Н. В.	16	30	7,7

Рисунок 1.6. Значения коэффициентов постели вдоль волокон, приведенные к влажности $W=12\%$ [49, 63, 57, 27, 30, 111].

При смятии поперек волокон в зависимости от ширины штампа сопротивление смятию древесины $R_{см}$ представлено в Таблице 1.2.

Таблица 1.2. Зависимость сопротивления древесины смятию поперек волокон от ширины штампа [50, 51].

	Ширина штампа $b_{см}$			
	1	2	3	4
$R_{см}$	8	7	6	5

Определением сопротивления смятия в древесине от передачи нагрузки прямоугольным штампом известны работы Цепяева В. А., Авдеева А. В.,

Крицина А. В. и др. [1, 50, 99]. Авторами были испытаны сосновые образцы на смятие прямоугольными штампами шириной от 1 до 4 мм и были получены зависимости между пределом прочности древесины при смятии штампом (Рисунок 1.7), пределом прочности древесины и шириной прямоугольного штампа, а также был определен коэффициент постели в зависимости от ширины штампа. Данные зависимости выражаются следующими выражениями:

При смятии вдоль волокон:

$$R_{\text{см},0}^{\text{BP}} = (0,022b_{\text{см}} + 0,761)R_{\text{сж}}^{\text{BP}}; \quad (1.25)$$

$$C_0^{\text{BP}} = (-0,140b_{\text{см}} + 2,289)R_{\text{сж}}^{\text{BP}}; \quad (1.26)$$

При смятии поперек волокон:

$$R_{\text{см},90}^{\text{BP}} = (-0,072b_{\text{см}} + 0,718)R_{\text{сж}}^{\text{BP}}; \quad (1.27)$$

$$C_{90}^{\text{BP}} = (0,094b_{\text{см}} + 0,826)R_{\text{сж}}^{\text{BP}}. \quad (1.28)$$

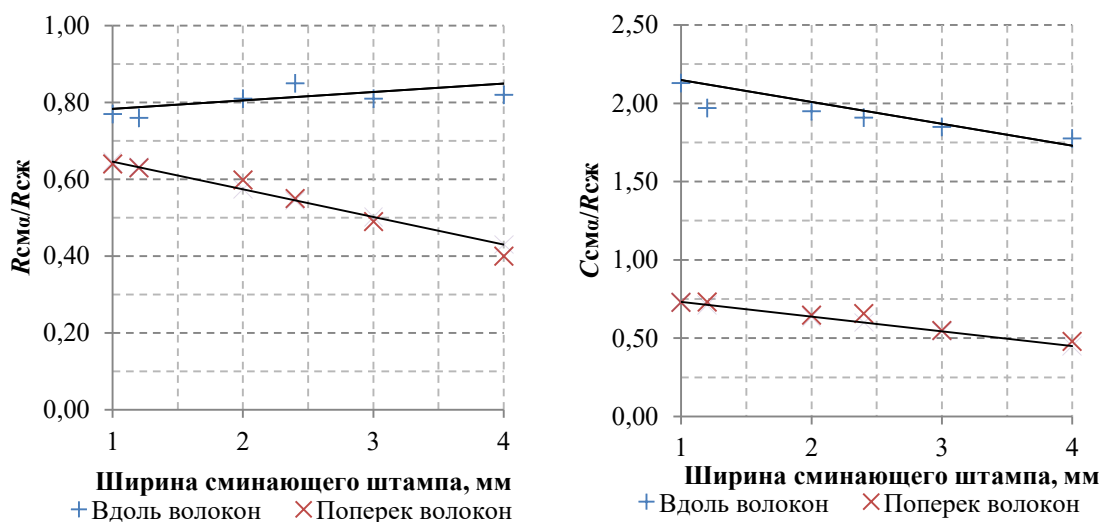


Рисунок 1.7. Экспериментальные зависимости: а) между отношением предела прочности древесины при смятии вдоль волокон к пределу прочности при сжатии при заданной ширине штампа; б) между отношением коэффициента постели древесины при смятии вдоль волокон к пределу прочности при сжатии при заданной ширине штампа [50].

Крицин А. В., анализируя данные выражения (1.25-1.28), уточняет, что предел прочности древесины смятию вдоль волокон практически не зависит от

ширины штампа в рассматриваемых пределах $b_{см}$, в отличие от прочности при смятии поперек волокон [50].

Влияние изменения угла смятия α по отношению к волокнам на коэффициент постели и прочность предложено учитывать Ашкенази Е. К. [2] следующими выражениями:

$$R_{см,\alpha}^{вр(дл)} = \frac{R_{см,0}^{вр(дл)}}{1 + \left(\frac{R_{см,0}^{вр(дл)}}{R_{см,90}^{вр(дл)}} - 1 \right) \sin^n \alpha}; \quad (1.29)$$

$$C_{см,\alpha}^{вр(дл)} = \frac{C_{см,0}^{вр(дл)}}{1 + \left(\frac{C_{см,0}^{вр(дл)}}{C_{см,90}^{вр(дл)}} - 1 \right) \sin^n \alpha}. \quad (1.30)$$

Крицин А. В. в своей работе [50] отмечает, что показатель степени $n=2$ для формул (1.29-1.30) отражает указанные зависимости достаточно точно для прямоугольных штампов, что подтверждается экспериментально, как для напряжений на пределе пропорциональности, так и для напряжений разрушения.

Прочности древесины σ_{12} и коэффициент постели C_{12} для влажности $w=12\%$ для штампов принимаются по следующим выражениям:

$$\sigma_{12} = \sigma_w [1 + \alpha(w - 12)]; \quad (1.31)$$

$$C_{12} = C_w [1 + \alpha(w - 12)]; \quad (1.32)$$

где σ_w – предел прочности при соответствующей влажности w ;

α – поправочный коэффициент, принимаемый 0,04 для древесины вдоль волокон, 0,035 для древесины поперек волокон;

C_w – коэффициент постели при соответствующей влажности w ;

В работе Леннова В. Г. [53] коэффициент постели для предложенной автором формы когтевой шайбы принят равным 3000 кг/см^3 . В своей работе автор определяет напряжения смятия древесины под когтем принимая усредненную ширину когтя, представив его форму в виде прямоугольника. Леннов В. Г. не рассматривает влияние фактора форм когтей на коэффициент постели.

Таким образом, авторами даются эмпирические формулы для определения сопротивления смятию под зубом пластины МЗП или нагелем, преимущественно для древесины сосны. Поскольку соединения с когтевыми шайбами используются

в совокупности с металлическими нагелями важно использовать для расчета уточненные коэффициенты постели и сопротивления древесины смятию при различных направлениях действия нагрузок к волокнам используя цилиндрический и треугольный штамп.

Поскольку под воздействием длительной нагрузки в структуре древесины происходят изменения, ползучесть древесины увеличивается за счет релаксационных свойств материала. Учет длительности загрузки является важным аспектом расчета деревянных конструкций. В отечественной школе проектирования и за рубежом имеется достаточно информации о работе древесины под воздействием длительного нагружения, однако информации о длительной прочности и жесткости *LVL* недостаточно [130].

Известны работы, посвященные изучению прочностных свойств материала *LVL*, а также соединений на механических связях с учетом влияния температурно-влажностных воздействий в зависимости от уровня и времени действия нагрузки таких зарубежных ученых, как Н. Z. Zhou, Е. С. Zhu, S. W. Wang, Matthew Davies, Myriam Chaplain, Gérard Valentin, Alaa Chateaufneuf, Hugh Morris, Pierre Quenneville [130, 145, 147]. Авторами предлагаются графики зависимости деформации от времени и уровня воздействия на образцы, изготовленные из *LVL* производства компании *Kerto* (г. Лохья, Финляндия). Исследователи производили опыты, путем сжатия и растяжения образцов по направлению вдоль волокон. Результаты испытаний приведены на Рисунке 1.8.

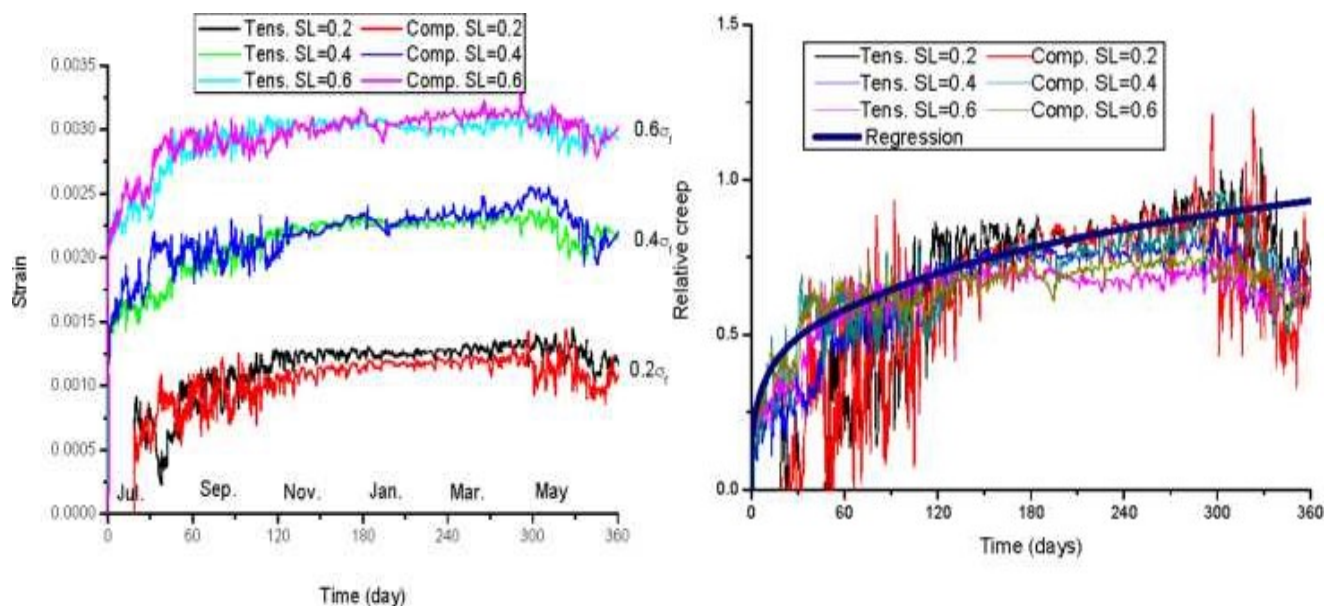


Рисунок 1.8. Результаты длительных испытаний для *LVL*: а) зависимость деформаций от длительности, уровня нагружения, вида напряженного состояния (сжатие, растяжение), б) зависимость относительной ползучести от времени воздействия, уровня нагружения и вида напряженного состояния [130].

На Рисунке 1.8 б) приведена зависимость относительной ползучести *LVL* при трех уровнях нагружения, где каждой ломаной линией представлены средние значения для 3 одинаковых образцов. Деформации ползучести изменялись стремительно на начальном этапе до двух месяцев, затем постепенно переходили в стадию равномерного устойчивого роста. Авторами [130] отмечается, что значительной разницы между ползучестью при сжатии и растяжении нет. Представленную кривую регрессии на Рисунке 1.8 б) можно описать с помощью уравнения:

$$\varepsilon_{crr} = \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_g} = u \cdot \ln(t) + k; \quad (1.33)$$

где ε_{crr} – относительная деформация ползучести,

ε_{cr} – общая деформация ползучести без учета мгновенной упругой деформации (мм);

ε_g – мгновенная упругая деформация (мм);

u – коэффициент, учитывающий влияние температурно-влажностного режима;

k – коэффициент, принимаемый из кривой деформирования *LVL*;

t - время приложения нагрузки (в сутках).

Для уравнения (1.33) удовлетворительно согласуются результаты при использовании коэффициентов u и k равными: $u = 0,138$; $k = 0,086$.

В работе [130] приводится моделирование релаксационных свойств LVL , при этом зависимость между пределом длительного сопротивления $\sigma_{дл}$, пределом прочности при машинных испытаниях $\sigma_{вр}$ и времени и длительности действия нагрузки может быть выражена следующим выражением:

$$\sigma_{дл} = 0,59\sigma_{вр}t^{-0.055}. \quad (1.34)$$

Для расчетов соединений конструкций с использованием когтевых шайб по предлагаемой методике необходимо иметь значение длительной прочности материала конструкции. Для определения длительной прочности LVL с прогнозом на период t может использоваться формула:

$$R_{дл} = R_{вр}m_{дл} = 0,59R_{вр}t^{-0.055}. \quad (1.35)$$

Цепаевым В. А., Крициным А. В., Ермолаевым В. В. для определения механических характеристик древесины при смятии прямоугольным штампом от действия длительных нагрузок с прогнозом на период τ_3 , эквивалентного действия неизменной нагрузки для разных напряженных состояний использовалась формула:

$$R_{дл} = R_{вр}\left(0,77 - \frac{\lg\tau_3}{22}\right). \quad (1.36)$$

В качестве сравнения результаты для прогнозирования длительной прочности материала конструкции по уравнениям (1.35) и (1.36) могут быть сопоставлены на графике (Рисунок 1.9). Для этого определяется эквивалентное время действия нагрузки $\tau_3 = 0,167\tau$, которое обосновано в рекомендациях по испытаниям и выражаются в сутках [71].

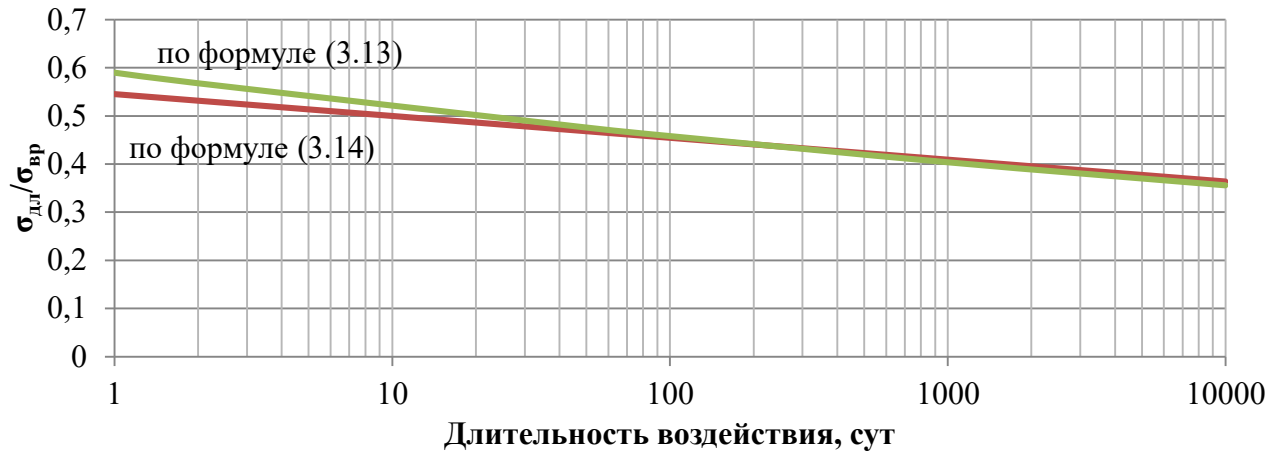


Рисунок 1.9. Результаты вычислений по расчетным формулам (1.35) и (1.36).

По Рисунку 1.9 заметна аналогия распределения отношений между пределом длительного сопротивления $\sigma_{дл}$ и пределом прочности при машинных испытаниях $\sigma_{вр}$ во времени. Расхождение в показаниях составляет около 11 % в начальный период времени и практически отсутствует с 200 суток.

Справедливость приведенных данных доказывается автором, что позволяет использовать полученный опыт для сравнения и оценки значений для треугольных штампов с материалом *LVL*.

Крициным А. В. [50] для решения основного уравнения теории наследственности опытным путем было определено значения ядра $K_0(t)$ для соответствующих моментов времени. При этом автор воспользовался уравнением для влажности образцов $W=8,4\%$:

$$K_0(t) = 0,018 \frac{e^{-1,078 \cdot 10^{-7} t}}{t^{1-0,0906}}; \quad (1.37)$$

для влажности образцов $W=10,7\%$:

$$K_0(t) = 0,018 \frac{e^{-1,078 \cdot 10^{-7} t}}{t^{1-0,1701}}; \quad (1.38)$$

Автором успешно используется данный метод определения ядра линейной наследственности, причем достоверность полученных значений была доказана, что позволяет применять данную методику в дальнейших расчетах настоящей работы.

Определением прочности древесины при сжатии цилиндрическими

штампами различных размеров от воздействия длительных нагрузок занимались многие ученые. Так, например, Дмитриев П. А. [32], Стрижаков Ю. Д. [94] получили уравнения, учитывающее связь прочность древесины на смятие $R_{см}$ в отверстиях с прочностью на сжатие $R_{сж}$ и диаметром d цилиндрического штампа. Шешуковой Н. В. [111] исследовалось влияние угла приложения нагрузки к волокнам и влияние влажности на исследуемые параметры ползучести древесины. Результаты исследований приведены на Рисунке 1.10.

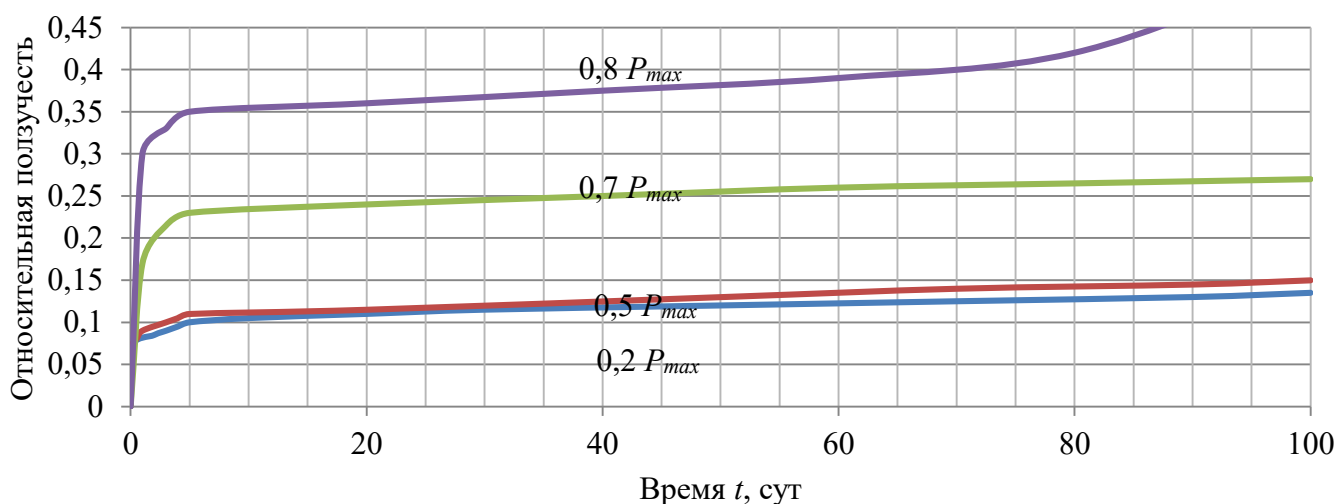


Рисунок 1.10. Кривые ползучести древесины при смятии цилиндрическими штампами вдоль волокон при влажности $W=12\%$ [22].

Приведенные на Рисунке 1.10 зависимости изменения ползучести для уровней нагружения во времени регистрируют затухающее распределение ползучести для уровня нагрузки до $0,7 P_{max}$ включительно. При уровне нагрузки $0,8 P_{max}$ возникают значительные деформации которые начинают активно развиваться начиная с 70 суток.

Изучение работы соединений деревянных конструкций на когтевых шайбах сопровождается большим объемом экспериментальных исследований. Основные зарубежные исследования несущей способности когтевых шайб типа «Бульдог» были проведены в Технологическом университете Дэлфта (Нидерланды), Научно-исследовательского строительного института в Штутгарте (Германия) [127, 140-143]. Практические методики расчета соединений

конструкций на когтевых шайбах формировались на основании результатов экспериментальных исследований. Одним из первых методика расчета соединений предложил Д. Х. Бласс [115-117]. Работа соединений с когтевыми шайбами в сравнении с другими соединениями представлена на Рисунке 1.11 [149].

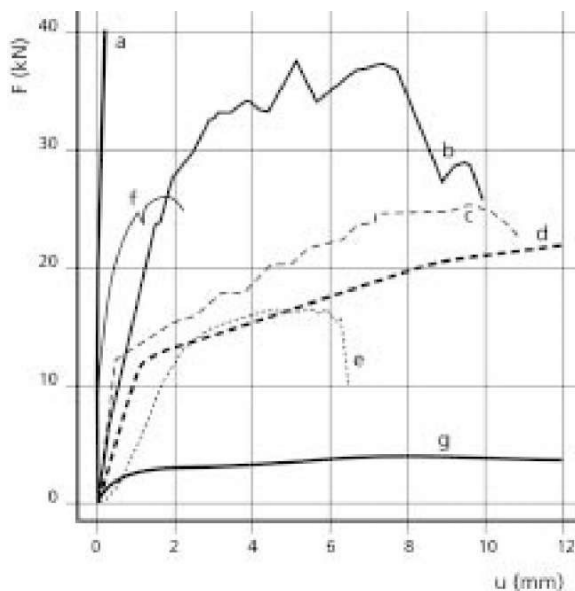


Рисунок 1.11. Экспериментальные зависимости деформаций от нагрузки для различных соединений при растяжении параллельно волокнам: *a)* клееные стержни ($12,5 \cdot 10^3 \text{ мм}^2$), *b)* кольцевая шайба (100 мм), *c)* двусторонняя зубчатая шайба ($\text{Ø} 62 \text{ мм}$), *d)* дубовый нагель ($\text{Ø} 14 \text{ мм}$), *e)* стальной болт ($\text{Ø} 14 \text{ мм}$), *f)* соединения на МЗП (10000 мм^2), *g)* соединение на гвоздях ($\text{Ø} 4,4 \text{ мм}$) [149].

В ходе работы по изучению соединений на когтевых шайбах были получены значения допустимой нагрузки на соединение. Факторами для измерения несущей способности соединений Д. Х. Блассом были приняты размеры шайб, плотность древесины, толщина сплавляемых элементов, диаметр болта (Рисунок 1.12). Однако в этой работе не было выявлено зависимости угла приложения нагрузки, а также многорядности постановки и влажности древесины на работу соединения. Так же, влияние плотности материала древесины на несущую способность соединения учитывается только до 500 кг/м^3 , обосновывая исчерпание несущей способности в дальнейшем за счет изгиба в зубьях когтевых шайб. Выводы были сделаны на основании испытаний с

древесинами европейских красных пород (плотность 450-600 кг/м³) и южной желтой сосны (плотность 600-800 кг/м³).



Рисунок 1.12. Типичная картина разрушения образца при испытаниях [117].

Модель расчета соединений, представленная в работах Д. Х. Бласса [115-117], является рекомендованной европейскими нормами проектирования деревянных конструкций так же и для материалов на основе древесины [125]. Так с 1957 по 1991 год было проведено 426 испытаний когтевых шайб в соединениях деревянных элементов. Получены зависимости несущей способности для различных конфигураций и типов когтевых шайб, угла направления силы к волокнам, количества когтевых шайб. В ходе испытаний было замечено частое разрушение образцов ввиду смятия древесины под когтями шайбы и нагелем. С увеличением деформаций отмечалось возникновение трещин внутри соединяемых элементов.

Так же, была проведена работа по изучению когтевых шайб Меттемом С. Д., Пэйджем А. В. и др. [146]. Авторами были проведены проверочные испытания соединений на когтевых шайбах «Бульдог» с древесиной сосны, с оценкой и сравнением различных формул расчета таких соединений по прочности. Между собой были сравнены уравнения определения несущей способности

предложенные Д. Блассом и М. Шаглером, уравнение, предложенное С. Меттемом и формулой на основе сведений, предложенных авторами ранее [146]. В ходе работы было выявлено, что уравнение, предложенное *Eurocode 5*, отражает реальную картину работы соединения и дает хорошее сопоставление с результатами эксперимента для элементов толщиной 25 мм и плотностью около 500 кг/м³, однако не позволяет адекватно учитывать влияние изменения этих параметров.

Авторы не затронули вопросы оценки линейной и угловой жесткости соединений с когтевыми шайбами. В работе, проведенной Меттемом С. Д., Пэйджем А. В. и др. [146] были рассмотрены результаты 1991 испытания и проводились сравнения результатов расчетов по формулам, предложенным в работе [109], и собственными формулами, учитывающими толщины деревянных элементов, плотность древесины, диаметр шайбы и нагеля

$$R_{j,k} = 0,0014(t_{min})^{0.5}(Q_{eff,k})^{1.25}(d_{к.ш.})^{1.5} + R_{b,k} \quad (1.39)$$

$$Q_{eff,k} = \sqrt{Q_a Q_b} \quad (1.40)$$

где Q_a и Q_b – плотность крайних и средних элементов соответственно;

t_{min} – минимальная толщина из крайних и средних элементов соединения.

Результаты максимальной несущей способности в зависимости от диаметра когтевой шайбы и ее формы, а также сравнение с расчетной несущей способностью по Нидерландским Нормам NEN 3852 представлены в Таблице 1.3, 1.4.

Таблица 1.3. Несущая способность когтевых шайб в сравнении с NEN 3852.

$d_{к.ш.}$, мм	$d_{наг.}$, мм	c , мм	a , мм	Эксперимент		Расчет по NEN 3852		Отношение
				$N_{к.ш.}$, кН	$N_{наг.}$, кН	$N_{к.ш.}$, кН	$N_{наг.}$, кН	
50	10	20	19	5,3	2,8	2	0,9	2,88
62	12	26	19	7,3	4,3	3	1,4	2,75
75	12	29	19	9,7	4,8	4	1,6	2,71
95	16	38	25	13,9	8	5,5	2,7	2,75
117	20	58	39	19	14,5	8	5,2	2,58
100x100	16	32	21	18	6,7	7	2,3	2,74
130x130	20	40	27	26,7	10	11	3,6	2,60
70x130	16	58	39	15,2	10,1	6	4,2	2,47

Таблица 1.4. Несущая способность когтевых шайб в сравнении с NEN 3852.

Тип испытаний	$d_{к.ш.}$, мм	$d_{наг.}$, мм	a , мм	c , мм	F на 1 срез	По ф-ле (2.1)	По ф-ле (4.1)
A	63	12	25	50	16,8	16,42	15,7
C	63	12	25	50	14,65	16,42	15,7
E	63	12	25	50	23,55	18,58	23,32
F1	38	10	25	50	12,45	9,96	9,62
F2	50	12	25	50	11,72	13,98	13,45
F3	75	12	25	50	18,72	19,11	18,17
H1	63	12	25	50	12,18	15,82	13,45
H2	63	12	25	50	21,68	18,12	20,82

Податливость различных соединений в конструкциях из древесины (в том числе с использованием когтевых шайб) была исследована Ю. Хирасима [131]. Автор исследовал различные шпоночные соединения и влияние длительности загрузки, влажности, неравномерности распределения усилий при многорядовой постановке, а также характер внедрения соединителя в тело древесины (вдавливание или предварительная выборка древесины) на несущую способность соединения. Ю. Хирасима отмечает важность своевременного подкручивания гаек в таких соединениях, чтобы гарантировать нахождение когтей шайбы в гнезде при усушке древесины. Автор рассматривает преимущественно древесину твердых пород, произрастающую на юге Японии (акация белая, граб, сосна японская черная), которая имеет отличные физико-механические характеристики от древесины используемой в России и Европе.

Изучению влияния длительной нагрузки на соединения древесины с когтевыми шайбами посвящены следующие работы [141-143, 150]. В них приводятся различные результаты исследований длительной прочности соединений с когтевыми шайбами. Так в работе [150] приводятся средние кривые ползучести для 5 серий испытаний соединений по трем уровням нагрузки: 30%, 40% и 50%. В работе отмечено, что очертание кривой при уровне нагрузки в 30% получается с более крутым подъемом, нежели для 40% и 50%. Отмечается зависимость: чем выше уровень нагрузки, тем меньше увеличение ползучести и замечен значительный прирост ползучести с увеличением влажности в лаборатории и замечается спад при соответственном уменьшении влажности.

Результаты работы представлены на Рисунке 1.13.

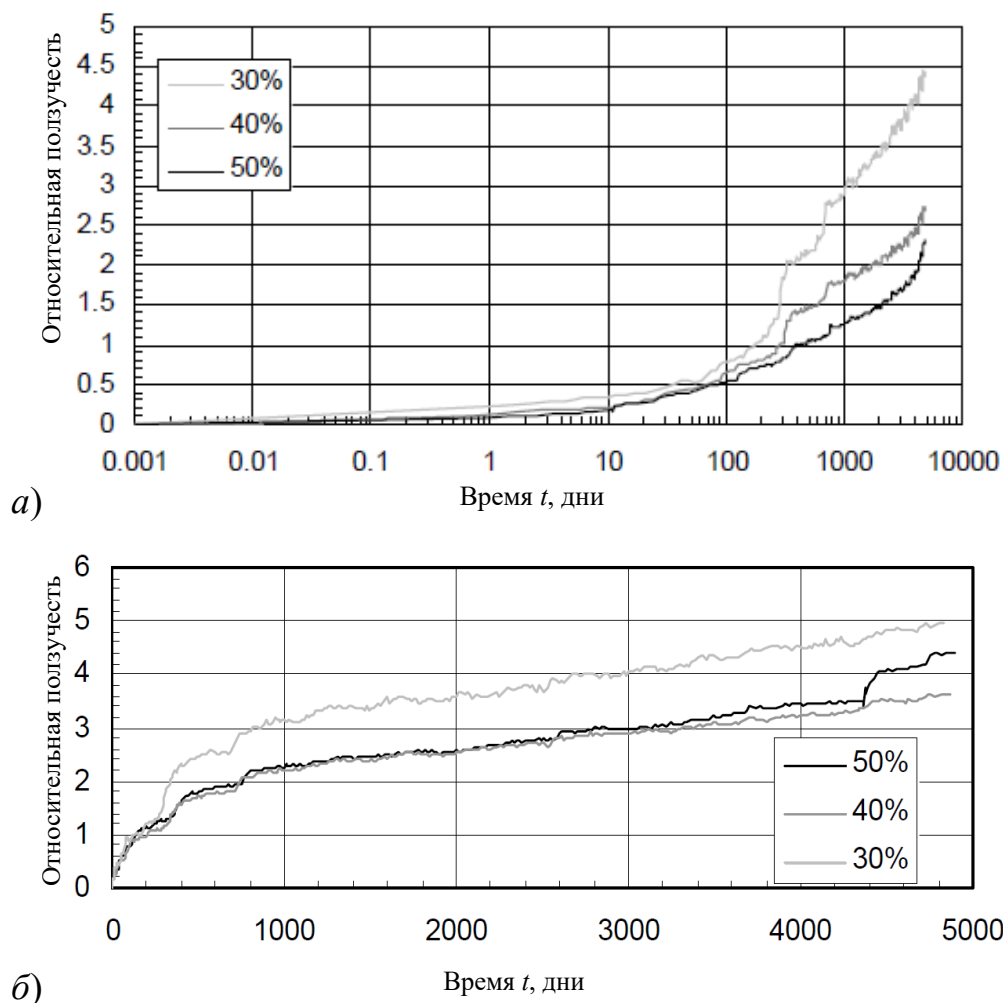


Рисунок 1.13. Ползучесть соединений древесины с когтевыми шайбами приведенная в работе Ван Де Кулена [150]: а) на логарифмической шкале времени, б) на обычной шкале времени.

В Технологическом университете Вильнюса С. Римантасом и командой ученых были проведены испытания для изучения реальной работы соединения в составе целой конструкции фермы [149] (Рисунок 1.14). В качестве конструкции для испытания были выбраны композитные фермы с металлическими трубчатыми раскосами и параллельными поясами производства фирмы «MacMillan» (Канада) с использованием когтевых шайб «Бульдог». Автор отмечает зависимость несущей способности соединений от угла между направлением приложения нагрузки и волокон. Модуль деформации фактически оказался выше на 13% по сравнению с теоретическим значением, и его величина

зависит от угла приложения нагрузки по отношению к направлению волокон. Статические перемещения оказались значительно выше, чем указанные в *Eurocode 5*. А так же было выяснено, что перераспределения напряжений в конструкции начинаются, когда в узлах с шайбами «Бульдог» возникают перемещения около 2 мм.



Рисунок 1.14. Экспериментальное исследование фермы с параллельными поясами с когтевыми шайбами Технологическом университете Вильнюса [149].

В механической лаборатории СПбГАСУ ранее проводились исследования конструкций ферм из *LVL* с использованием нагельных соединений Животовым Д. А. [37]. Автором указанной работы была выбрана ферма с параллельными поясами, аналогичной геометрии. В данной конструкции использовались накладки из ДСП-В и нагели диаметром $d_{\text{наг}} = 6$ мм в узлах, с расстановкой на расстоянии $5d_{\text{наг}}$. Несущая способность элементов фермы не была израсходована из-за разрушения соединения нижнего пояса. Животов Д. А. в своей работе отмечает, что разрушающая нагрузка, приложенная в узлах составила 15 кН, без учета коэффициента длительности 1,65-1,88. Зависимость деформаций узлов нижнего пояса для различных уровней нагрузки представлена на Рисунке 1.15.

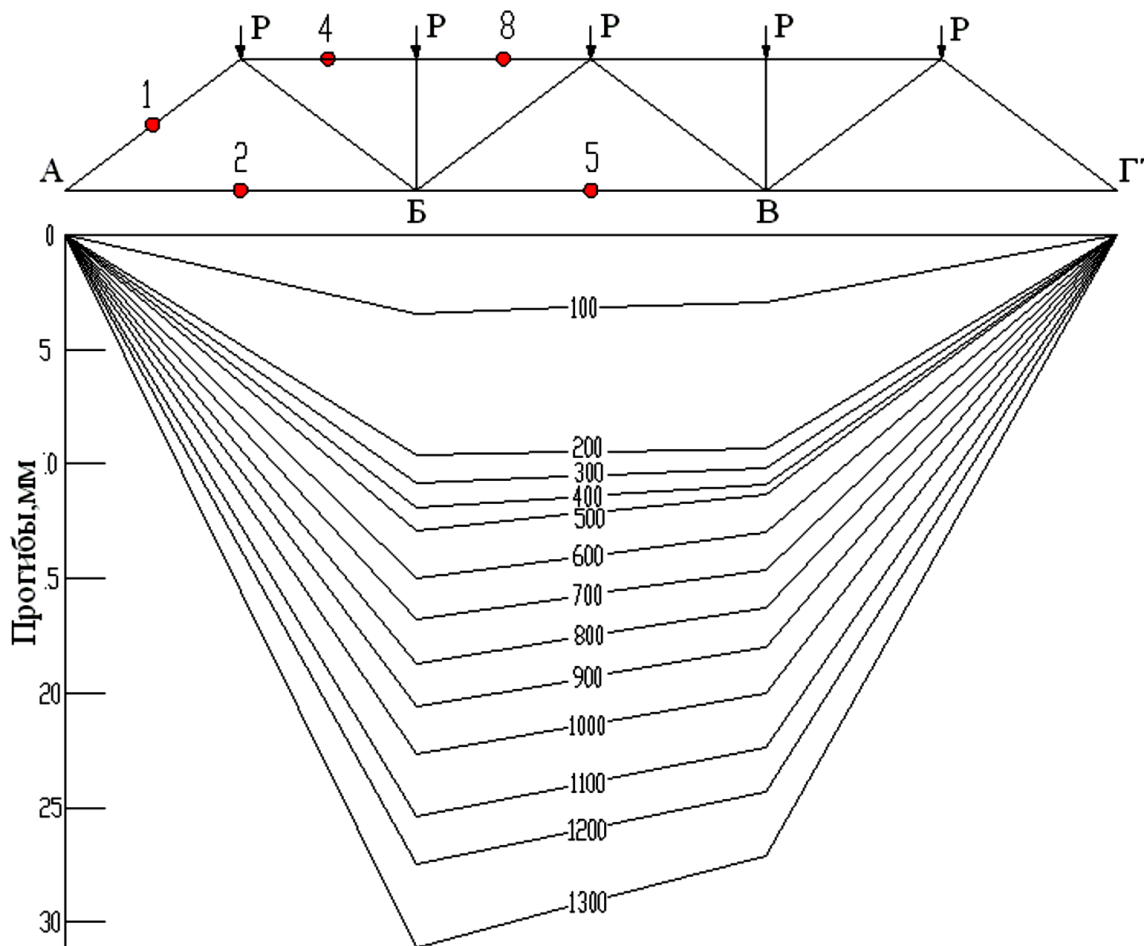


Рисунок 1.15. Прогибы нижнего пояса конструкции фермы на нагелях [37].

Указана нагрузка на узел в кг.

В 2011 году Ассоциацией Деревянного Домостроения совместно с СПбГАСУ (г. Санкт-Петербург) и БелНИИС (г. Брест, Белоруссия) под руководством Черных А. Г. и Найчука А. Я. были произведены испытания соединений и выпущен стандарт СтАДД – 3.2 -2011, адаптирующий европейские и российские нормы расчета соединений на зубчатых и когтевых шайб [92]. Данный стандарт регламентирует конструктивные требования к расстановке соединителей в зависимости от размера шайб и угла приложения нагрузки, предлагает формулы для расчета несущей способности соединений на основе европейских норм и предлагает методику для проведения испытаний соединений деревянных конструкций на когтевых и зубчатых шайбах по двум предельным состояниям. Данный стандарт позволяет выполнить прогноз деформативности соединений только для длительного периода времени (более 50 лет), и только для

соединителей, ограниченных стандартом *EN912* [124], при этом используется значительный запас прочности, учитывающий фактор неизученности работы соединения, включающий учет влажности древесины, наличие дефектов в соединении, обобщенную картину потери прочности древесины под нагрузкой во времени.

Рассмотренные методики исследований имеют недостатки, устранение которых может увеличить точность расчетов соединений конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами. Поэтому целью данной диссертационной работы является исследование НДС нагельных соединений конструкций с когтевыми шайбами и разработка методики расчета. В данной работе были установлены следующие задачи:

- разработать математическую модель соединения с нагелями и когтевыми шайбами, а также предложить методику расчета;
- уточнить механические свойства материалов элементов соединения при воздействии кратковременных и длительных статических нагрузок;
- провести экспериментальные исследования НДС соединений при воздействии продольного, поперечного усилия и изгибающего момента;
- разработать модель деревянной конструкции из *LVL* с когтевыми шайбами и реализовать экспериментальные исследования её несущей способности и жесткости;
- провести апробацию разработанной методики расчета и составить практические рекомендации по проектированию деревянных конструкций с использованием когтевых шайб.

Глава 2. Определение НДС нагельных соединений с когтевыми шайбами в *LVL*

1. Предпосылками для разработки теоретической модели расчета соединений явились результаты исследований по определению несущей способности нагельных соединений с когтевыми шайбами рассмотренные в п.п 1.2, 1.3 Главы 1. Приняты следующие допущения:

- ось нагеля принимается прямолинейной до момента образования в нем пластического шарнира;

- деформации нагеля (или когтя шайбы) и *LVL* совместны.

Для данного раздела были установлены следующие подзадачи:

- разработка теоретических моделей нагеля и когтя шайбы, учитывающих влияние габаритов элементов соединения, влажности *LVL*, длительности действия усилия, прочностные и жесткостные характеристики исходных материалов;

- разработка алгоритма расчета нагельных соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из *LVL*.

2.1. Определение связи между усилием, воспринимаемым нагелем и его смещением

Расчет нагельных соединений в конструкциях из *LVL* выполняется как для балки на упруго-вязком основании. Возникающие деформации появляются с самого начала нагружения и изменяются от величины нагрузки, что обосновано свойствами материала *LVL*. В случае длительного воздействия нагрузки в *LVL* возникают деформации смятия, что объясняется ползучестью древесины.

Для древесины сосны были проведены исследования поведения образцов при смятии в отверстиях [55, 56, 111]. Для выражения степени нелинейности зависимости ползучести древесины от нагрузки были получены изохронные кривые. При анализе данных кривых было выяснено, что нелинейность кривых возрастает с увеличением нагрузки, и при изменении угла наклона волокон и

влажности древесины.

Для описания вязко-упругих свойств можно использовать уравнение, где нелинейность зависимостей факторов учитывается за счет формы кривой мгновенного деформирования, предложенное Работновым Ю. Н. [70] (см. Рисунок 2.1):

$$c \cdot y(x, t) = p(x, t) + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau; \quad (2.1)$$

где C – коэффициент постели от действия цилиндрического штампа;

$p(x, t)$ – реакция гнезда нагеля;

$K(x, t)$ – наследственное ядро уравнения.

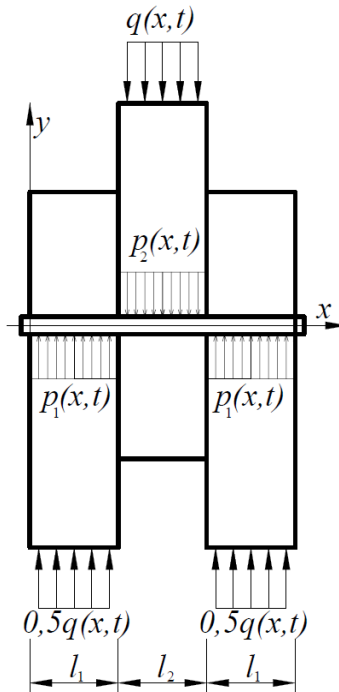


Рисунок 2.1. Схема к расчету нагельного соединения.

Если принять в качестве ядра уравнения функцию следующего вида [70],

$$K_0(t)_{\tau=0} = \frac{c}{\sigma_0} \cdot \frac{d\delta(t)}{dt}; \quad (2.2)$$

то появляется возможность использовать описание вязкоупругих свойств материала при различных режимах нагружения.

При $t=0$, уравнение (2.1) приобретает вид $c \cdot y(x, t) = p(x, t)$ и является кривой мгновенного деформирования.

Изогнутая ось нагеля описывается уравнением:

$$EIy^{IV}(x, t) + Cy(x, t) + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau = q(x, t); \quad (2.3)$$

где $q(x, t)$ – внешняя нагрузка.

Для решения данного уравнения можно воспользоваться разложением функции $y(x, t)$ в ряд:

$$y(x, t) = \sum C_{ij} z_{ij}; \quad (2.4)$$

где z_{ij} – представляет собой балочную функцию.

В нашем случае можем ограничить выбор первым членом ряда, аналогично работе [111]. Тогда уравнение принимает вид:

$$y(x, t) = \sum C_{1j} z_{1j}; \quad (2.5)$$

При выборе аппроксимирующей кривой учтем граничные условия для каждого деревянного элемента. Для симметричного двухсрезного соединения условия можно записать:

$$\begin{array}{l|l} \text{при } x=0; & \text{при } x=l; \\ EIy''(0, t)=0; & EIy''(l, t)=0; \\ y'''(0, t)=0; & y'''(l, t)=0; \\ M_0=Q_0=0; & M_l=Q_l=0; \end{array} \quad (2.6)$$

где l – длина нагеля в каждом деревянном элементе.

В работе Шешуковой Н. В. балочная функция принимается как:

$$z_{1j} = \sin \xi x + sh \xi x - \lambda (\cos \xi x + ch \xi x); \quad (2.7)$$

где ξ и λ принимаются из граничных условий:

$$\xi = \frac{m}{l}; \quad m = 4.73; \quad \lambda = 1.018; \quad (2.8)$$

Используя метод Бубнова-Галеркина было получено:

$$C_{1j} EI z_{1j}^{IV}(x, t) + C_{1j} Cy(x, t) + C_{1j} \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau = q(x, t). \quad (2.9)$$

При интегрировании на участке длины нагеля в каждом деревянном элементом и умножении уравнения (2.9) на величину $z_{1j}(x, t)$ получается выражение для крайних элементов:

$$C_{11} \int_0^{l_1} \left[EI z_{11}^{IV}(x, t) + C \varphi [z_{11}(x, t)] + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau \right] z_{11}(x, t) dx =$$

$$= \int_0^{l_1} q(x, t) z_{11}(x, t) dx. \quad (2.10)$$

Для среднего элемента получится выражение:

$$\begin{aligned} C_{12} \int_{l_1}^{l_2} \left[EI z_{12}^{IV}(x, t) + C\varphi[z_{12}(x, t)] + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau \right] z_{12}(x, t) dx = \\ = \int_{l_1}^{l_2} q(x, t) z_{12}(x, t) dx. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Тогда коэффициенты C_{11} , C_{12} , C_{13} определяются, как:

$$C_{11} = C_{13} = \frac{\int_0^{l_1} q(x, t) z_{11}(x, t) dx}{\int_0^{l_1} [EI z_{11}^{IV}(x, t) + C\varphi[z_{11}(x, t)] + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau] z_{11}(x, t) dx}; \quad (2.12)$$

$$C_{12} = \frac{\int_{l_1}^{l_2} q(x, t) z_{12}(x, t) dx}{\int_{l_1}^{l_2} [EI z_{12}^{IV}(x, t) + C\varphi[z_{12}(x, t)] + \int_0^t p(x, t) K(t, \tau) d\tau] z_{12}(x, t) dx}. \quad (2.13)$$

Ядро уравнения $K(t, \tau)$ принимается в результате аппроксимации кривых ползучести древесины и принимается в виде:

$$K_0(t) = A \frac{e^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}}; \quad (2.14)$$

где A , α , δ – постоянные уравнения (2.14);

t – время нагружения.

После определения C_{11} , C_{12} , C_{13} данные коэффициенты подставляются уравнение (2.5) и методом интегрирования собираются все составляющие уравнения.

Для отображения сложной формы кривой изгиба оси нагеля в одном выражении в работе [111] предложено воспользоваться функциями Хэвисайда [4]. При использовании кусочно-постоянных функций Хэвисайда $H(x-x_1)$ с любой зависимостью $f(x)$, такая зависимость становится ограниченной по необходимому параметру:

$$H(x-x_1)f(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_1; \\ 1 & \text{при } x > x_1; \end{cases} \quad (2.15)$$

причем при использовании произведения зависимости $f(x)$ и разности единичных функций H_{xx}

$$H_{xx}f(x) = f(x)(H(x-x_1) - H(x_1-x_2)) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_1 \\ 1 & \text{при } x_1 < x < x_2 \\ 0 & \text{при } x > x_2 \end{cases}. \quad (2.16)$$

Для отражения деформирования оси нагеля по всей длине можно

рассмотреть три участка, отражающих залегание нагеля внутри каждого элемента двусрезного соединения:

$$0 < x < l_1; \quad l_1 < x < l_1 + l_2; \quad l_1 + l_2 < x < l_2 + 2l_1. \quad (2.17)$$

Деформации на каждом участке отражаются, как сумма трех форм кривых.

$$Y(x, t) = Y_1(x, t)H_{xx1} + Y_1(x, t)H_{xx2} + Y_1(x, t)H_{xx3}, \quad (2.18)$$

где

$$\begin{aligned} H_{xx1} &= H(x) - H(x - l_1); \\ H_{xx2} &= H(x - l_1) - H(x - l_1 - l_2); \\ H_{xx3} &= H(x - l_1 - l_2) - H(x - l_2 - 2l_1); \end{aligned} \quad (2.19)$$

$Y_1(x, t)$, $Y_1(x, t)$, $Y_1(x, t)$ – прогиб в каждом из элементов соединения.

Учитывая выражение (2.16) можно записать уравнение деформации нагеля:

$$\begin{aligned} Y(x, t) &= C_{11}z_{11}(x, t)(H(x) - H(x - l_1)) + \\ &+ C_{12}z_{12}(x, t)(H(x - l_1) - H(x - l_1 - l_2)) + \\ &+ C_{13}z_{13}(x, t)(H(x - l_1 - l_2) - H(x - l_2 - 2l_1)). \end{aligned} \quad (2.20)$$

При нахождении решения уравнения (2.20) необходимо, чтобы удовлетворялись условия:

$$\sigma_{см} = \frac{q_{см}}{d_{см}} = \frac{d^4 y}{dx^4} \frac{EI}{d_{см}} < R_{см}^{дл}. \quad (2.21)$$

$$Y(x, t) \leq \delta_{пред} \quad (2.22)$$

где $R_{см}^{дл}$ - величины временного и длительного сопротивления LVL смятию под соответствующим углом к волокнам при действии цилиндрическим штампом; $\delta_{пред}$ - предельно допустимое смещение в узле, равное 2 мм, нормируемое сводом правил [89, 90].

2.2 Определение связи между усилием, воспринимаемым когтем шайбы, и его смещением

Для описания процесса деформирования гнезда когтя под воздействием нагрузки необходимо рассмотреть крайние случаи поворота когтя шайбы по отношению к углу приложения нагрузки, поскольку они отражают отличные друг

от друга частные случаи расположения зубьев в шайбе. При расположении когтя в направлении наименьшей изгибной жесткости (Рисунок 2.2) для когтя шайбы справедливы следующие выражения:

$$\frac{b(x)}{b} = \frac{x}{h}; \quad b(x) = \frac{b}{h}x; \quad (2.23)$$

Где b и h геометрические характеристики когтя шайбы.

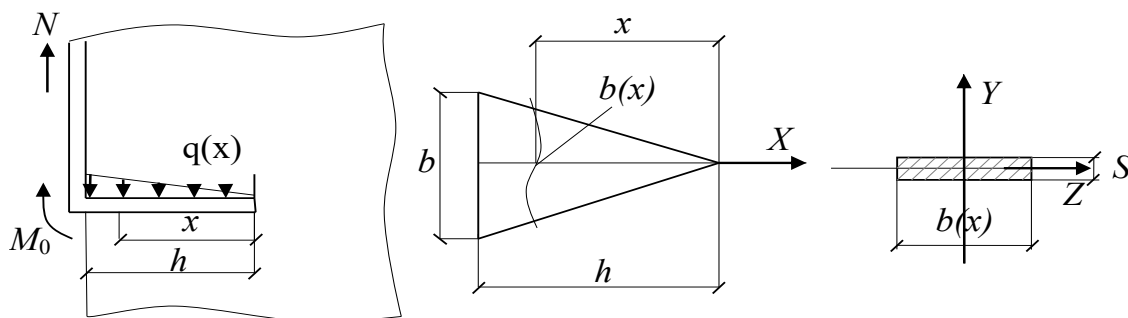


Рисунок 2.2. Схемы для расчета когтя шайбы под углом 0^0 к направлению приложения усилия N .

Расчет когтя шайбы выполним, как для балки переменного сечения на упруго-вязком основании. Приняв материал когтя упругим и пренебрегая влиянием поперечных сил на деформацию и принимая гипотезу плоских сечений, запишем дифференциальное уравнение упругой линии:

$$EI(x) \frac{d^2y}{dx^2} = M(x); \quad (2.24)$$

$$I(x) = \frac{b(x)S^3}{12} = \frac{bS^3}{12h}x; \quad (2.25)$$

Поскольку сила отпора переменна, дважды дифференцируем уравнение (2.24):

$$EI(x)\{y'' + xy'''\} = Q(x); \quad (2.26)$$

$$EI(x)\{2y''' + xy^{IV}\} = q(x); \quad (2.27)$$

$$q(x) = C_\alpha y; \quad (2.28)$$

где C_α - коэффициент постели для основания когтя, определенный под воздействием нагрузки от широкой стороны когтя под углом α к волокнам;
 y - прогиб когтя шайбы.

Поскольку геометрия когтя подразумевает треугольную форму (размер ширины по длине переменный) в таком виде использование выражения пропорциональности распределенной нагрузки $q(x)$ и прогиба y с использованием коэффициента постели C_α для прямоугольного, или цилиндрического штампа не совсем корректно. В таком случае, можно величину коэффициента постели C_α использовать, найдя экспериментально, как среднюю величину по формуле для штампа треугольного сечения:

$$C_\alpha = \frac{\Delta\sigma_{\text{см}}}{\Delta\varepsilon}. \quad (2.29)$$

Таким образом, уравнение (2.27) принимает вид:

$$xy^{IV} + 2y''' + \frac{C_\alpha \cdot y}{E \cdot I(x)} = 0. \quad (2.30)$$

Для описания работы когтя с учетом длительности загрузки воспользуемся законом (2.1), предложенным Работновым Н. Ю. [70] при $p(x, t) = \text{const}$, тогда уравнение (2.1) с учетом (2.30) можно записать в следующем виде:

$$EI(x)\{2y'''(x, t) + xy^{IV}(x, t)\} + C_\alpha y(x, t) + \int_{t_0}^t EI(x)\{2y'''(x, t) + xy^{IV}(x, t)\} K_0(t - \tau) d\tau = 0 \quad (2.31)$$

Для случая положения когтя в направлении наибольшей изгибной жесткости справедливо выражение (рисунок 2.3):

$$I(x) = \frac{sb(x)^3}{12} = \frac{sb^3}{12h^3} x^3; \quad (2.32)$$

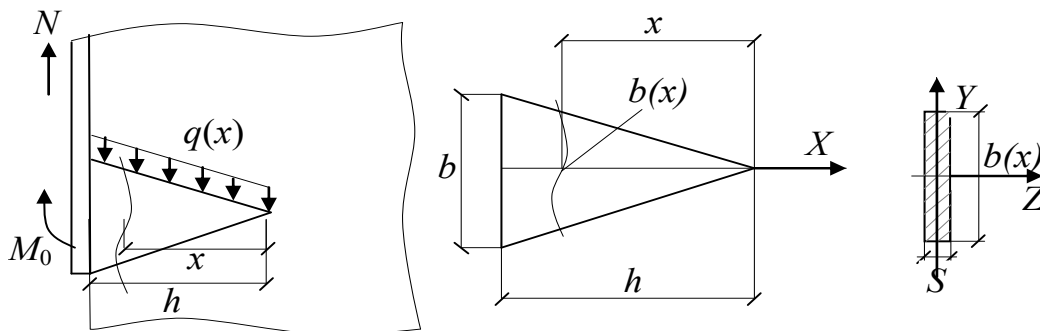


Рисунок 2.3. Схемы для расчета когтя шайбы под углом 90° к направлению приложения усилия N .

Подставим в уравнение (2.1) полученное выражение $I(x)$, тогда:

$$EI(x)x^3 \frac{d^2z}{dx^2} = M(x); \quad (2.33)$$

$$EI(x)\{3z''x^2 + x^3z'''\} = Q(x); \quad (2.34)$$

$$EI(x)\{z'''x^3 + 6z'''x^2 + 6z''x\} = q(x). \quad (2.35)$$

Учитывая уравнение (2.40), можно переписать:

$$z'''x^3 + 6z'''x^2 + 6z''x + \frac{C_{\alpha+90}z}{EI(x)} = 0; \quad (2.36)$$

где $C_{\alpha+90}$ - коэффициент постели основания когтя, определенный при действии нагрузки тонкой стороной когтя к волокнам.

Для описания работы соединения с учетом длительности загрузки перепишем уравнение (2.1) при $p(x, t) = const$, с учетом (2.36) в следующем виде:

$$C_{\alpha+90} \cdot z(x, t) + EI(x)\{z'''x^3 + 6z'''x^2 + 6z''x\} + \int_0^t EI(x)\{z'''x^3 + 6z'''x^2 + 6z''x\}K_0(t - \tau)d\tau = 0. \quad (2.37)$$

В уравнениях (2.31, 2.37) ядро $K(t, \tau)$ принимается по результату обработки экспериментальных кривых ползучести LVL при действии треугольным штампом.

Для случаев расположения когтя по отношению к направлению действия нагрузки кроме 0^0 и 90^0 необходимо рассматривать систему из двух уравнений (2.31) и (2.37) (Рисунок 2.4). Необходимо отметить, что усилие N необходимо будет разложить на составляющие, прикладываемые параллельно и перпендикулярно когтю. Вычисления уравнений (2.31), (2.37) до образования пластического шарнира должны проводиться при следующих граничных условиях:

при $x = 0$:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = 0; \quad \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = 0; \quad (2.38 - 2.39)$$

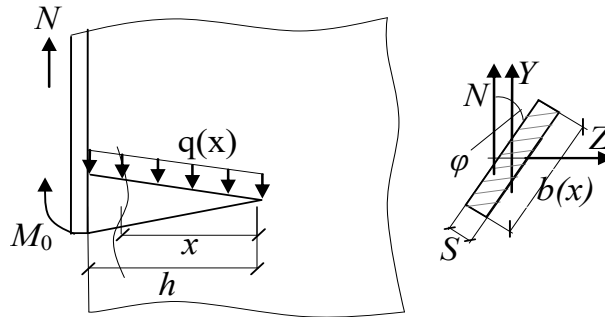


Рисунок 2.4. Схемы для расчета когтя шайбы под углом φ к направлению приложения усилия N .

при $x = h$:

$$\frac{dy}{dx} = \varphi = 0; \quad \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = -\frac{N}{EI}; \quad (2.40 - 2.41)$$

При образовании пластического шарнира, граничные условия изменятся:

при $x = 0$:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = 0; \quad \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = 0; \quad (2.42 - 2.43)$$

при $x = h$:

$$\frac{dy}{dx} = \varphi \neq 0; \quad \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = -\frac{N}{EI}; \quad (2.44 - 2.45)$$

Для определения момента, при котором образуется пластический шарнир в когте шайбы $M_{\text{пл}}$ (Н·мм), воспользуемся неравенством:

$$M_0 = \frac{d^2y}{dx^2} EI \geq M_{\text{пл}}; \quad M_{\text{пл}} = R_u W_{\text{пл}}; \quad (2.46 - 2.47)$$

$$R_u = \sigma_{\text{тек}} \cdot n; \quad W_{\text{пл}} = S_{\text{пл}}^{\text{В}} + S_{\text{пл}}^{\text{Н}}; \quad (2.48 - 2.49)$$

где R_u – расчетное сопротивление когтя шайбы с учетом упрочнения металла при штамповке, МПа;

$W_{\text{пл}}$ – пластический момент сопротивления сечения зуба, мм³.

$\sigma_{\text{тек}}$ – предел текучести материала стали когтя шайбы, МПа;

n – коэффициент упрочнения при штамповке, принимаемый по результату экспериментальных данных для материала когтевых шайб при холодной штамповке;

$S_{\text{пл}}^{\text{В}}, S_{\text{пл}}^{\text{Н}}$ – статические моменты сопротивления верхней и нижней частей сечения

относительно пластической нейтральной оси, мм³.

Решение уравнений (2.31), (2.37) выполняется в несколько этапов. При не выполнении условия (2.46) выполняются вычисления с предварительно принятым углом поворота в основании зуба, изменяя начальное условие (2.40) на (2.44).

Прочность древесины *LVL* при действии длительной нагрузки будет достаточной, если выполнится условие (2.50):

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{q_{\text{см}}}{b(x)_{\text{см}}} = \frac{d^4 y}{dx^4} \frac{EI}{b(x)_{\text{см}}} < R_{\text{см}}^{\text{дл}} k_t. \quad (2.50)$$

k_t – корректирующий коэффициент для учета влияния толщин соединяемых элементов (4.4).

При выполнении условия (2.50) выполнимо предсказание перемещений на заданный период времени. Так как напряжения смятия в гнезде когтя не превышают значения длительного сопротивления сжатию древесины. Данный подход практиковался Никитиным Г. Г. [58] и другими авторами.

Таким образом, для получения решения системы уравнений (2.31) и (2.37) необходимо иметь следующие величины, определяемые экспериментально:

$R_{\text{см}}^{\text{вр}}, R_{\text{см}}^{\text{дл}}$ – величины временного и длительного сопротивления *LVL* смятию;

E – модуль упругости материала стали когтя шайбы и нагеля;

$\sigma_{\text{тек}}$ – предел текучести материала стали когтя шайбы и нагеля;

C – кратковременный коэффициент постели древесины *LVL* для любого направления волокон при действии треугольным и цилиндрическим штампом;

$K(t, \tau)$ – ядро уравнения деформирования под любым воздействием к волокнам;

n – коэффициент упрочнения металла когтевых шайб при холодной штамповке.

2.3 Разработка методики расчета нагельных соединений на когтевых шайбах

Для расчёта соединений с когтевыми шайбами необходимо перейти к решению задачи определения линейной и угловой жесткостей соединения, с учетом того, что соединители, размещенные на различных расстояниях от центра вращения, будут иметь различные смещения и силовые воздействия.

Геометрической особенностью когтевой шайбы является расположение зубьев с периодичностью в 30° с разворотом каждого когтя относительно своей оси симметрии на 30° . В таком случае в шайбе из 12 когтей (с одной стороны) имеется 6 типов когтей с одинаковым углом разворота. Также, необходимо отметить наличие 6 (с каждой стороны) дополнительных когтей, предусмотренных для шайб диаметром 95 мм и более. Когти расположены по внутреннему диаметру отверстия и кососимметричны относительно центра тяжести шайбы. Данные когти имеют габариты, отличные от когтей, расположенных по окружности шайбы (Рисунок 2.5).

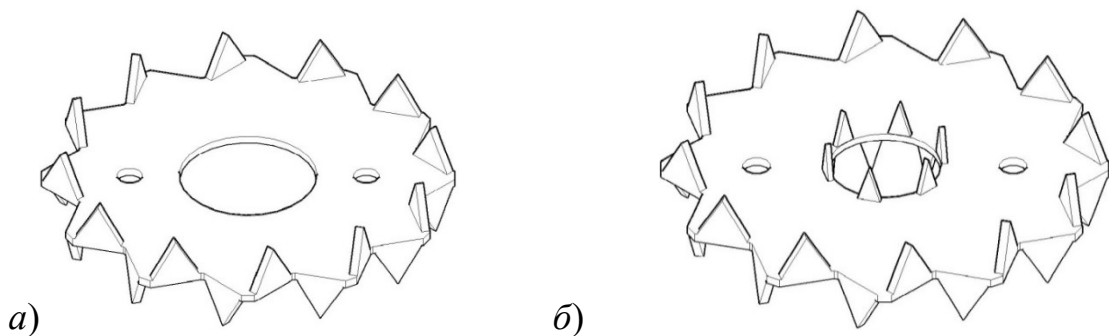


Рисунок 2.5. Внешний вид когтевых шайб разного диаметра: а) когтевые шайбы диаметром до 95 мм, б) когтевые шайбы диаметром 95 мм и более.

Для когтевой шайбы справедливы следующие выражения (Рисунок 2.6):

$$\begin{aligned} \varphi_1 = \varphi_7; & \quad \varphi_2 = \varphi_8; & \quad \varphi_3 = \varphi_9; \\ \varphi_4 = \varphi_{10}; & \quad \varphi_5 = \varphi_{11}; & \quad \varphi_6 = \varphi_{12}. \end{aligned} \quad (2.51)$$

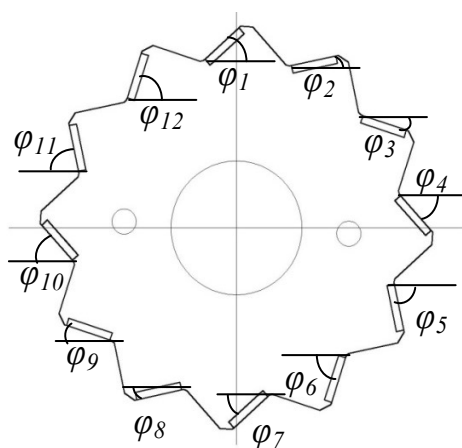


Рисунок 2.6. Схема расположения зубьев соединителя.

Леннов В. Г. [53] в своей работе для нахождения несущей способности всей шайбы предлагает проецирование каждого когтя шайбы на плоскость, перпендикулярную к направлению силового потока. Затем определение проекций всех когтей шайбы и полученная величина принимается за расчетную площадь смятия древесины. Так, как в разработанной Ленновым В. Г. шайбе минимальная несущая способность когтя приблизительно равна расчетному напряжению смятия древесины, то с некоторой малой погрешностью можно принять для всей расчетной площади смятия допустимое напряжение, равное расчетному сопротивлению смятия древесины. Произведением расчетной площади контакта и расчетного сопротивления смятию древесины находится предельное допустимое усилие на одну когтевую шайбу Леннова.

В нашем случае минимальная несущая способность когтя (широкой стороной) ниже расчетного напряжению смятия древесины LVL , а при угле поворота когтя относительно своей оси симметрии на 90° или близкому к этому значению (узкой стороной) – напряжение смятия древесины ниже несущей способности когтя. Тогда, прочность когтевой шайбы может быть найдена, как сумма несущих способностей всех когтей:

$$N_{\text{к.ш.}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{ког}}, \quad (2.52)$$

где $N_{\text{к.ш}}$ – несущая способность когтевой шайбы;

$N_{\text{ког}}$ – несущая способность i -го когтя.

Суммарная несущая способность одного соединителя на один срез будет найдена, как сумма несущих способностей нагеля и когтевой шайбы:

$$N_{\text{соед}} = N_{\text{к.ш.}} + N_{\text{наг.}} \quad (2.53)$$

При передаче нагрузки на узел внутри него могут возникать продольные усилия S_1 , поперечные усилия S_2 , изгибающий момент S_3 . На каждый соединитель внутри одного среза узла будут передаваться эквивалентные продольные усилия $S_{\text{экв.1}}$, поперечные усилия $S_{\text{экв.2}}$, усилие от действия момента $S_{\text{экв.3}}$. Для выполнения расчета за перемещения Δ принимаются смещения соединителей относительно начального положения.

При выполнении расчетов по прочности необходимо соблюдение условия для каждого соединителя:

$$N_{\text{соед}} \geq S_{\text{экв.}} \quad (2.54)$$

Для расчетов принимаются следующие допущения:

1) Положение центра вращения крепежа в соединении остается фиксированным. В соединениях деревянных конструкций, центр вращения, как правило, изменяется от изменения нагрузки. Когда соединение подвергается моменту, а также боковой нагрузке, силы, возникшие в соединяемых элементах, будут зависеть от того, изменяется ли центр вращения соединения или он зафиксирован. Однако, из-за относительно высокой жесткости соединителей изменение положения, как правило, будет незначительным. Поэтому предполагается, что центр вращения является зафиксированным. Исходя из этого, центр вращения принимается там же, где и центр группы соединителей.

2) При действии срезающих сил в соединении каждый крепежный элемент принимает равную долю силы. Следовательно, если принять усилие сдвига в горизонтальной плоскости S_1 , вертикальной плоскости S_2 и количество соединителей n , количество швов $n_{\text{ш}}$, то воспринимаемая сила для каждого соединителя в плоскости сдвига $S_{\text{экв.1}}$ и $S_{\text{экв.2}}$ будет находиться, как:

$$S_{\text{экв.1}} = \frac{S_1}{nn_{\text{ш}}}; \quad S_{\text{экв.2}} = \frac{S_2}{nn_{\text{ш}}}. \quad (2.55-2.56)$$

3) Все крепления в соединении будут иметь линейное смещение при

изменении нагрузки. Если предположить небольшой поворот в соединении под действием крутящего момента считается, что крепеж будет вращаться вокруг центра вращения, а передача нагрузки будет происходить путем передачи напряжений другим элементам в соединении. Чем дальше будет расположен соединитель от центра вращения r_i , тем большим будет смещение Δ_i (Рисунок 2.7). Так при появлении в соединении угла поворота Θ , при расстоянии наиболее отдаленного соединительного элемента r_{max} , от центра вращения при его и смещения Δ_{max} , смещение i -го соединителя Δ_i будет находиться, как:

$$\Delta_i = \frac{r_i}{r_{max}} \Delta_{max}. \quad (2.57)$$

4) Характер поведения каждого крепежного элемента зависит от направления силы в каждом элементе. Направление результирующей силы принимается под прямым углом к прямой линии, соединяющей элемент и центр вращения в ненагруженном состоянии.

5) Расстояние до крепежного элемента принимается из условия, что не произойдет преждевременного расщепления или смятия.

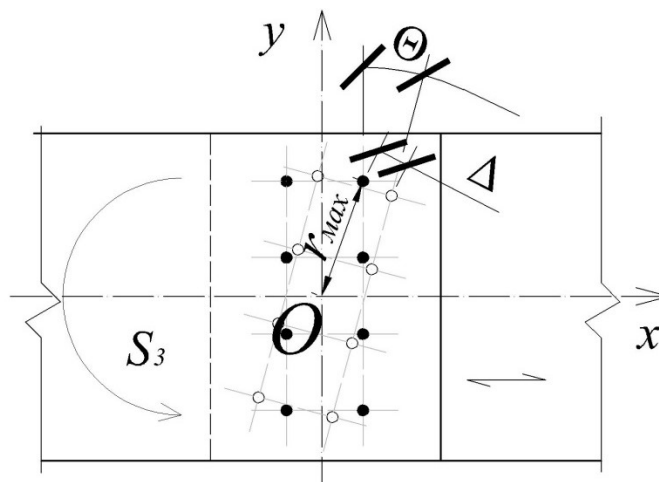


Рисунок 2.7. Характер поведения соединителей под действием нагрузки.

Рассмотрим двусрезное соединение, подвергающееся сочетанию крутящего момента S_3 и сил S_1 и S_2 , в котором есть n крепежных элементов одинакового размера (Рисунок 2.8). Горизонтальная и вертикальная составляющие на одной плоскости среза в каждом соединителе будут находиться по уравнениям (2.55, 2.56). Момент, приходящийся на n соединителей в двух плоскостях среза в

соединении, будет находиться:

$$S_3 = \frac{S_{\text{эkv.3,макс}}}{r_{\text{max}}} n_{\text{ш}} \sum_{i=1}^n r_i^2. \quad (2.58)$$

Поэтому максимальное усилие $S_{\text{эkv.3,макс}}$ может быть найдено, как:

$$S_{\text{эkv.3,макс}} = \frac{S_3 r_{\text{max}}}{n_{\text{ш}} \sum_{i=1}^n r_i^2}. \quad (2.59)$$

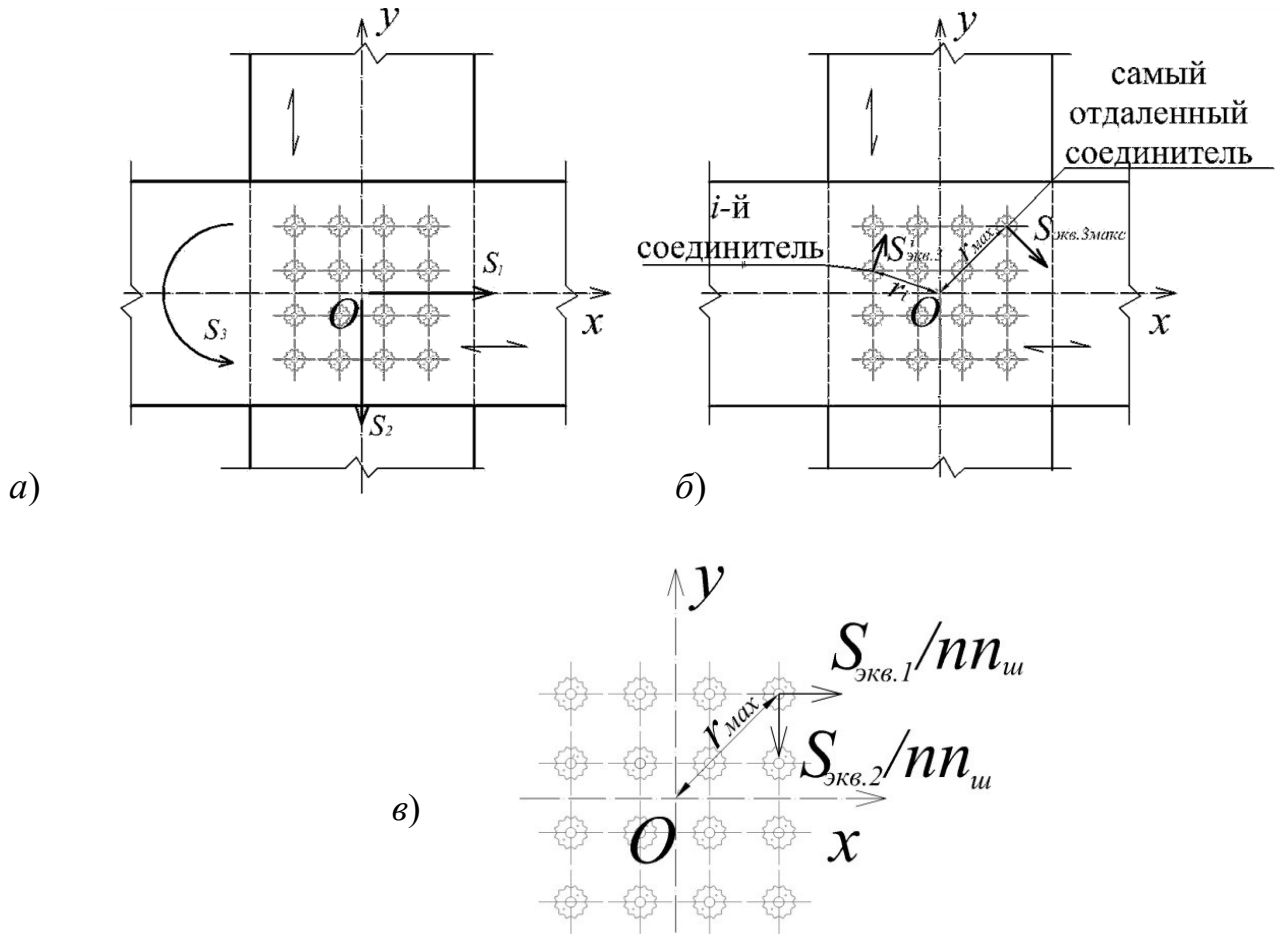


Рисунок 2.8. Схема для расчета соединений: а) общий вид соединения, б) возникновение усилий в различных соединительных элементах от действия S_3 , в) возникновение усилий от действия усилий S_1 и S_2 .

Если назначить коэффициент линейной жёсткости соединения $K_{\text{лин.3}}$ под воздействием максимального усилия $S_{\text{эkv.3,макс}}$, для выбранного самого отдаленного соединителя можно записать:

$$S_{\text{эkv.3,макс}} = K_{\text{лин.3}} \Delta_{\text{max}} = K_{\text{лин.3}} r_{\text{max}} \theta; \quad (2.60)$$

где Θ – угол поворота под действием момента S_3 ;

r_{max} – расстояние от соединителя до центра вращения.

Аналогично можно записать для i -го соединителя:

$$S_{\text{ЭКВ.3},i} = K_{\text{лин.3}} \Delta_i = K_{\text{лин.3}} r_{max} \theta \frac{r_i}{r_{max}}. \quad (2.61)$$

Результирующее усилие $S_{\text{ЭКВ}}$, воспринимаемое одной плоскостью среза одним соединителем, которое включает воздействие $S_{\text{ЭКВ.1}}$, $S_{\text{ЭКВ.2}}$, $S_{\text{ЭКВ.3}}$, будет находиться (Рисунок 2.9):

$$S_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{(S_{\text{ЭКВ.2}} + S_{\text{ЭКВ.3,макс}} \cos \beta)^2 + (S_{\text{ЭКВ.1}} + S_{\text{ЭКВ.3,макс}} \sin \beta)^2} \quad (2.62)$$

Угол α приложения нагрузки $S_{\text{ЭКВ}}$ на горизонтальную ось будет находиться:

$$\alpha = \arccos \left(\frac{S_{\text{ЭКВ.1}} + S_{\text{ЭКВ.3,макс}} \sin \beta}{S_{\text{ЭКВ}}} \right). \quad (2.63)$$

Поскольку соединение в плоскости будет иметь три степени свободы, то необходимо задаться тремя значениями жесткостей для узла K_1 , K_2 , K_3 для перемещений по осям x , y и повороту на угол Θ соответственно.

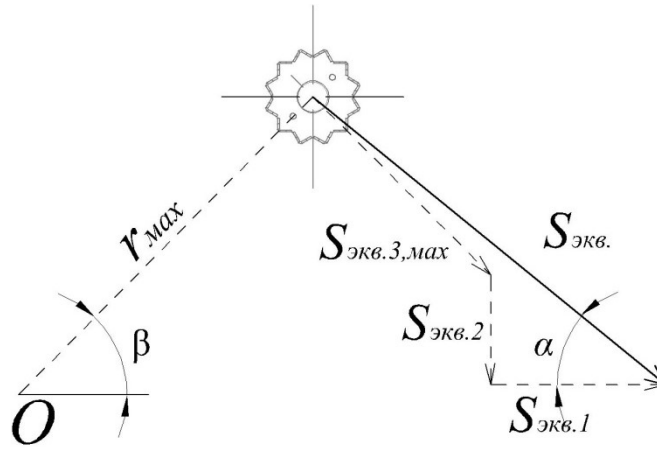


Рисунок 2.9. Схема к расчету соединений.

Жесткости $K_{\text{наг1}}$, $K_{\text{наг2}}$, $K_{\text{наг3}}$ для нагеля на один срез будут определяться:

$$K_{\text{наг1}} = \frac{N_{\text{наг}} \sin \alpha}{\Delta_{x,c}}; \quad K_{\text{наг2}} = \frac{N_{\text{наг}} \cos \alpha}{\Delta_{y,c}}; \quad K_{\text{наг3}} = \frac{N_{\text{наг}} \cdot r_i}{\theta}. \quad (2.64-2.65)$$

Жесткости $K_{\text{к.ш.1}}$, $K_{\text{к.ш.2}}$, $K_{\text{к.ш.3}}$ для когтевой шайбы на один срез будут определяться:

$$K_{\text{к.ш.1}} = \frac{\sum N_{\text{ког}} \sin \alpha}{\sum \Delta_{x,c}}; \quad K_{\text{к.ш.2}} = \frac{\sum N_{\text{ког}} \cos \alpha}{\sum \Delta_{y,c}}; \quad K_{\text{к.ш.3}} = \frac{\sum N_{\text{ког}} \cdot r_i}{\sum \theta}. \quad (2.66-2.67)$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{2r_i^2 + \sqrt{\Delta_{y,c}^2 + \Delta_{x,c}^2}}{2r_i^2} \right). \quad (2.68)$$

Здесь: $\Delta_{x,c}$ и $\Delta_{y,c}$ – смещение соединяемых элементов относительно начального положения по осям y и x соответственно, определяемые из выражений (2.20) для нагеля, (2.31), (2.37) для каждого когтя шайбы.

Для узла жесткости K_1 , K_2 , K_3 могут быть найдены, путем сложения всех жесткостей соединителей на каждом срезе:

$$K_1 = \sum K_{\text{наг}1} + \sum K_{\text{к.ш.1}}; \quad K_2 = \sum K_{\text{наг}2} + \sum K_{\text{к.ш.2}}; \quad (2.69-2.70)$$

$$K_3 = \sum K_{\text{наг}3} + \sum K_{\text{к.ш.3}}. \quad (2.71)$$

Для расчета конструкций с нагельными соединениями с когтевыми шайбами была принята методика на основе метода конечных элементов [64]. Методикой расчета предусматривается использование нескольких видов конечных элементов, в зависимости от вида закрепления. Так для элементов с жестким защемлением концов принят тип 1, для элементов с жестким защемленным концом и одним шарнирным принят тип 2, для элементов с упруго-податливым защемлением одного конца и жестким защемлением другого - тип 3 (Рисунок 2.10-2.11).

Величины коэффициентов жесткости для упруго-податливых связей будут зависеть от приложенных усилий, а так же от наличия соединителях пластического шарнира, что подразумевает нелинейное распределение зависимостей. Для учета данной особенности необходимо выполнять расчеты с использованием деления нагрузки на несколько частей и поочередного приложения при каждом новом цикле расчета.

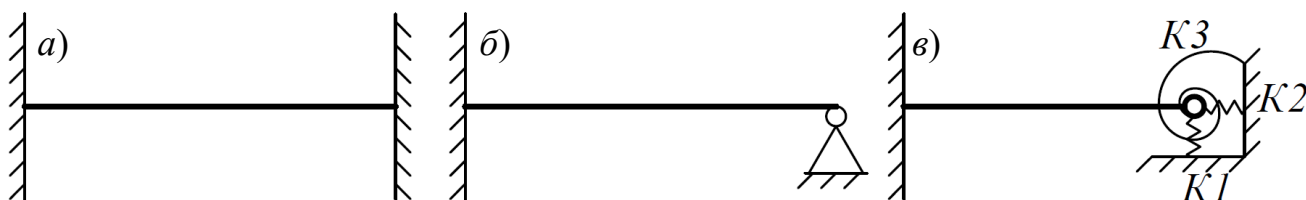


Рисунок 2.10. Схемы конечных элементов с упруго-податливым закреплением: а) тип 1, б) тип 2, в) тип 3.

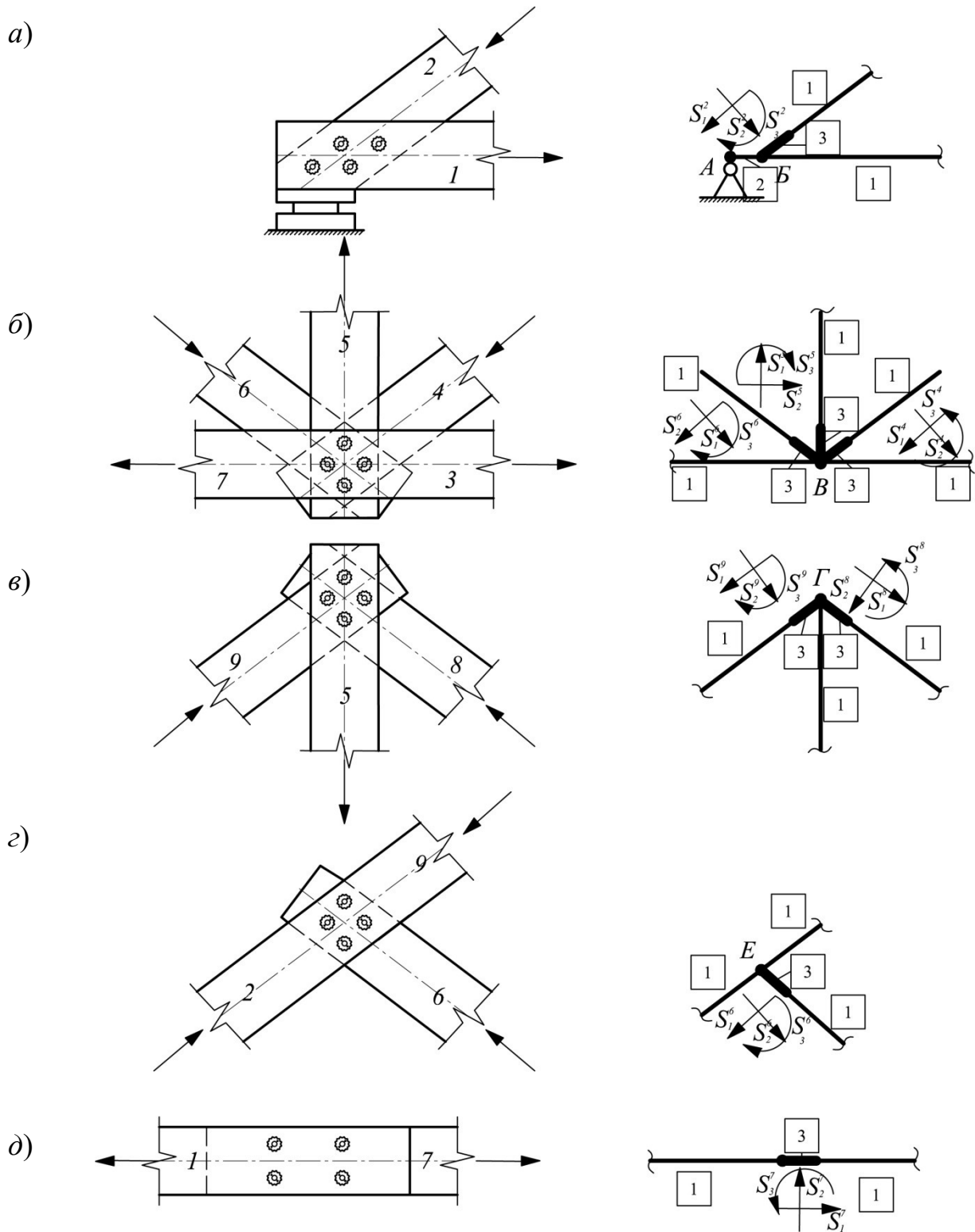


Рисунок 2.11. Схемы к расчету соединений в конструкциях ферм, с обозначением номеров стержней и принятых типов конечных элементов (в квадратах): а) узел соединения верхнего и нижнего пояса; б) узел соединения нижнего пояса, раскосов и стойки; в) узел соединения стойки и верхнего пояса; г) узел соединения верхнего пояса и раскоса; д) узел соединения элементов по длине.

Порядок расчета будет состоять из следующих операций:

1. Указание исходных данных:
 - Геометрическая схема конструкции;
 - Характеристика соединительных элементов (толщина металла когтевой шайбы t , высота когтя h , ширина когтя b , модуль упругости металла когтевой шайбы и материала нагеля E , расчетное сопротивление стали когтевой шайбы и материала нагеля изгибу $R_{изг}$, диаметр нагеля d)
 - Характеристика соединяемых элементов (коэффициент постели C для LVL при воздействии треугольным штампом, коэффициент постели C для LVL при воздействии цилиндрическим штампом, толщина крайних элементов a , толщина средних элементов c , сопротивление древесины сжатию вдоль и поперек волокон $R_{сж}$, влажность W элементов из LVL).
2. Задание расчетной схемы:
 - Определение расположения когтевых шайб по отношению к центру вращения;
 - Определение типов конечных элементов с указанием жесткостных характеристик, номеров узлов и их координаты;
 - Определение параметров ядра $K(t, \tau)$ уравнений деформирования (2.31) (2.37) для когтевых шайб и (2.20) для нагелей.
3. Приложение расчетной нагрузки $N_{расч}$ к узлам.
4. Вычисление внутренних усилий S_1, S_2, S_3 .
5. Проверка сечений элементов конструкции по условиям I и II предельных состояний.
6. Определение эквивалентных усилий восприятия срезом соединителей $S_{эКВ}$ для каждого узла.
7. Производится расчет каждого узла с приложением начального усилия N_{01} , с последующим догружением.
8. Проверка соблюдения условий (2.46) и в случае несоблюдения производится изменение граничных условий (при $x=h$ угол поворота сечения $\varphi_0 \neq 0$). А также проверка условий (2.21), (2.22), (2.50) и, в случае несоблюдения,

нагрузка N_n принимается в качестве максимально допустимой отдельно для нагеля ($N_{\text{наг}}$) и когтевой шайбы ($N_{\text{к.ш.}}$). Так же определяются коэффициенты жесткости нагеля и когтевой шайбы, используя расчетные деформации Δ , и определяются общие жесткости узла K_1 , K_2 , K_3 или корректируются при выполнении повторных циклов. Значения жесткостей для соответствующего направления для нагеля и когтевой шайбы суммируются.

9. Несущая способность нагеля $N_{\text{наг}}$ и когтевой шайбы $N_{\text{к.ш.}}$ складывается, образуя $N_{\text{соед}}$. Выполняется проверка справедливости неравенства:

$N_{\text{соед}} \geq S_{\text{экв}}$, и определение фактических деформаций, возникающих в расчетном узле.

10. Определение фактических перемещений:

$$\Delta_1 = \frac{S_1}{K_1}; \quad \Delta_2 = \frac{S_2}{K_2}; \quad \theta = \frac{S_3}{K_3}. \quad (2.72-2.74)$$

11. Определение НДС соединения и заключение вывода о соответствии соединения требованиям необходимой прочности и жесткости.

Представленный алгоритм расчета приведен в виде блок-схем разработанных для узла конструкции, состоящие из отдельных блок схем «Узел» (Приложении А), «Когтевая шайба» (Приложение Б), «Нагель» (Приложение В).

2.4 Вывод по главе

1. Разработаны теоретические модели нагеля и когтя шайбы, учитывающие влияние габаритов элементов соединения, влажности LVL , длительности действия усилия, прочностные и жесткостные характеристики исходных материалов;
2. Определено, что применение теории наследственности деформаций вязко-упругих тел для нагельных соединений с когтевыми шайбами в LVL позволяет учесть действие кратковременных и длительных нагрузок на характер деформируемости.

3. Предложен алгоритм расчета деревянных конструкций с соединениями на когтевых шайбах, который позволяет учитывать образование пластического шарнира в соединителях в случаях, когда это не является признаком разрушения соединения.

Глава 3. Прочностные характеристики материалов соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из *LVL*

Для применения методики расчета деревянных конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами типа «Бульдог», предложенной в данной работе, требуется знать кратковременные и длительные сопротивления материала *LVL*, а также кратковременные коэффициенты постели для треугольного и цилиндрического штампов, определенные для различных направлений приложения усилий по отношению к волокнам *LVL* и габаритам штампов. Так же необходимо определить уравнение описания формы кривой мгновенного деформирования $K_0(t)$, установить жесткость и предел текучести материала соединителей. Для получения прочностных показателей свойств материала *LVL*, необходимо провести испытания по ГОСТ 16483.2-70* [10], ГОСТ 168483.10-73* [13].

Таким образом, для расчета по предлагаемой методике необходимо экспериментально получить:

- Диаграмму деформирования материала *LVL*, при действии временной и длительной нагрузки вдоль и поперек волокон штампами различной формы (треугольной и цилиндрической), а также в зависимости от габаритов штампов.
- Зависимость предела прочности $R_{сж}$ и коэффициента постели C при действии нагрузки вдоль и поперек волокон штампами различной формы, а также в зависимости от габаритов штампов при длительных и кратковременных действиях нагрузки.
 - Ядро уравнения мгновенного деформирования $K_0(t)$.
 - Значение длительной прочности $R_{дл}$ для материала *LVL*.
 - Предел текучести $\sigma_{тек}$ и модуль упругости E металла когтевой шайбы и нагеля.
- Коэффициент упрочнения n для стали когтевых шайб при холодной штамповке.

3.1. Определение прочностных и жесткостных характеристик материала LVL

Испытания по определению предела прочности вдоль и поперек волокон, а также определению модуля упругости вдоль волокон было выполнено по ГОСТ 16483.2-70* [10], ГОСТ 16483.10-73* [13], ГОСТ 16483.9-73* [12] Материалом для определения расчетных характеристик *LVL* при действии кратковременных нагрузок был выбран брус *LVL Ultralam-R* [93] производства компании "Талион Трейдинг" (г. Торжок, Россия).

Были изготовлены образцы прямоугольной формы сечением 20x20 мм длиной вдоль волокон 300, 60 и 30 мм. Определялись размеры образцов с точностью до 0,1 мм, после чего образцы помещались в испытательную машину. Испытания по определению предела прочности вдоль и поперек волокон проводились на универсальной испытательной машине *Instron* (Рисунок 3.1). При подаче нагрузки фиксировалось смещение двумя индикаторами ИЧ-10. Затем определялось значение прочности на сжатие вдоль или поперек волокон для образца. После испытаний была определена влажность образцов по ГОСТ 16483.7-71 [11] Значения влажности образцов составило составляли 11,5% и 9,8%. Результаты испытаний были приведены к влажности 12% по формуле (1.31). Полученные значения были статистически обработаны и приведены в Таблице 3.1.

Испытания по определению модуля упругости вдоль волокон проводились на универсальной испытательной машине *Instron* (Рисунок 3.1). При подаче нагрузки фиксировалось смещение одним индикаторами ИЧ-10 через специальный кронштейн. Затем определялось значение модуля упругости вдоль волокон для образца. После испытаний была определена влажность образцов по ГОСТ 16483.7-71 [11] Значения влажности образцов составило составляли 11,5% и 9,8%. Результаты испытаний были приведены к влажности 12% по формуле (1.31). Полученные значения были статистически обработаны и приведены в Таблице 3.2. Значение модуля упругости принимается $E=14000$ МПа.

Таблица 3.1. Результаты определения предела прочности сжатия *LVL*.

Образец №	Предел прочности $\sigma_{сж}$, МПа	Среднее значение $\sigma_{сж}$, МПа	Среднее квадратичное отклонение s , МПа	Коэфф. вариации V , %	Средняя квадратичная погрешность P , %
Испытания вдоль волокон					
1	52,62	57,04	2,04	3,40	2,71
2	58,40				
3	58,97				
4	57,03				
5	58,07				
6	55,84				
7	59,42				
8	58,08				
9	56,70				
10	55,28				
Испытания поперек волокон					
1	9,81	10,60	0,72	6,40	5,02
2	12,14				
3	10,95				
4	11,32				
5	10,66				
6	10,55				
7	10,41				
8	10,24				
9	10,06				
10	9,89				

Таблица 3.2. Результаты определения модуля упругости *LVL* вдоль волокон.

Образец №	Модуль упругости E , МПа	Среднее значение E , МПа	Среднее квадратичное отклонение s , МПа	Коэфф. вариации V , %	Средняя квадратичная погрешность P , %
Испытания вдоль волокон					
1	14620,00	14032,00	1159,60	7,84	3,51
2	15600,00				
3	13850,00				
4	12690,00				
5	14180,00				
6	15410,00				
7	11890,00				
8	14460,00				
9	14390,00				
10	13230,00				

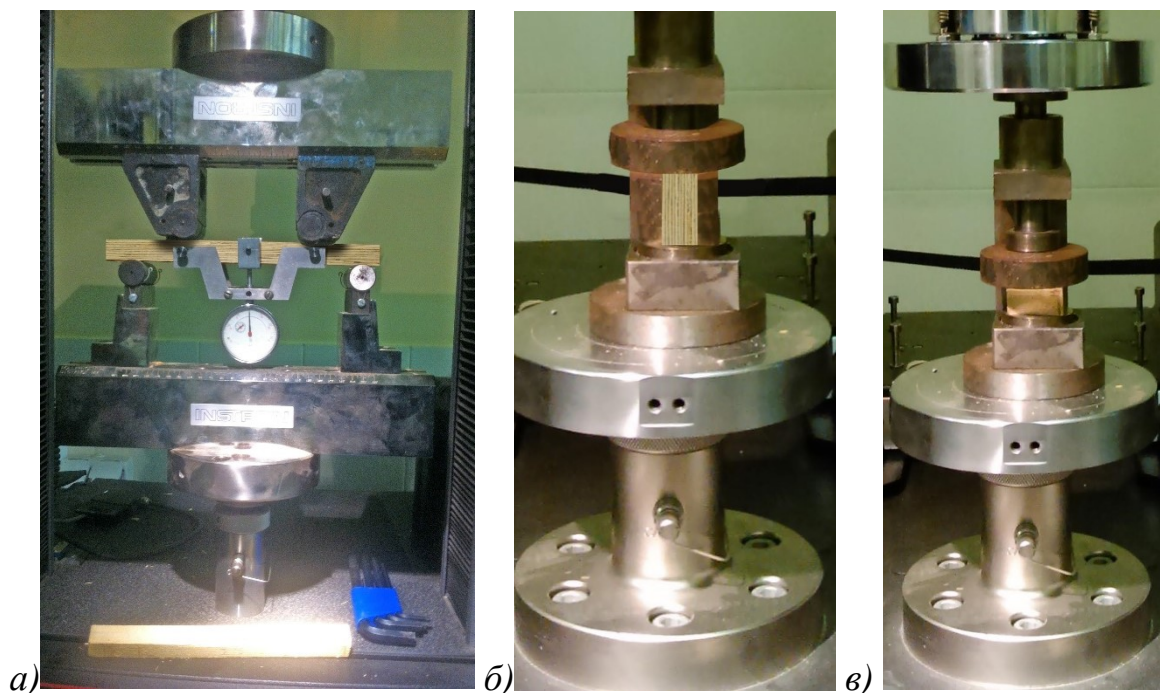


Рисунок 3.1. Экспериментальное определение прочностных характеристик *LVL*: а) определение модуля упругости вдоль волокон; б) предел прочности сжатию вдоль волокон; в) предел прочности сжатию поперек волокон.

3.2. Определение расчетных характеристик древесины *LVL* при смятии штампом различной формы

Для расчета соединений в конструкциях из клееного однонаправленного бруса *LVL* с когтевыми шайбами по деформациям необходимо знать значение коэффициента постели *LVL* при передаче нагрузки треугольным когтем и цилиндрическим нагелем вдоль и поперек волокон. Информация о величине коэффициента постели треугольным штампом для бруса *LVL* отсутствует, а информации о коэффициенте постели цилиндрической формы для бруса *LVL* при различных размерах штампа недостаточно. В связи с этим, является необходимым определение коэффициента постели для треугольного и цилиндрического штампа при различных направлениях приложения усилий к волокнам и габаритам когтя шайбы.

В реальной конструкции в соединении передача нагрузки осуществляется в плоскости конструкции, поэтому считается необходимым произвести испытания

образцов в плоскости бруса *LVL*.

Для учета влияния изменения угла смятия α по отношению к волокнам, коэффициента постели и прочности на смятие предложено учитывать выражениями (1.29), (1.30). Согласно работам Крицина А. В., Шешуковой Н. В., а так же других исследователей [50, 55, 111], опытные данные для прямоугольных плоских и цилиндрических штампов хорошо согласуются со значениями прочности в области упругих деформаций и коэффициентов постели при показателе степени $n=2$ для древесины. В данной работе предлагается использование параметра n в формулах (1.29), (1.30) для *LVL* принять равным двум.

Влажность образцов определяется по ГОСТ 16483.7-71 [77]. Для учета влажности образцов *LVL* и приведения величин прочности и коэффициента постели к влажности $w=12\%$, используются уравнения (1.29), (1.30).

3.2.1. Исследование влияния высоты треугольного штампа на прочность *LVL* при смятии и на коэффициент постели при действии кратковременной нагрузки

Экспериментальное определение коэффициентов постели при смятии треугольным штампом осуществлялось с помощью вдавливания треугольных штампов различных размеров, в соответствии с диаметром шайб, в образцы, представляющие собой бруски сечением 50 x 51 мм и длиной вдоль и поперек волокон 120 мм из *LVL* с фиксацией прикладываемой нагрузки и соответствующих смещений. Материалом *LVL* был выбран брус *LVL Ultralam-R* [93].

Для получения коэффициента постели при передаче нагрузки когтем шайбы необходимо исключить деформации самого когтя, поэтому были выполнены металлические штампы треугольной формы, моделирующие когти шайб из металла толщиной 8 мм. Принято допущение о незначительности деформаций штампа данной толщины, не влияющих на общий результат

измерений. Размеры штампов указаны на Рисунке 3.2. Размеры когтей соответствуют когтевым шайбам $\varnothing 50$ мм, $\varnothing 75$ мм и $\varnothing 117$ мм соответственно. Всего проведено 60 испытаний (6 серий по 10 опытов в каждой).

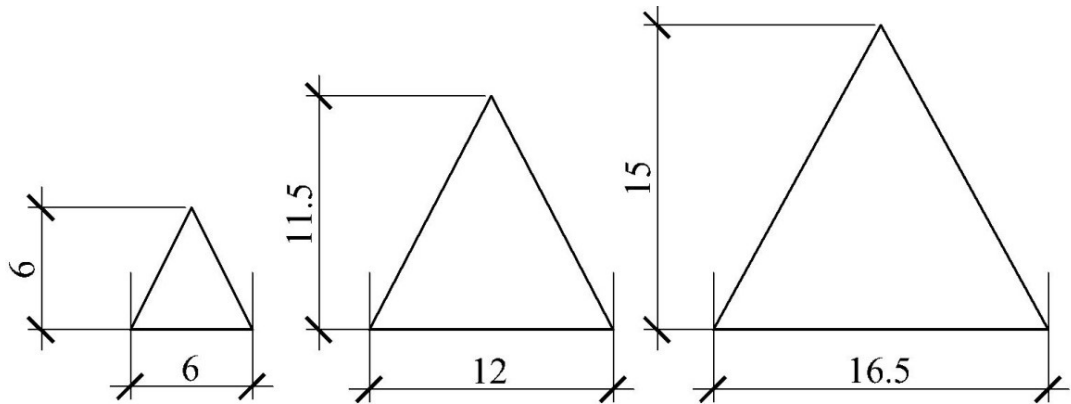


Рисунок 3.2. Геометрические характеристики треугольных штампов, для диаметров когтевых пластин 50 мм, 95 мм, 117 мм соответственно.

При действии нагрузки от треугольного штампа напряжения смятия распределяются под площадью штампа, а на гранях возникают срезающие усилия. В реальном соединении сминающая нагрузка от когтя воспринимается всей площадью соприкосновения, и только две боковые грани когтя будут создавать срезающие напряжения. Для того, чтобы учесть эту особенность передачи нагрузки при проведении испытаний был выполнен пропил по центру деревянного образца, как показано на Рисунке 3.3. Штамп устанавливался таким образом, чтобы одной гранью быть заподлицо с пропилом, и быть по центру деревянного образца, чтобы избежать возможного возникновения эксцентриситета при передаче усилий в образце.

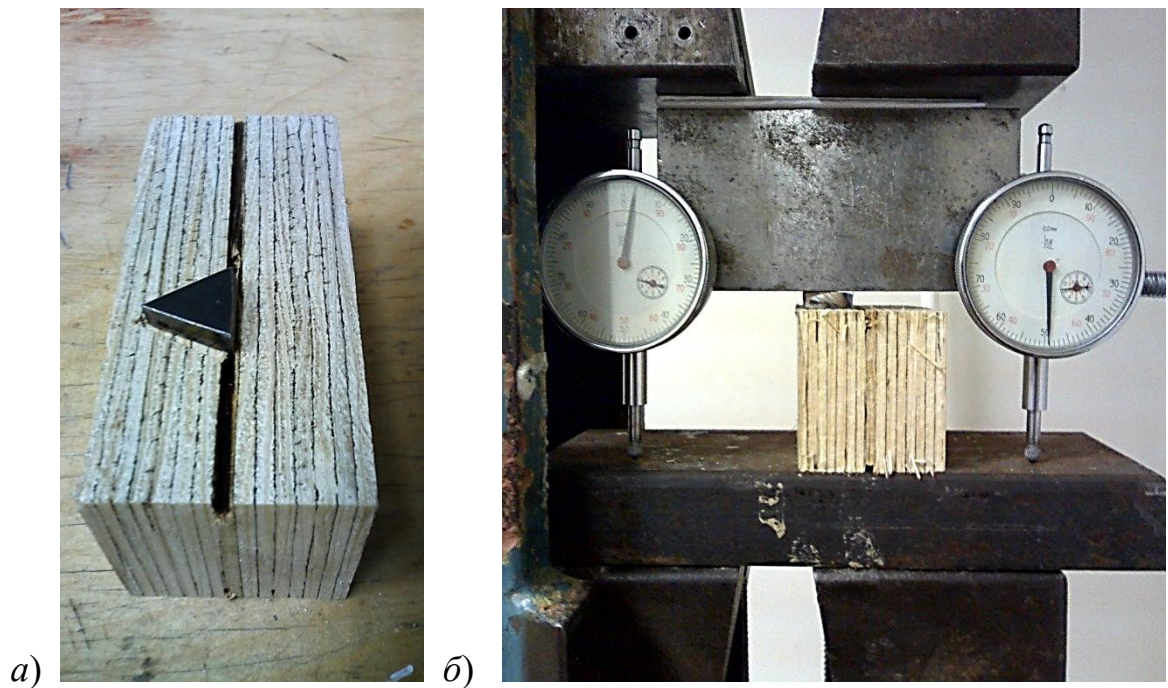


Рисунок 3.3. Проведение испытаний для получения коэффициента постели для *LVL* треугольным штампом а) образец *LVL* с пропилом; б) схема испытательной установки.

После размещения штампа на деревянном параллелепипеде из *LVL* устанавливалась пластина для передачи нагрузки с двумя зафиксированными на ней индикаторами перемещения ИЧ-10. Индикаторы дублируют показания перемещений и позволяют учесть влияние перекоса распределяющей нагрузку пластины при испытаниях, усредняя значение фактического смещения.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине РС-5 с установкой шкалы 1000 кг (цена деления 1 кг). Образец из *LVL* устанавливался на площадку машины с установкой на него треугольного штампа и металлической пластины с индикаторами перемещения. Металлическая пластина служит для передачи нагрузки от рабочих площадок универсальной испытательной машины и увеличения расстояния между ними для свободной работы индикаторов перемещения.

Загружение проводилось с постоянной скоростью перемещения нагружающего устройства 2 мм/мин таким образом, чтобы предельная нагрузка была достигнута в течении 3 минут от начала испытания. Отсчеты перемещения

фиксировались одновременно при достижении каждого шага в $0,1F_{est}^{max}$ от ожидаемой максимальной нагрузки. Значение ожидаемой максимальной нагрузки было определено путем пробного загрузения до начала основных испытаний. Результаты испытаний приведены к влажности $LVL W = 12\%$, после чего была проведена статистическая обработка данных, которые приведены в Таблице 3.3 и Таблице 3.4.

Таблица 3.3. Экспериментальные значения прочности на сжатие LVL треугольным штампом вдоль и поперек волокон

Среднее значение прочности R_{cp} , МПа	Количество испытаний в серии n , шт	Среднеквадратичное отклонение S , МПа	Коэффициент вариации V , %	Среднеквадратичная погрешность P , %
Прочность LVL на сжатие треугольным штампом $h=6$ мм вдоль волокон				
54,81	10	1,98	2,40	3,71
Прочность LVL на сжатие треугольным штампом $h=6$ мм поперек волокон				
27,80	10	1,01	9,12	8,21
Прочность LVL на сжатие треугольным штампом $h=11.5$ мм вдоль волокон				
53,64	10	2,06	3,12	4,89
Прочность LVL на сжатие треугольным штампом $h=11.5$ мм поперек волокон				
26,36	10	0,97	7,85	8,01
Прочность LVL на сжатие треугольным штампом $h=15$ мм вдоль волокон				
52,17	10	2,12	6,04	5,72
Прочность LVL на сжатие треугольным штампом $h=15$ мм поперек волокон				
22,34	10	1,09	9,36	9,08

Таблица 3.4. Экспериментальные значения коэффициента постели LVL при сжатии треугольным штампом вдоль и поперек волокон

Среднее значение коэфф. постели C_{cp} , Н/мм ³	Количество испытаний в серии n , шт	Среднеквадратичное отклонение S , Н/мм ³	Коэффициент вариации V , %	Среднеквадратичная погрешность P , %
Коэффициент постели для LVL при сжатии треугольным штампом $h=6$ мм вдоль волокон				
171,30	10	6,21	4,54	6,84
Коэффициент постели для LVL при сжатии треугольным штампом $h=6$ мм поперек волокон				
47,93	10	1,89	6,21	4,52
Коэффициент постели для LVL при сжатии треугольным штампом $h=11.5$ мм вдоль волокон				
167,61	10	8,32	6,29	8,94
Коэффициент постели для LVL при сжатии треугольным штампом $h=11.5$ мм поперек волокон				
33,80	10	1,27	4,69	8,89
Коэффициент постели для LVL при сжатии треугольным штампом $h=15$ мм вдоль волокон				
163,04	10	7,24	8,45	6,95
Коэффициент постели для LVL при сжатии треугольным штампом $h=15$ мм поперек волокон				
27,57	10	0,98	8,53	6,88

Всего было испытано 120 образцов (60 испытаний для цилиндрического и 60 испытаний для треугольного штампа).

После обработки результатов всех испытаний были определены уравнения регрессии, отражающие взаимосвязь между пределом прочности LVL при сжатии по ГОСТ 168483.10-73* [13], смятии треугольным штампом $R_{см}^{BP}/R_{сж}^{BP}$ и высотой когтя шайб h для воздействия вдоль и поперек волокон. Аналогично определяется зависимость между величиной коэффициента постели для треугольного штампа пределом прочности LVL при сжатии $C_{см}^{BP}/R_{сж}^{BP}$ и высотой когтя шайб h для воздействия вдоль и поперек волокон.

Графики зависимости напряжения и деформации приведены на Рисунках 3.4 - 3.7 для смятия вдоль и поперек волокон при высоте когтей, соответствующих диаметрам пластин 50 мм (высота когтя $h=6$ мм), 95 мм (высота когтя $h=11,5$ мм), 117 мм (высота когтя $h=15$ мм).

Напряжения смятия для выбранных габаритов когтей были определены по величине прироста деформаций и сведены в один график для разных размеров когтей отдельно для смятия вдоль и поперек волокон. Это позволит наглядно определить влияние габаритов когтя на исследуемые характеристики.

Анализируя полученные результаты, можно сказать о некотором снижении прочности на сжатие треугольным штампом при увеличении габаритов когтя, что находит отражение, как для случая сжатия вдоль, так и поперек направления волокон (Рисунки 3.6-3.7). При сопоставлении данных результатов с испытаниями прямоугольных штампов в древесине сосны можно отметить различие в увеличении отношения предела прочности древесины $R_{см}$ при действии вдоль волокон к пределу прочности $R_{сж}$ при увеличении габаритов штампа. Данное расхождение можно посчитать особенностью работы материала LVL при действии треугольным штампом.

Для смятия вдоль волокон:

$$R_{см.0} = (-0,005h + 0,993)R_{сж,0};$$

$$C_0 = (-0,016h + 3,103) R_{сж,0}$$

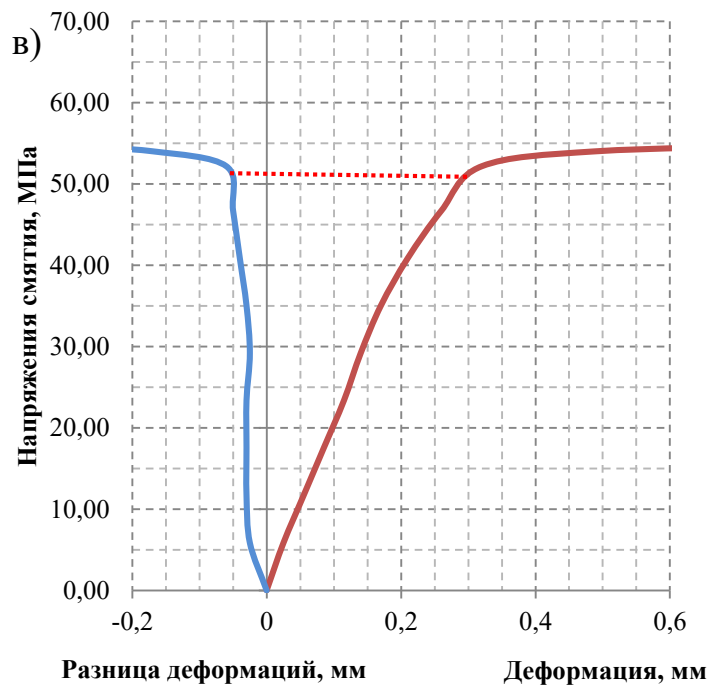
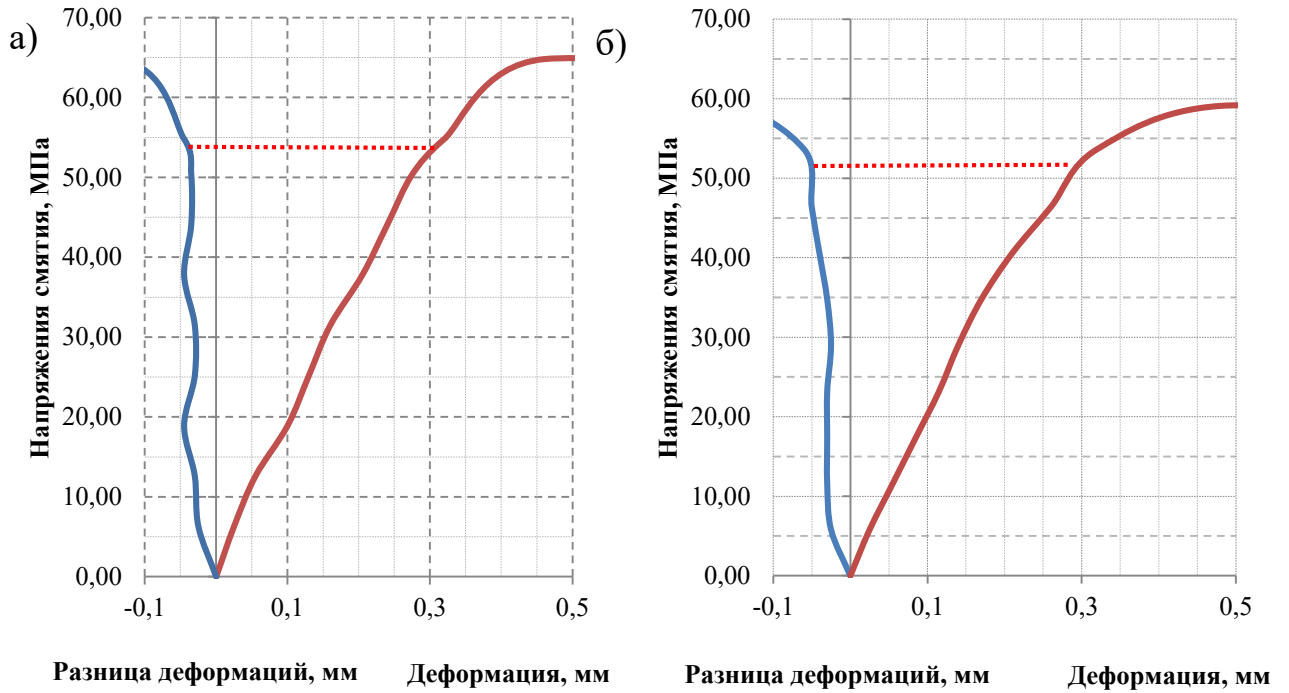


Рисунок 3.4. Зависимость деформаций смятия вдоль волокон от напряжения смятия для штампов высотой h : а) $h = 6 \text{ мм}$ ($\text{Ø } 50 \text{ мм}$); б) $h = 11,5 \text{ мм}$ ($\text{Ø } 95 \text{ мм}$); в) $h = 15 \text{ мм}$ ($\text{Ø } 117 \text{ мм}$).

Для смятия поперек волокон:

$$R_{см.90} = (-0,054h + 2,993)R_{сж,90};$$

$$C_{90} = (-0,216h + 5,774) R_{сж,90}$$

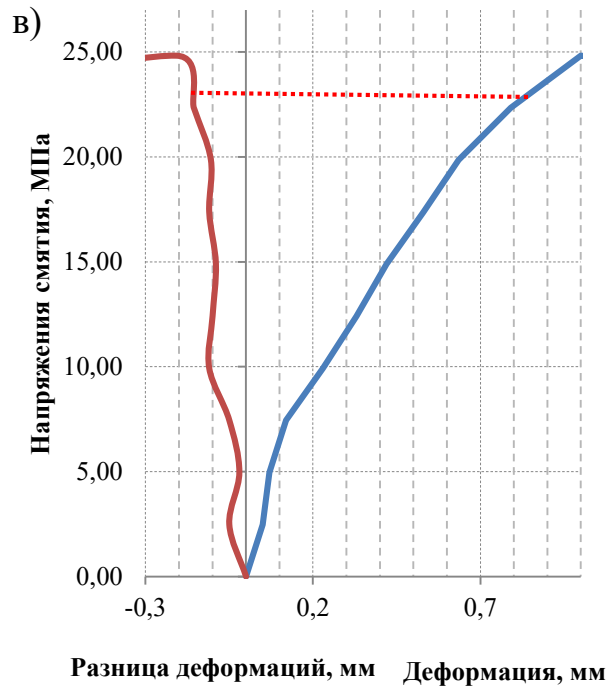
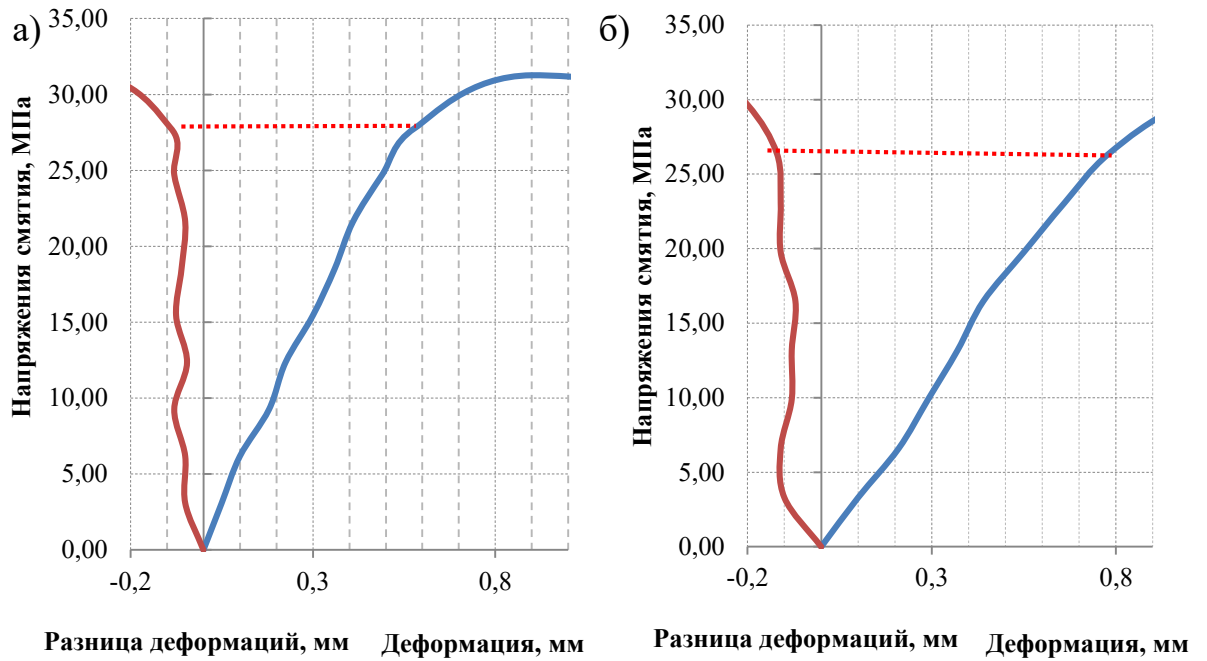


Рисунок 3.5. Зависимость деформаций смятия поперек волокон от напряжения смятия для штампов высотой h : а) $h = 6 \text{ мм}$ ($\text{Ø } 50 \text{ мм}$) ; б) $h = 11,5 \text{ мм}$ ($\text{Ø } 95 \text{ мм}$); в) $h = 15 \text{ мм}$ ($\text{Ø } 117 \text{ мм}$).

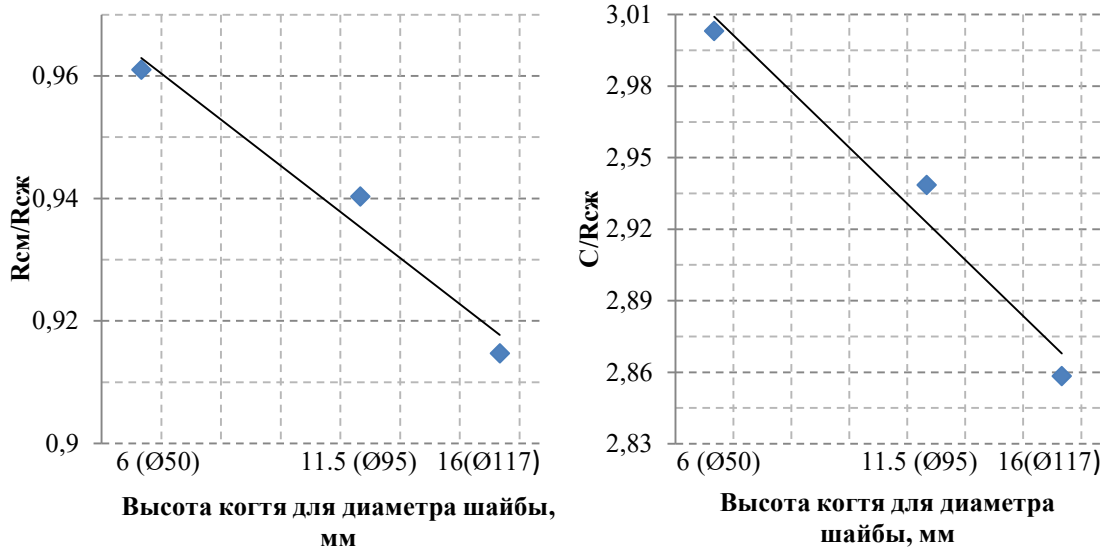


Рисунок 3.6. Зависимости, по результатам эксперимента: а) между отношением предела прочности LVL при смятии вдоль волокон к пределу прочности при сжатии при заданном габарите штампа; б) между отношением коэффициента постели LVL при смятии вдоль волокон к пределу прочности при сжатии при заданном габарите штампа.

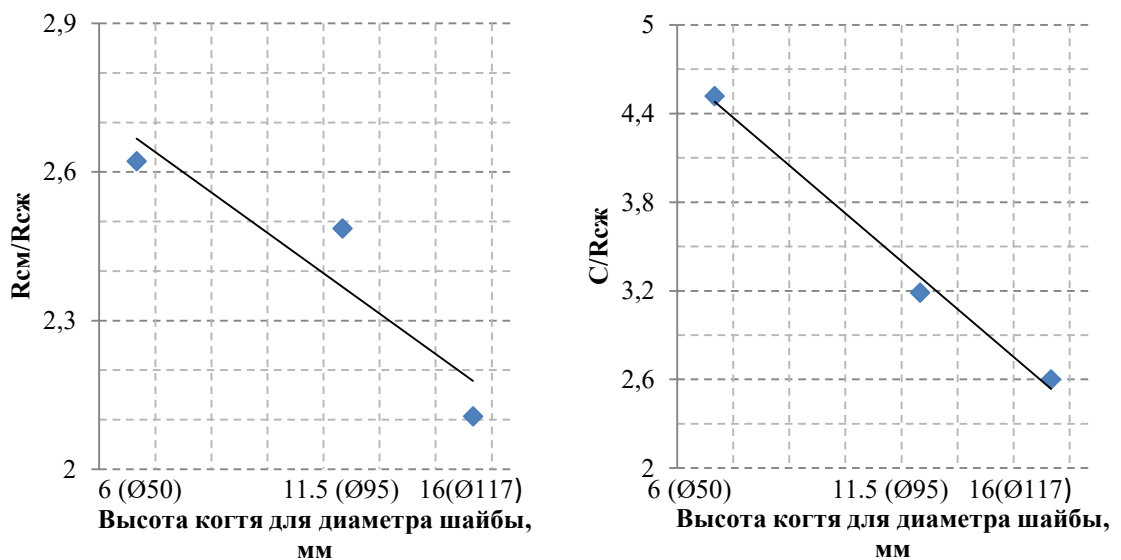


Рисунок 3.7. Зависимости, по результатам эксперимента: а) между отношением предела прочности LVL при смятии поперек волокон к пределу прочности при сжатии при заданном габарите штампа; б) между отношением коэффициента постели LVL при смятии поперек волокон к пределу прочности при сжатии при заданном габарите штампа.

Полученные уравнения регрессии необходимы при расчете когтей шайбы в конструкциях из клееного однонаправленного бруса *LVL* по деформациям.

3.2.2. Исследование влияния высоты треугольного штампа на прочность при смятии и коэффициент постели *LVL* при действии длительной нагрузки

Исследование длительной прочности *LVL* при действии треугольным штампом осуществлялись с помощью вдавливания треугольных штампов различных размеров, в соответствии с диаметром шайб, в образцы, представляющие собой бруски сечением 50 x 45 мм и длиной вдоль и поперек волокон 120 мм из *LVL* с фиксацией прикладываемой нагрузки и соответствующих смещений. Материалом *LVL* был выбран брус *LVL Ultralam-R*. Размеры когтей соответствуют размерам когтей для шайб Ø50 мм ($h = 6$ мм) и Ø95 мм ($h = 11,5$ мм). Образцы *LVL* имели влажность $W = 11,2\%$ ($R_{сж} = 58,2$ МПа), и $W = 9,8\%$ ($R_{сж} = 62,53$ МПа). Поскольку на практике только две боковые грани когтя будут создавать срезающие напряжения, был выполнен пропил по центру деревянного образца, чтобы была возможность установить штамп одной гранью заподлицо с пропилом, и иметь возможность расположения штампа по центру образца *LVL*.

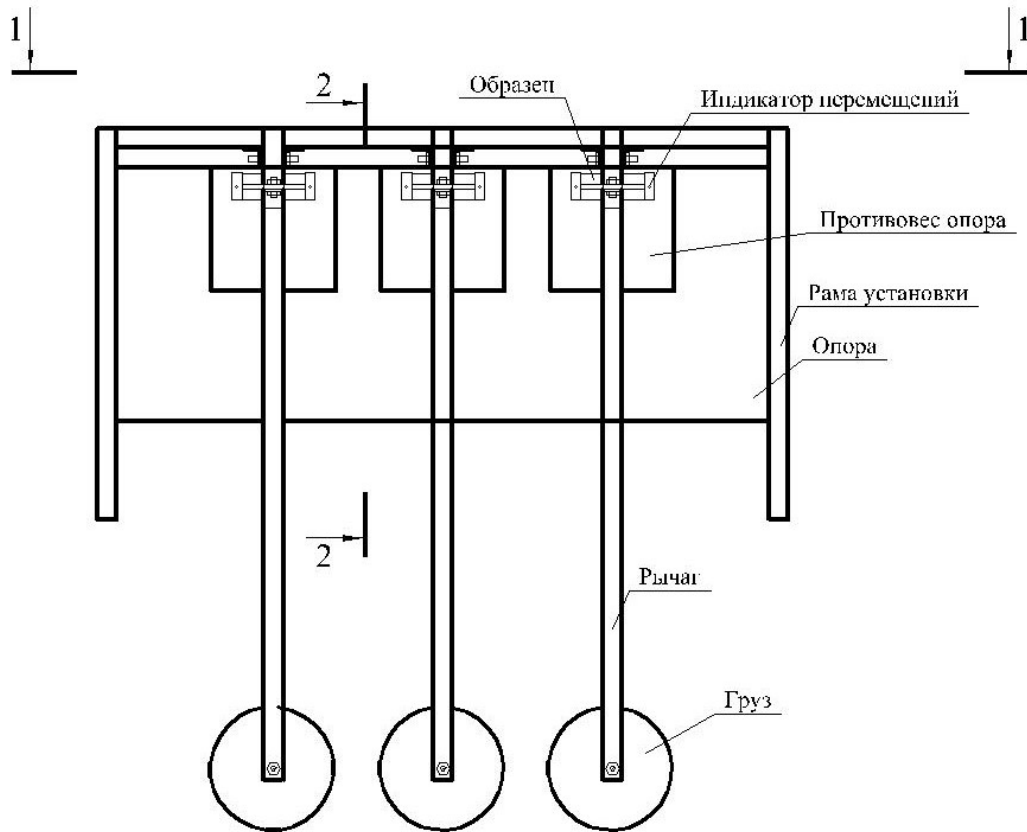
Для проведения испытаний была разработана установка рычажного типа, позволяющая прикладывать неизменную нагрузку в течение длительного периода времени с возможностью отслеживания смещения штампа. Схема установки представляет собой металлическую раму, на которой установлено жесткое основание. На него укладывается опора для образца из *LVL* выполняющая так же функцию противовеса. Для создания необходимого усилия имеется рычаг, закрепленный к металлической раме и груз, устанавливаемый на конце рычага. Схема установки представлена на Рисунке 3.8. Процесс испытания представлен на Рисунке 3.9.

Изготовленная конструкция позволяет получать выигрыш в силе 1:17. Для измерения смещений вдавливания штампа, на установке были выполнены выступы для крепления одновременно двух индикаторов перемещений с разных сторон от образца, которые измеряли вертикальное смещение штампа относительно *LVL*.

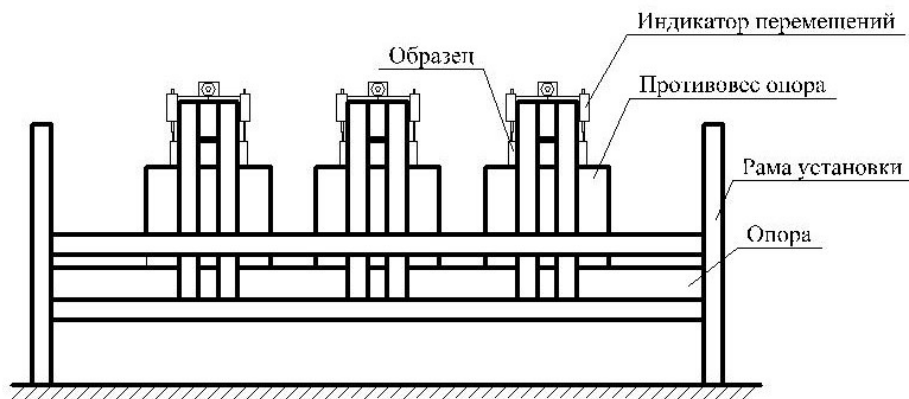
Для фиксирования первоначальной влажности древесины образцы были замотаны в стрэтч-пленку, что позволяло образцам сохранять одинаковую влажность на весь период испытаний и исключить изменение внешней влажности. Значения в ходе эксперимента считались полученными для материала неизменной влажности на протяжении всего времени испытаний.

Величина длительной нагрузки была выбрана равной $R=0,4R_{max}$ от разрушающего усилия. Авторами, проводящими длительные испытания древесины [27, 31, 45, 46], а также *LVL* [145, 130] было выяснено, что кривая деформирования при данном уровне нагрузки будет иметь затухающий характер.

Всего было проведено 16 испытаний (8 серий по 2 опыта в каждой). Испытания проводились в течение 100 суток каждая. Разгрузка образцов выполнялась в течении 24 суток. После испытаний были построены графики кривых деформирования для различного размера штампа и направления приложения усилия к волокнам. Структура проведенных испытаний приведена в Таблице 3.5.



1-1



2-2

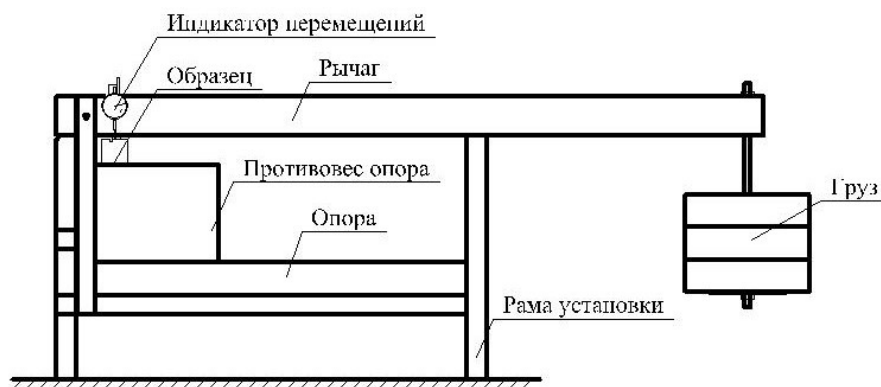


Рисунок 3.8. Схема установки для определения сопротивления LVL длительному действию нагрузки.



Рисунок 3.9. Исследование зависимости высоты треугольного штампа на прочность при смятии и коэффициент постели *LVL* при действии длительной нагрузки: а) штамп высотой $h = 6$ мм, поперек волокон, б) штамп высотой $h = 11,5$ мм, вдоль волокон, в) общий вид проведения испытаний.

Таблица 3.5. Структура испытаний на смятие *LVL* треугольным штампом от действия длительной нагрузки.

Номер серии	1	2	3	4	5	6	7	8
Высота штампа h , мм	6	11,5	6	11,5	6	11,5	6	11,5
Влажность W	9,8 %		11,2 %		9,8 %		11,2 %	
Направление волокон	Вдоль волокон				Поперек волокон			
Количество опытов	2 дубликата в серии							
Длительность испытаний t , сут.	100							
Уровень нагрузки R	0,4 R_{max}							

Для влажности $W = 9,8\%$ при приложении нагрузки вдоль волокон деформации смещения составили 0,161 мм, прирост деформаций составил 0,09 мм для когтя высотой $h = 6$ мм, деформации смещения составили 0,41 мм, прирост деформаций составил 0,24 мм для когтя высотой $h = 11,5$ мм. При приложении нагрузки поперек волокон деформации смещения составили 0,32 мм, прирост деформаций составил 0,51 мм для когтя высотой $h = 6$ мм, деформации смещения составили 0,43 мм, прирост деформаций составил 0,7 мм для когтя высотой $h = 11,5$ мм (Рисунок 3.10).

Для влажности $W = 11,2\%$ при приложении нагрузки вдоль волокон деформации смещения составили 0,23 мм, прирост деформаций составил 0,13 мм для когтя высотой $h = 6$ мм, деформации смещения составили 0,57 мм, прирост деформаций составил 0,34 мм для когтя высотой $h = 11,5$ мм. При приложении нагрузки поперек волокон деформации смещения составили 0,45 мм, прирост деформаций составил 0,73 мм для когтя высотой $h = 6$ мм, деформации смещения составили 0,62 мм, прирост деформаций составил 0,98 мм для когтя высотой $h = 11,5$ мм. На протяжении всего временного участка испытания (100 сут.) кривые ползучести имели затухающий характер, который начинался на 39 сутки

испытаний, основной прирост деформаций происходил в первые 10 суток (Рисунок 3.11).

Наиболее сильно влияние фактора времени сказывалось для образцов подверженных действию нагрузки поперек волокон при влажности $W = 11,2\%$ с приростом деформаций 76%.

Для определения ядра мгновенного деформирования $K_0(t)$ для определенного момента времени можем воспользоваться уравнением:

$$K_0(t)_{\tau=0} = \frac{C}{\sigma_0} \cdot \frac{d\delta(t)}{dt}; \quad (3.1)$$

где C - мгновенный коэффициент постели, Н/мм³;

σ_0 – напряжение под штампом, МПа;

$\frac{d\delta(t)}{dt}$ – скорость роста деформаций упругого последствия, мм/сек.

Уравнение (3.1) использовалось Крициным А. В., Дмитриевым П. А. в своих работах [50, 32]. После применения уравнения (3.1) строились кривые $K_0(t)$ для образцов различного размера штампа и направления приложения усилия к волокнам. Полученные кривые статистически обрабатывались, с применением уравнения регрессии в виде уравнения:

$$K_0(t) = A \frac{e^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}}; \quad (3.2)$$

где A , α , δ – постоянные уравнения (3.2);

t – время нагружения.

Чтобы учесть влияние влажности образцов W на результаты исследования воспользуемся коэффициентом A , выражающим зависимость от изменения влажности в образцах. Известно, что работах Иванова В. М., Орловича Р. Б., Крицина А. В., [47, 62, 63] используются пары значений одного коэффициента уравнения (3.2) и влажности W для получения линейной зависимости. В данной работе связь параметра A и влажности W может быть принята, как линейная зависимость.

Кривые зависимости $K_0(t)$ (Рисунок 3.12, 3.13) удовлетворительно описываются уравнением регрессии при коэффициентах $\alpha = 0,0015$, $\beta = 0,0012$,

при этом для влажности $W = 9,8 \%$ коэффициент $A = 4,05 \cdot 10^{-6}$, а для влажности $W = 9,8 \%$ коэффициент $A = 7,32 \cdot 10^{-6}$.

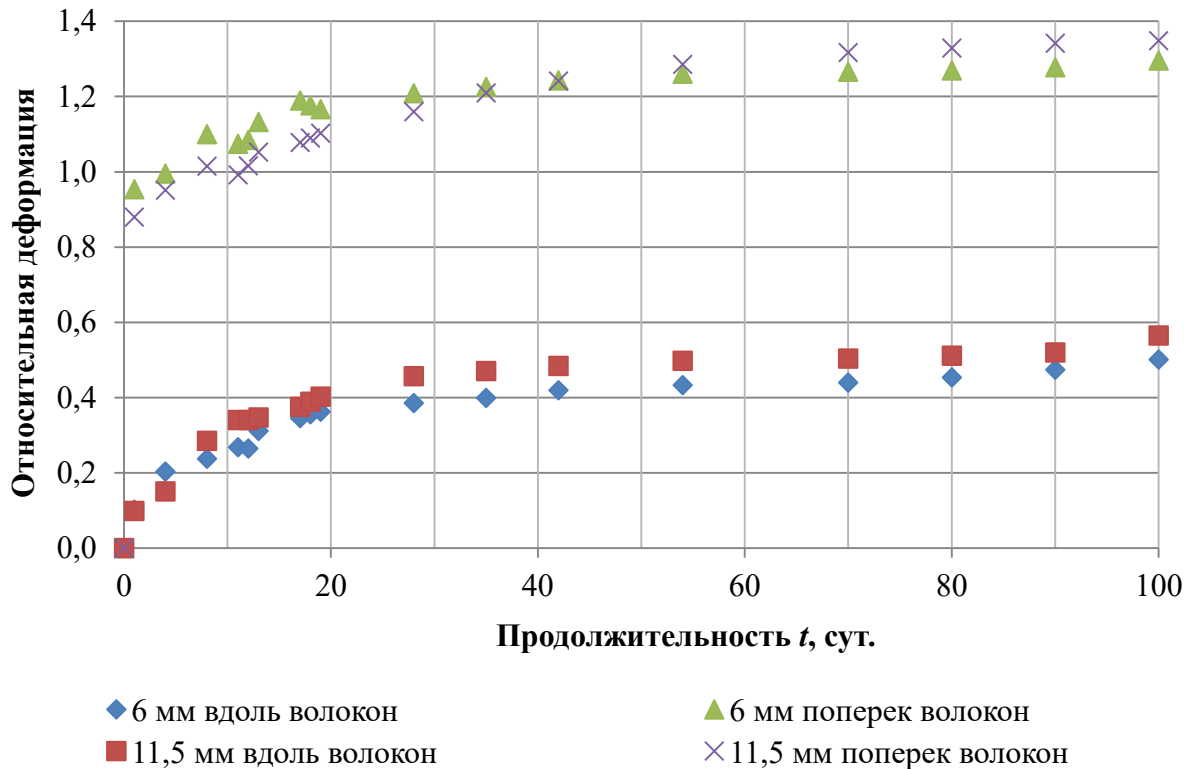


Рисунок 3.10. Экспериментальные зависимости относительной деформации ползучести от времени для треугольного штампа в *LVL* при влажности $W=9,8\%$.

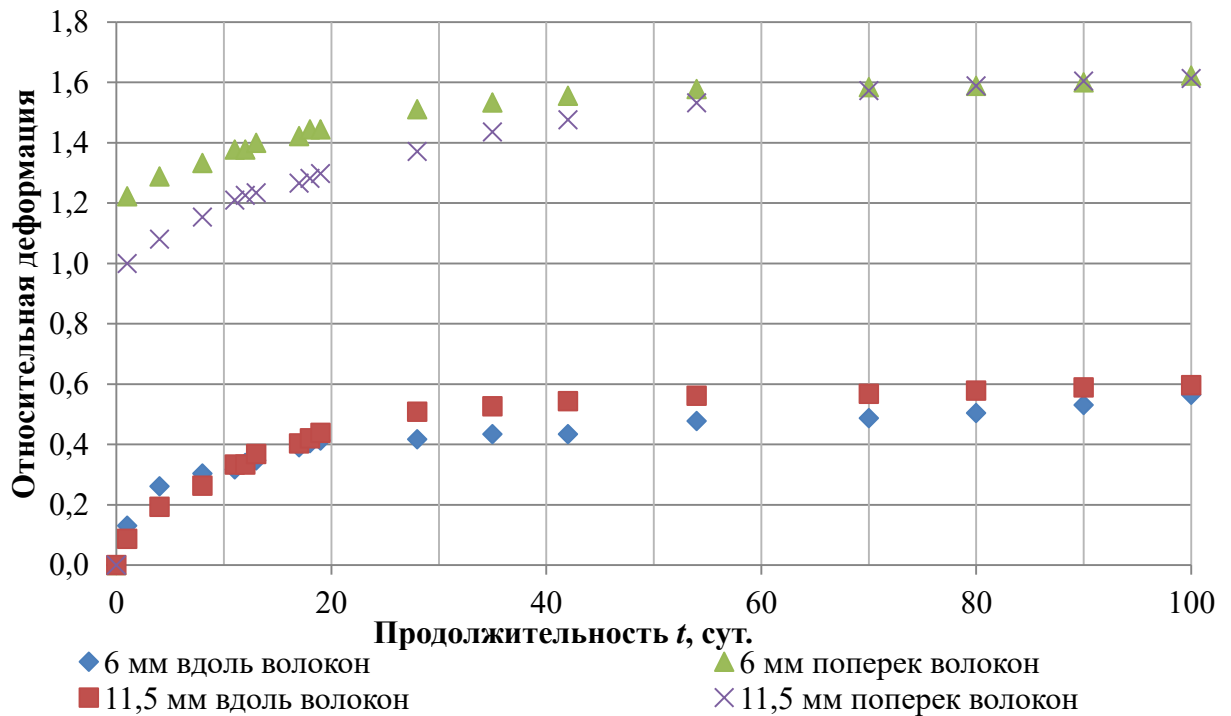
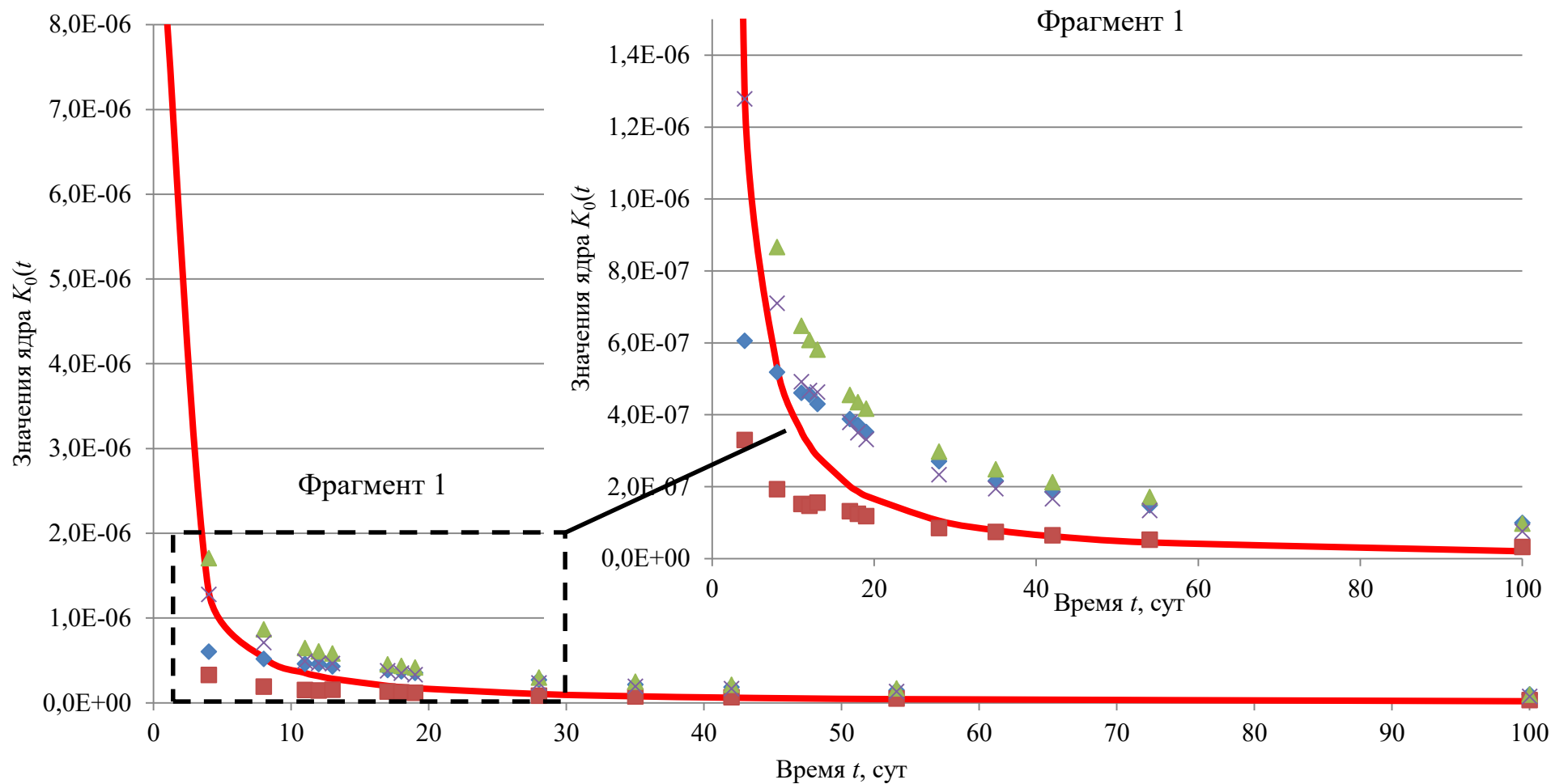


Рисунок 3.11. Экспериментальные зависимости относительной деформации ползучести от времени для треугольного штампа в *LVL* при влажности $W=11,2\%$.



◆ 11,5 мм вдоль волокон $W=9.8\%$ ■ 6 мм вдоль волокон $W=9.8\%$ ▲ 11,5 мм поперек волокон $W=9.8\%$ ✕ 6 мм поперек волокон $W=9.8\%$

Рисунок 3.12. Влияние размеров штампов на значения ядра интегрального уравнения линейной наследственности во времени для треугольного штампа в *LVL* при влажности $W=9.8\%$.

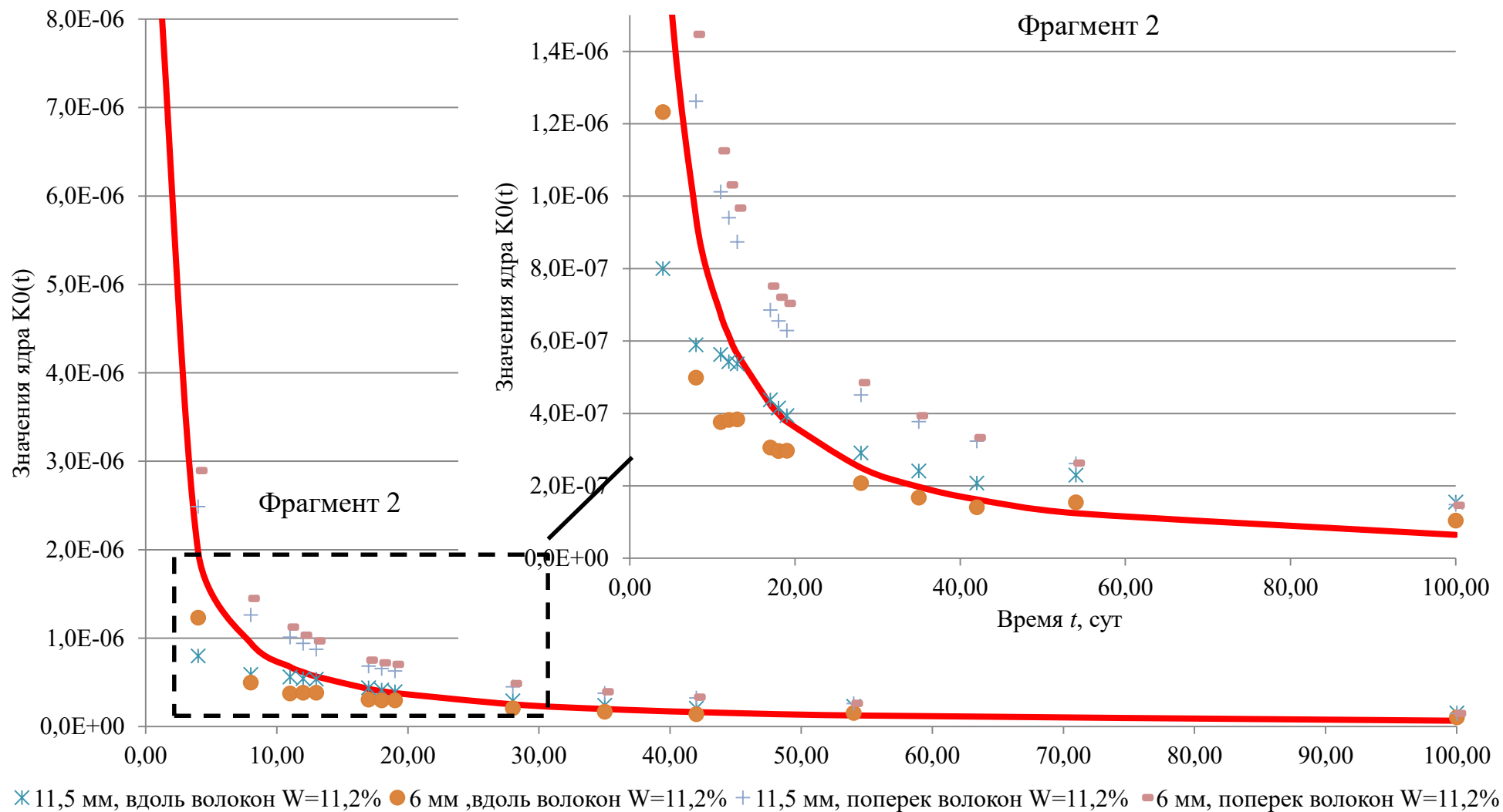


Рисунок 3.13. Влияние размеров штампов на значения ядра интегрального уравнения линейной наследственности во времени для треугольного штампа в LVL при влажности $W=11,2\%$.

Имея пару значений коэффициентов A соответствующих значениям влажности возможно описать их взаимосвязь с помощью выражения, которое примет следующий вид:

$$A = 2,32 \cdot 10^{-6} W^{-1,88 \cdot 10^{-6}} \quad (3.3)$$

Уравнение зависимости $K_0(t)$ принимает вид:

$$K_0(t) = A \frac{e^{-0,0012t}}{t^{1-0,0015}} \quad (3.4)$$

В результате длительных испытаний *LVL* под действием сжимающего усилия штампа треугольной формы были получены кривые ползучести и ядро мгновенного деформирования $K_0(t)$ для образцов влажностью $W=9,8\%$ и $W=11,2\%$ при действии треугольными штампами $h = 6$ мм $h = 11,5$ мм (для когтевых шайб $\varnothing 50$ мм и $\varnothing 95$ мм). Полученные данные могут быть использованы в уравнениях (2.31), (2.37).

3.2.3. Исследование влияния диаметра цилиндрического штампа на прочность при смятии и на коэффициент постели *LVL* при действии кратковременной нагрузки

Эксперименты по определению коэффициента постели при смятии цилиндрическим штампом проводятся путем вдавливания стержней различного размера, в соответствии с диаметром нагеля, в бруски толщиной 45 мм из *LVL*, габариты которых представлены на Рисунке 3.14 в зависимости от диаметра штампа.

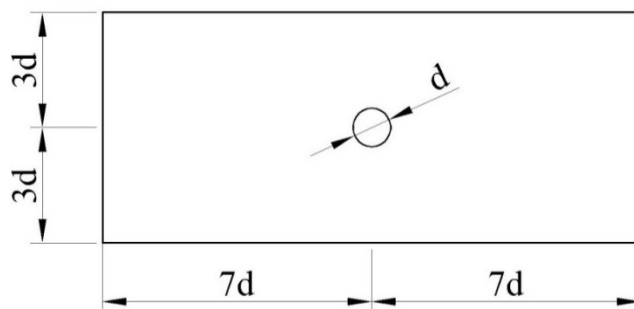


Рисунок 3.14. Размеры образцов для определения коэффициента постели при действии цилиндрическим штампом в зависимости от диаметра штампа.

Выбранная форма образца принята из предположения, что она является наиболее полно отражающей реальные условия при работе нагельных соединений. Материалом *LVL* был выбран брус *LVL Ultralam-R* [93].

Штампы были изготовлены из используемых для экспериментов Главы 4 нагелей диаметрами 12 мм, 14 мм, 16 мм. На основе предварительных испытаний было выявлено, что при действии нагрузки на нагель не происходит его заметных деформаций, из чего делается допущение о незначительности деформаций штампа, не влияющих на общий результат измерений. В ходе работы было проведено 60 испытаний (6 серий по 10 опытов в каждой).

Передача нагрузки выполнялась с помощью металлических пластин с отверстием для нагеля, располагаемых по краям образца. Это позволяло равномерно распределить нагрузку и предотвращало перекосы в соединении. Так же использовался зажим, предотвращающий скольжение металлических пластин по длине нагеля, гарантируя невозможность раскрытия щели между боковыми металлическими пластинами и бруском *LVL*.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине *Instron 5969*. Образец из *LVL* устанавливался на площадку машины с установкой в него цилиндрического штампа необходимого диаметра и металлических пластин для передачи нагрузки. Загружение проводилось с постоянной скоростью перемещения нагружающего устройства 2 мм/мин так, чтобы предельная нагрузка была достигнута в течении 3 минут от начала испытания. Отсчеты уровня нагрузки и перемещения фиксировались автоматически. Процедура проведения испытаний приведена на Рисунке 3.15. Для результатов испытаний проведена статистическая обработка данных, которые приведены в Таблице 3.6. и Таблице 3.7.

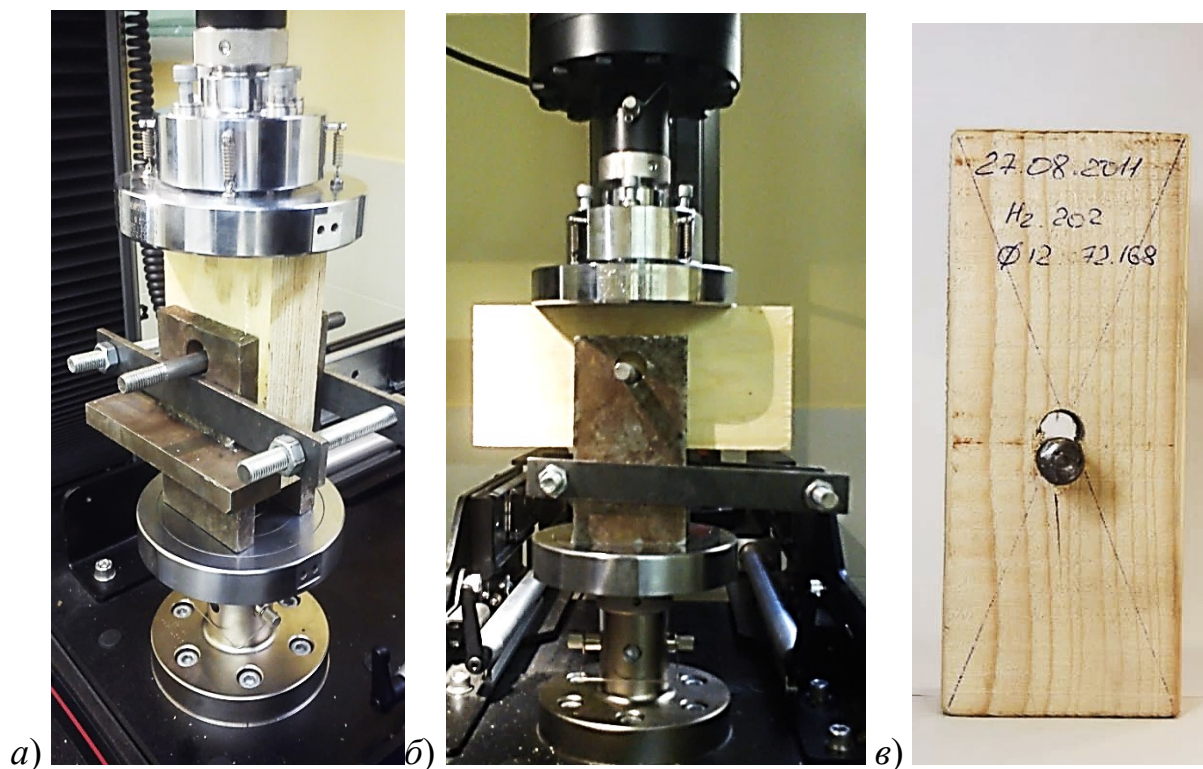


Рисунок 3.15. Проведение испытаний: а) образец для смятия вдоль волокон установлен в пресс, б) образец для смятия поперек волокон установлен в пресс, в) образец после испытаний.

Таблица 3.6. Экспериментальные значения прочности на сжатие *LVL* цилиндрическим штампом вдоль и поперек волокон

Среднее значение прочности R_{cp} , МПа	Количество испытаний в серии n , шт	Среднеквадратичное отклонение S , МПа	Коэффициент вариации V , %	Среднеквадратичная погрешность P ,
Прочность <i>LVL</i> на сжатие цилиндрическим штампом $d_H = 12$ мм вдоль волокон				
49,41	10	2,80	5,18	4,53
Прочность <i>LVL</i> на сжатие цилиндрическим штампом $d_H = 12$ мм поперек волокон				
16,43	10	2,82	1,68	9,69
Прочность <i>LVL</i> на сжатие цилиндрическим штампом $d_H = 14$ мм вдоль волокон				
43,09	10	2,77	5,96	14,35
Прочность <i>LVL</i> на сжатие цилиндрическим штампом $d_H = 14$ мм поперек волокон				
19,71	10	1,63	7,64	8,26
Прочность <i>LVL</i> на сжатие цилиндрическим штампом $d_H = 16$ мм вдоль волокон				
38,07	10	1,68	9,69	6,78
Прочность <i>LVL</i> на сжатие цилиндрическим штампом $d_H = 16$ мм поперек волокон				
16,43	10	1,49	8,28	8,70

Таблица 3.7. Экспериментальные значения коэффициента постели *LVL* при сжатии треугольным штампом вдоль и поперек волокон

Среднее значение коэфф. постели C_{cp} , Н/мм ³	Количество испытаний в серии n , шт	Среднеквадратичное отклонение S , Н/мм ³	Коэффициент вариации	Среднеквадратичная погрешность P , %
Коэффициент постели для <i>LVL</i> при сжатии цилиндрическим штампом $d_n = 12$ мм вдоль волокон				
36,56	10	1,40	3,53	2,65
Коэффициент постели для <i>LVL</i> при сжатии цилиндрическим штампом $d_n = 12$ мм поперек волокон				
10,51	10	1,69	15,26	8,95
Коэффициент постели для <i>LVL</i> при сжатии цилиндрическим штампом $d_n = 14$ мм вдоль волокон				
33,21	10	1,57	4,51	3,15
Коэффициент постели для <i>LVL</i> при сжатии цилиндрическим штампом $d_n = 14$ мм поперек волокон				
10,04	10	1,41	12,90	6,36
Коэффициент постели для <i>LVL</i> при сжатии цилиндрическим штампом $d_n = 16$ мм вдоль волокон				
29,23	10	4,39	14,54	7,16
Коэффициент постели для <i>LVL</i> при сжатии цилиндрическим штампом $d_n = 16$ мм поперек волокон				
6,61	10	1,62	22,47	8,02

В ходе обработки данных эксперимента были получены уравнения регрессии, отражающие зависимость между пределом прочности *LVL* при сжатии по ГОСТ 168483.10-73* [9] и при смятии цилиндрическим штампом $R_{cm}^{вр}/R_{сж}^{вр}$, а так же между величиной коэффициента постели $C_{cp}^{вр}/R_{сж}^{вр}$ и диаметром d для воздействия вдоль и поперек волокон.

Графики зависимости напряжения и деформации приведены на Рисунках 3.16 - 3.19 для смятия вдоль и поперек волокон при диаметрах $d_n = 12$ мм, $d_n = 14$ мм, $d_n = 16$ мм.

Напряжения смятия σ_{cm} были определены по величине прироста деформаций и сведены в один график для разных диаметров отдельно для смятия вдоль и поперек волокон. Это позволит наглядно определить влияние габаритов нагеля на исследуемые характеристики.

Для смятия вдоль волокон:

$$R_{см,0} = (-0,051 d_H + 1,483) R_{сж,0};$$

$$C_0 = (-0,032 d_H + 1,028) R_{сж,0}$$

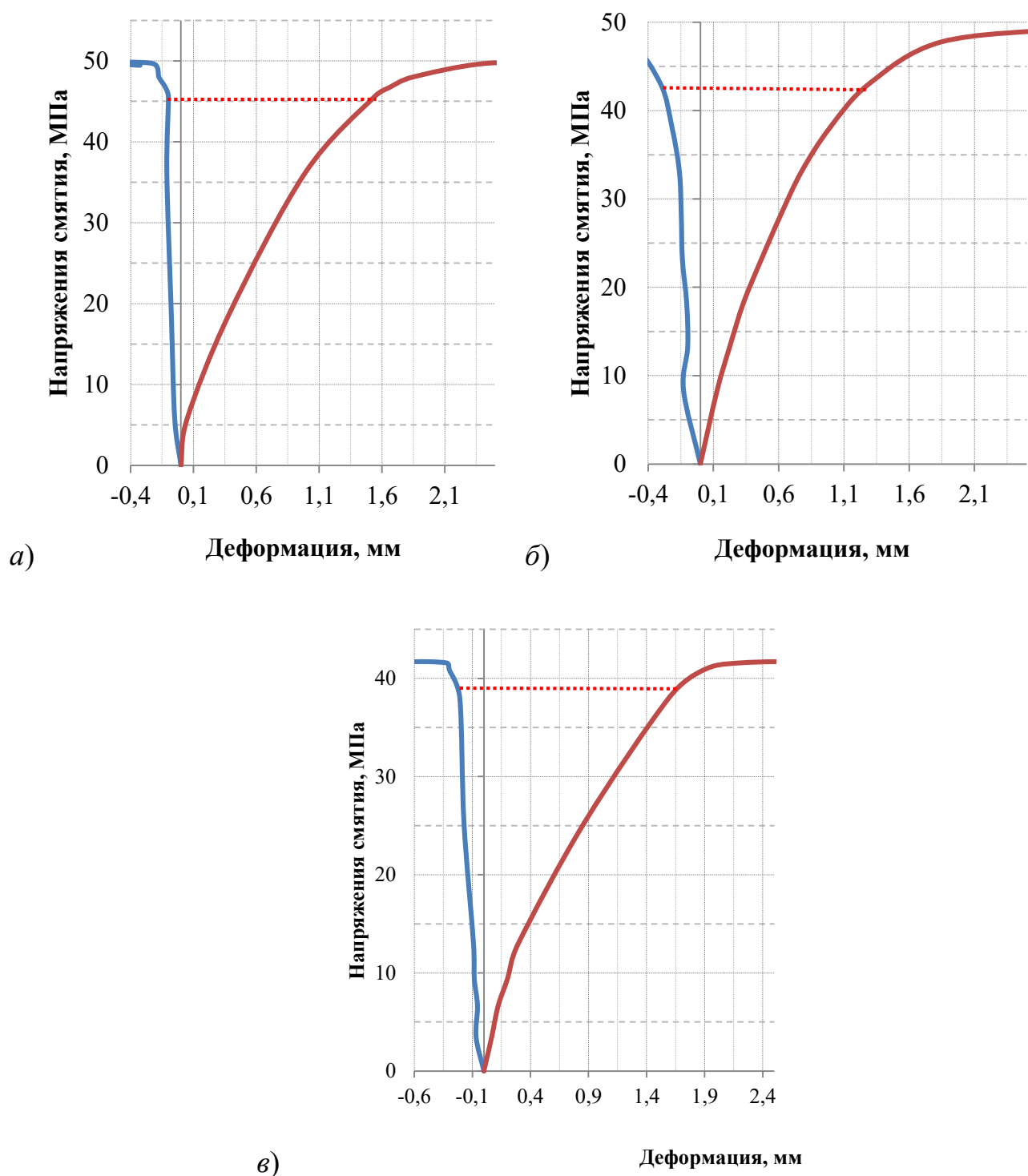


Рисунок 3.16. Зависимость деформаций смятия вдоль волокон от напряжения смятия для штампов диаметром d : а) $d_H = 12$ мм; б) $d_H = 14$ мм; в) $d_H = 16$ мм.

Для смятия поперек волокон:

$$R_{см.90} = (-0,109 d_n + 3,29)R_{сж,90};$$

$$C_{90} = (-0,092 d_n + 2,128) R_{сж,90}$$

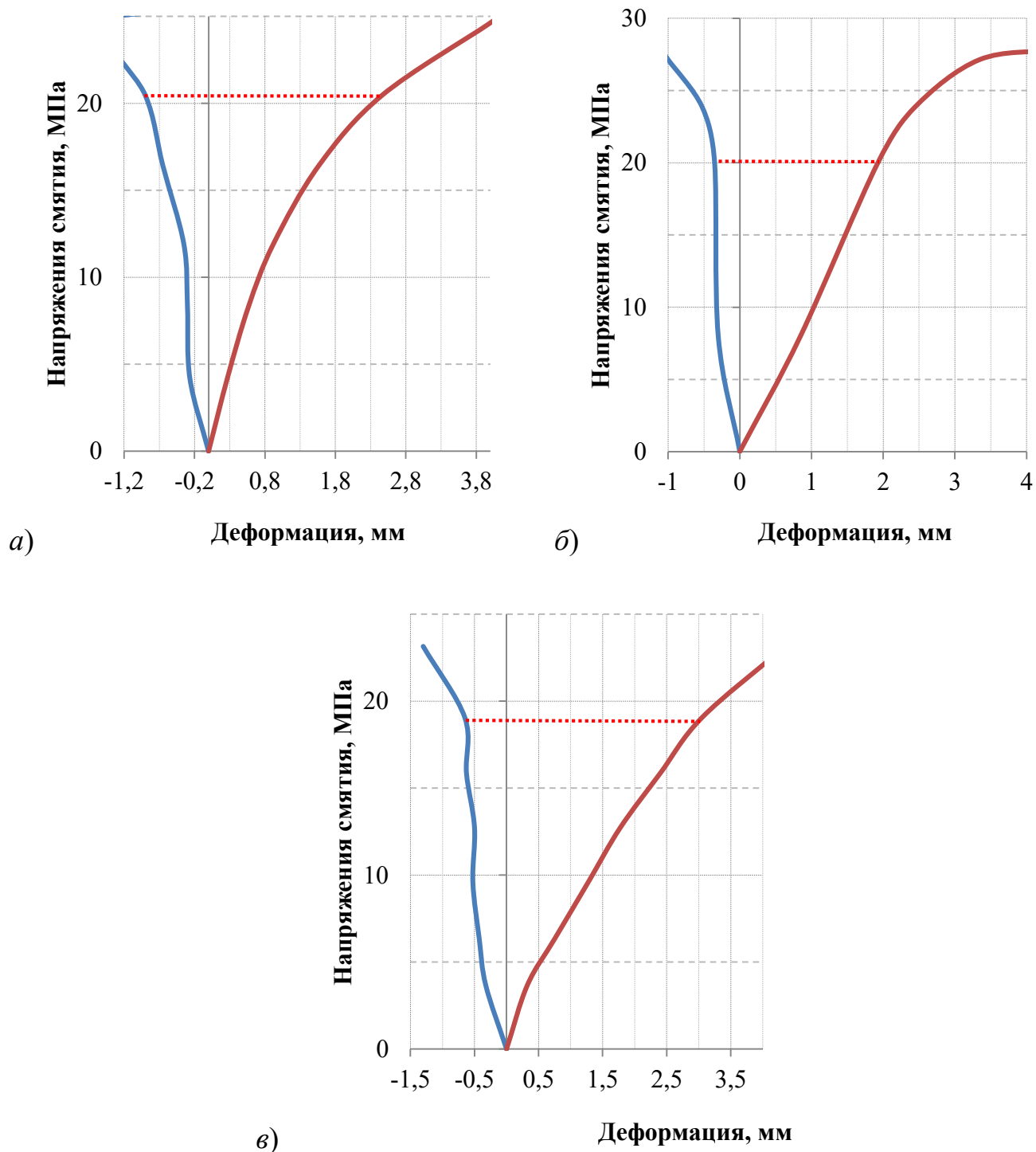


Рисунок 3. 17. Зависимость деформаций смятия поперек волокон от напряжения смятия для нагеля диаметром d_n : а) $d_n = 12$ мм; б) $d_n = 14$ мм; в) $d_n = 16$ мм.

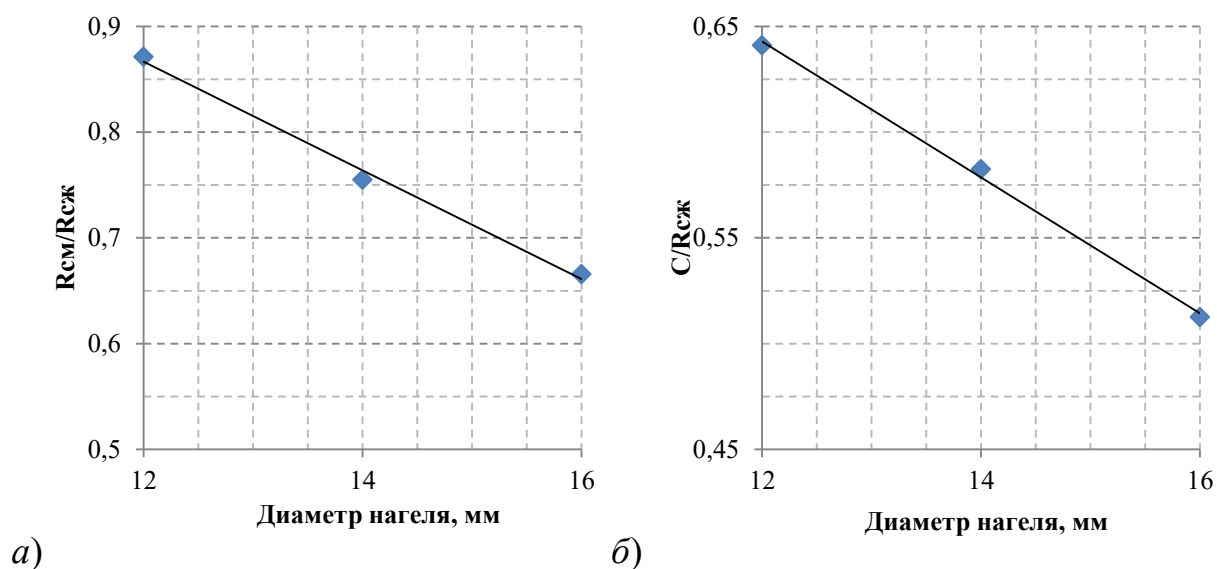


Рисунок 3.18. Зависимости, по результатам эксперимента: а) между отношением предела прочности LVL при смятии вдоль волокон к пределу прочности при сжатии при заданном диаметре нагеля; б) между отношением коэффициента постели LVL при смятии вдоль волокон к пределу прочности при сжатии при заданном диаметре нагеля.

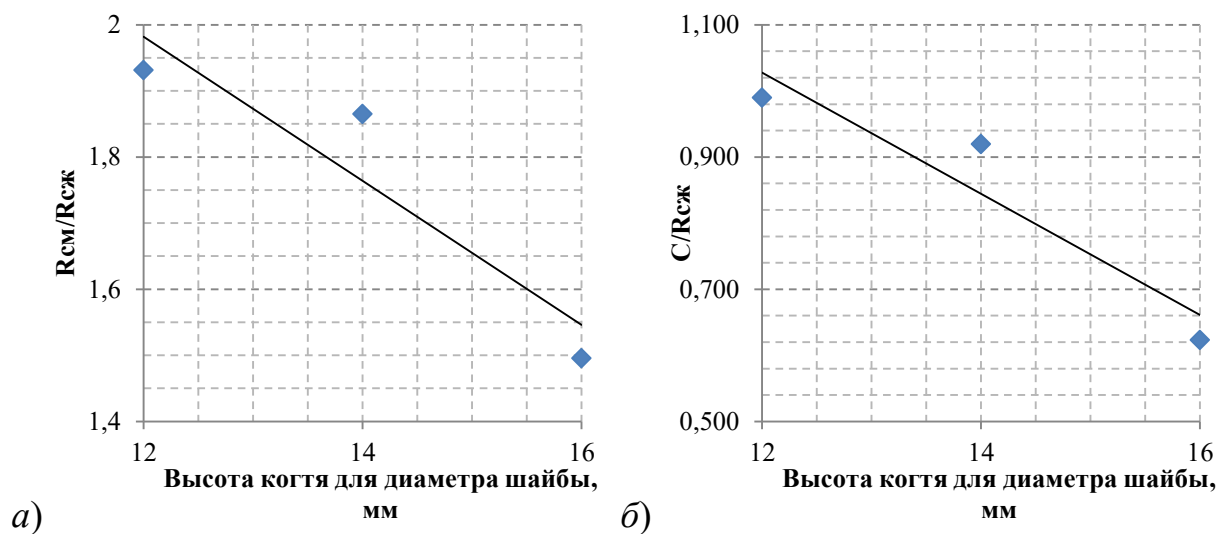


Рисунок 3.19. Зависимости, по результатам эксперимента: а) между отношением предела прочности LVL при смятии поперек волокон к пределу прочности при сжатии при заданной высоте когтя; б) между отношением коэффициента постели LVL при смятии поперек волокон к пределу прочности при сжатии при заданной высоте когтя.

Полученные значения коэффициентов постели удовлетворительно согласуются при действии нагрузки вдоль волокон с результатами, полученными Дмитриевым П. А. [33], при действии поперек волокон результаты сопоставимы с результатами Шешуковой Н. В. [111], что позволяет сделать вывод о близости значений коэффициентов постели цилиндрических штампов при использовании цельной древесины сосны и *LVL*.

При анализе представленных результатов, можно заметить снижение прочности на сжатие цилиндрическим штампом при увеличении диаметра штампа, как для случая сжатия вдоль, так и поперек направления волокон (рисунки 3.18-3.19). Похожая особенность была замечена при определении коэффициента постели для треугольных штампов, что подтверждает гипотезу о влиянии габаритов штампа на величину предела прочности *LVL* и коэффициент постели.

Полученные уравнения регрессии необходимы при расчете нагельных соединений в конструкциях из клееного однонаправленного бруса *LVL*.

3.2.4. Исследование влияния диаметра цилиндрического штампа на прочность при смятии и коэффициент постели *LVL* при действии длительной нагрузки

Исследование длительной прочности *LVL* при действии цилиндрическим штампом осуществлялись с помощью вдавливания цилиндрических штампов размерами $d_n = 12$ мм и $d_n = 14$ мм в образцы, представляющие собой бруски сечением 100 x 45 мм и длиной вдоль волокон 200 мм из *LVL* с фиксацией прикладываемой нагрузки и соответствующих смещений. Материалом *LVL* был выбран брус *LVL Ultralam-R* [93]. Образцы *LVL* выполнялись из того же материала, что образцы для испытаний с использованием треугольного штампа, поэтому влажность и прочность соответствует значениям: $W = 11,2\%$ ($R_{сж} = 58,2$ МПа), и $W = 9,8\%$ ($R_{сж} = 62,53$ МПа).

Для проведения испытаний была использована разработанная установка

рычажного типа (см. выше), с помощью которой может выполняться приложение неизменной нагрузки в течение длительного периода времени с возможностью отслеживания смещения. Чтобы зафиксировать первоначальной влажность древесины образцы были замотаны в стретч-пленку. Это позволяло образцам сохранять одинаковую влажность на весь период испытаний.

Величина длительной нагрузки была выбрана равной $R = 0,4 R_{max}$ от разрушающего усилия. Всего было проведено 16 испытаний (8 серий по 2 опыта в каждой). Испытания проводились в течение 100 суток. Разгрузка образцов выполнялась 25 суток. После испытаний были построены графики кривых деформирования для различного размера штампа и направления приложения усилия к волокнам. Структура испытаний приведена в Таблице 3.8. Процесс испытания представлен на Рисунке 3.20.

Таблица 3.8. Структура испытаний на смятие *LVL* цилиндрическим штампом от действия длительной нагрузки

Номер серии	1	2	3	4	5	6	7	8
Диаметр штампов d_n , мм	12	14	12	14	12	14	12	14
Влажность W	9,8 %		11,2 %		9,8 %		11,2 %	
Направление волокон	Вдоль волокон				Поперек волокон			
Количество опытов	2 дубликата в серии							
Длительность испытаний t , сут.	100							
Уровень нагрузки R	$0,4 R_{max}$							

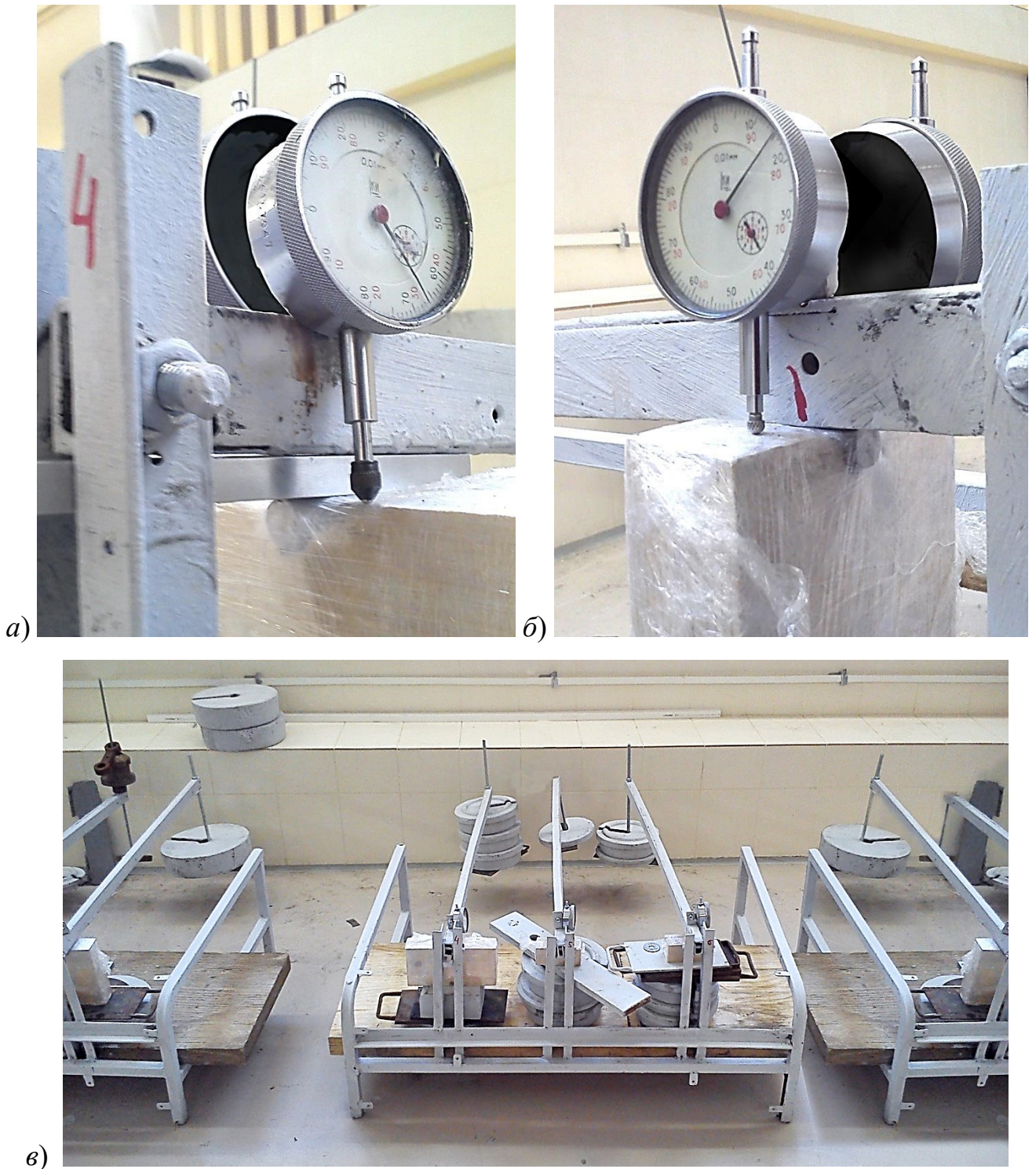


Рисунок 3.20. Исследование влияния диаметра цилиндрического штампа на прочность при смятии и коэффициент постели *LVL* при действии длительной нагрузки: а) штамп диаметром $d=14$ мм, поперек волокон, б) штамп диаметром $d=12$ мм, вдоль волокон, в) общий вид проведения испытаний.

Экспериментальные зависимости относительной ползучести от времени для цилиндрического штампа в *LVL* приведены на Рисунках 3.21-3.22. Для влажности $W = 9,8\%$ при приложении нагрузки вдоль волокон деформации смещения составили 0,56 мм, прирост деформаций составил 0,02 мм для нагеля диаметром $d_n = 12$ мм, деформации смещения составили 0,63 мм, прирост деформаций составил 0,03 мм для нагеля диаметром $d_n = 14$ мм. При приложении нагрузки поперек волокон деформации смещения составили 0,6 мм, прирост деформаций составил 0,15 мм для нагеля диаметром $d_n = 12$ мм, деформации смещения составили 0,67 мм, прирост деформаций составил 0,18 мм для нагеля диаметром $d_n = 14$ мм.

Для влажности $W = 9,8\%$ при приложении нагрузки вдоль волокон деформации смещения составили 0,56 мм, прирост деформаций составил 0,02 мм для нагеля диаметром $d_n = 12$ мм, деформации смещения составили 0,63 мм, прирост деформаций составил 0,03 мм для нагеля диаметром $d_n = 14$ мм. При приложении нагрузки поперек волокон деформации смещения составили 0,6 мм, прирост деформаций составил 0,15 мм для нагеля диаметром $d_n = 12$ мм, деформации смещения составили 0,67 мм, прирост деформаций составил 0,18 мм для нагеля диаметром $d_n = 14$ мм.

Для влажности $W = 11,2\%$ при приложении нагрузки вдоль волокон деформации смещения составили 0,37 мм, прирост деформаций составил 0,05 мм для нагеля диаметром $d_n = 12$ мм, деформации смещения составили 0,45 мм, прирост деформаций составил 0,06 мм для нагеля диаметром $d_n = 14$ мм. При приложении нагрузки поперек волокон деформации смещения составили 0,4 мм, прирост деформаций составил 0,32 мм для нагеля диаметром $d_n = 12$ мм, деформации смещения составили 0,48 мм, прирост деформаций составил 0,42 мм для нагеля диаметром $d_n = 14$ мм.

При анализе кривых деформирования можно заметить, что на протяжении всего временного участка испытания (100 сут.) кривые ползучести имели затухающий характер, который начинался в среднем на 60 сутки испытаний, при этом основной прирост деформаций происходил в первые сутки.

Наиболее сильно влияние фактора времени сказывалось для образцов подверженных действию нагрузки поперек волокон при влажности $W = 11,2\%$ при которой прирост деформаций в среднем составил 82%.

Распределение изменений величин относительной ползучести LVL вдоль и поперек волокон при влажности $W=11,2\%$ аналогично распределению для древесины сосны.

Зависимость ядра интегрального уравнения линейной наследственности от времени для цилиндрического штампа в LVL представлена на Рисунках 3.23-3.24. Для определения ядра мгновенного деформирования $K_0(t)$ применяем уравнение регрессии в виде выражения $K_0(t) = A \frac{e^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}}$. Учет влияния влажности W на результаты исследования производится в использовании коэффициента A аналогично пп. 3.2.2. При аппроксимации кривых ползучести LVL под действием цилиндрического штампа значение коэффициента β было найдено, как $\beta = 0,0025$, для α принято значение $\alpha=0,102$. Уравнение ядра ползучести принимает вид:

$$K_0(t) = A \frac{e^{-0,0025t}}{t^{1-0,102}}; \quad (3.5)$$

где A – коэффициент зависящий от влажности W .

Связь влажности LVL и формы деформирования выражается коэффициентом A и представляет следующую зависимость:

$$A = 1,21 \cdot 10^{-6} W - 1,076 \cdot 10^{-5}. \quad (3.6)$$

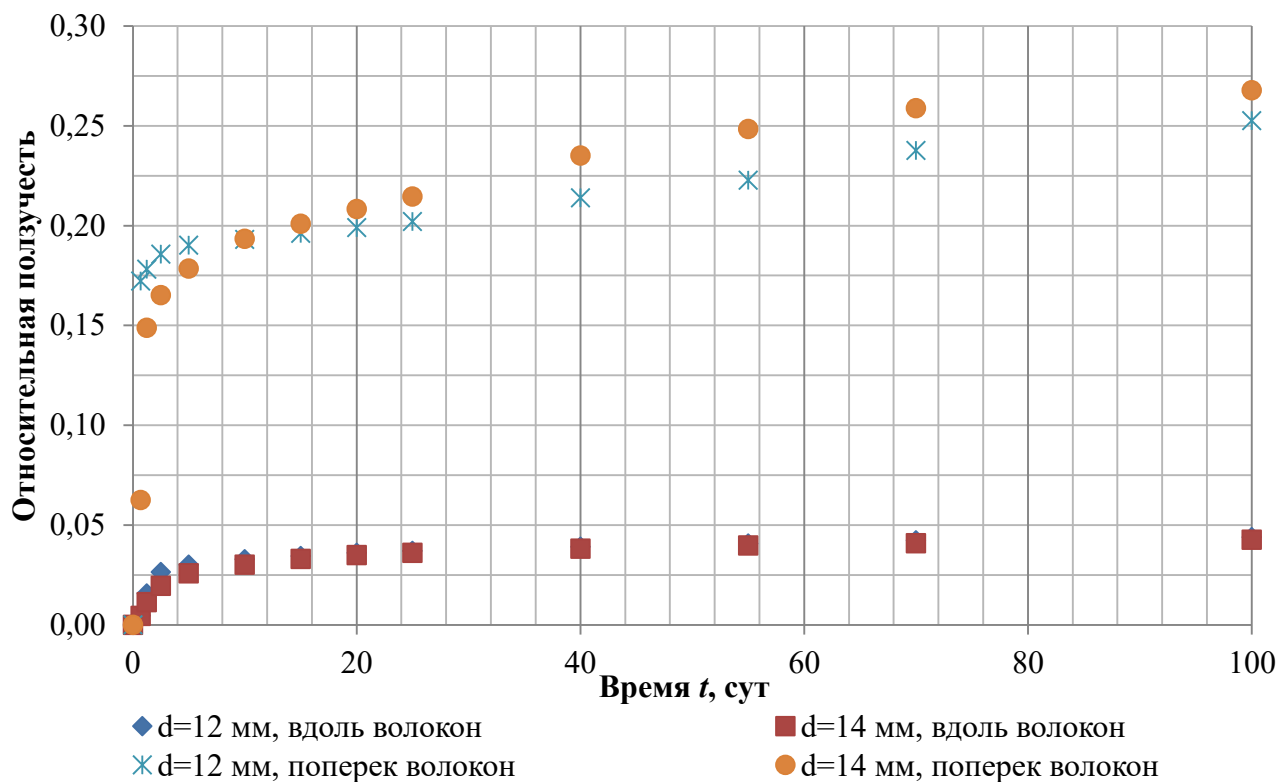


Рисунок 3.21. Экспериментальные зависимости относительной ползучести от времени для цилиндрического штампа в *LVL* при влажности $W=9.8\%$

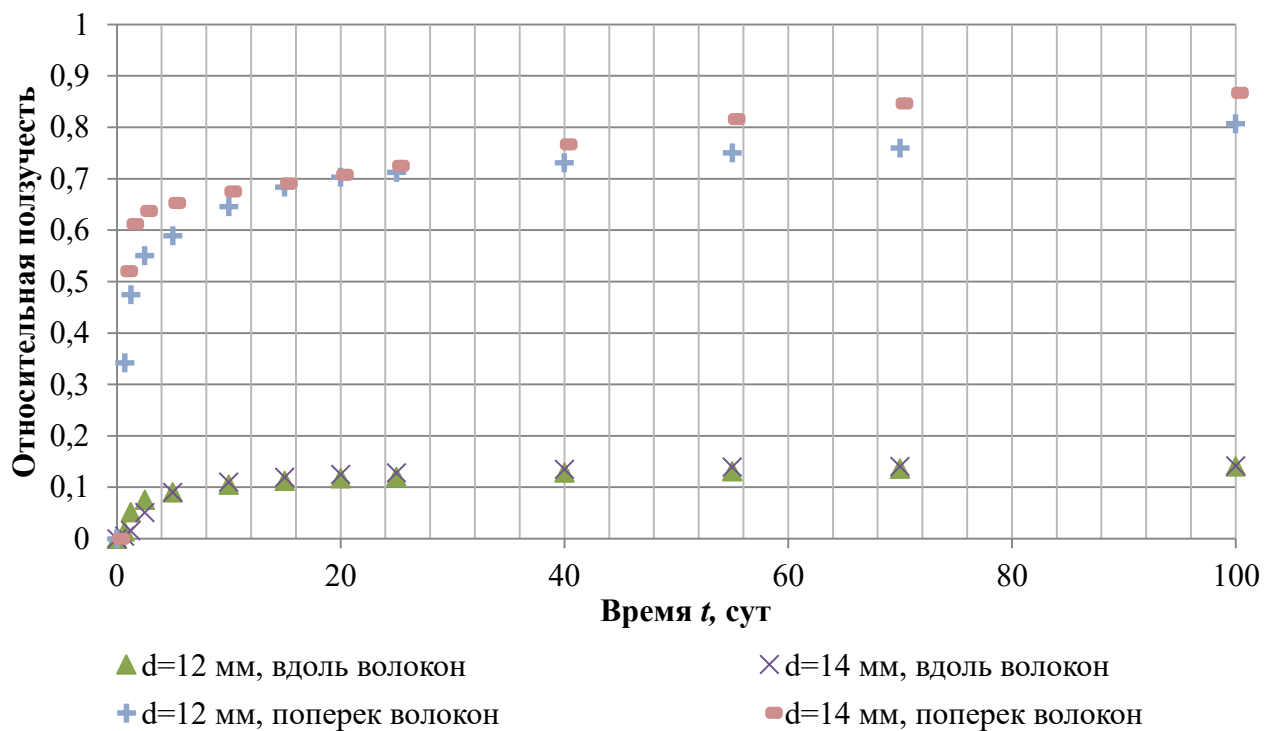


Рисунок 3.22. Экспериментальные зависимости относительной ползучести от времени для цилиндрического штампа в *LVL* при влажности $W=11,2\%$.

Фрагмент 3

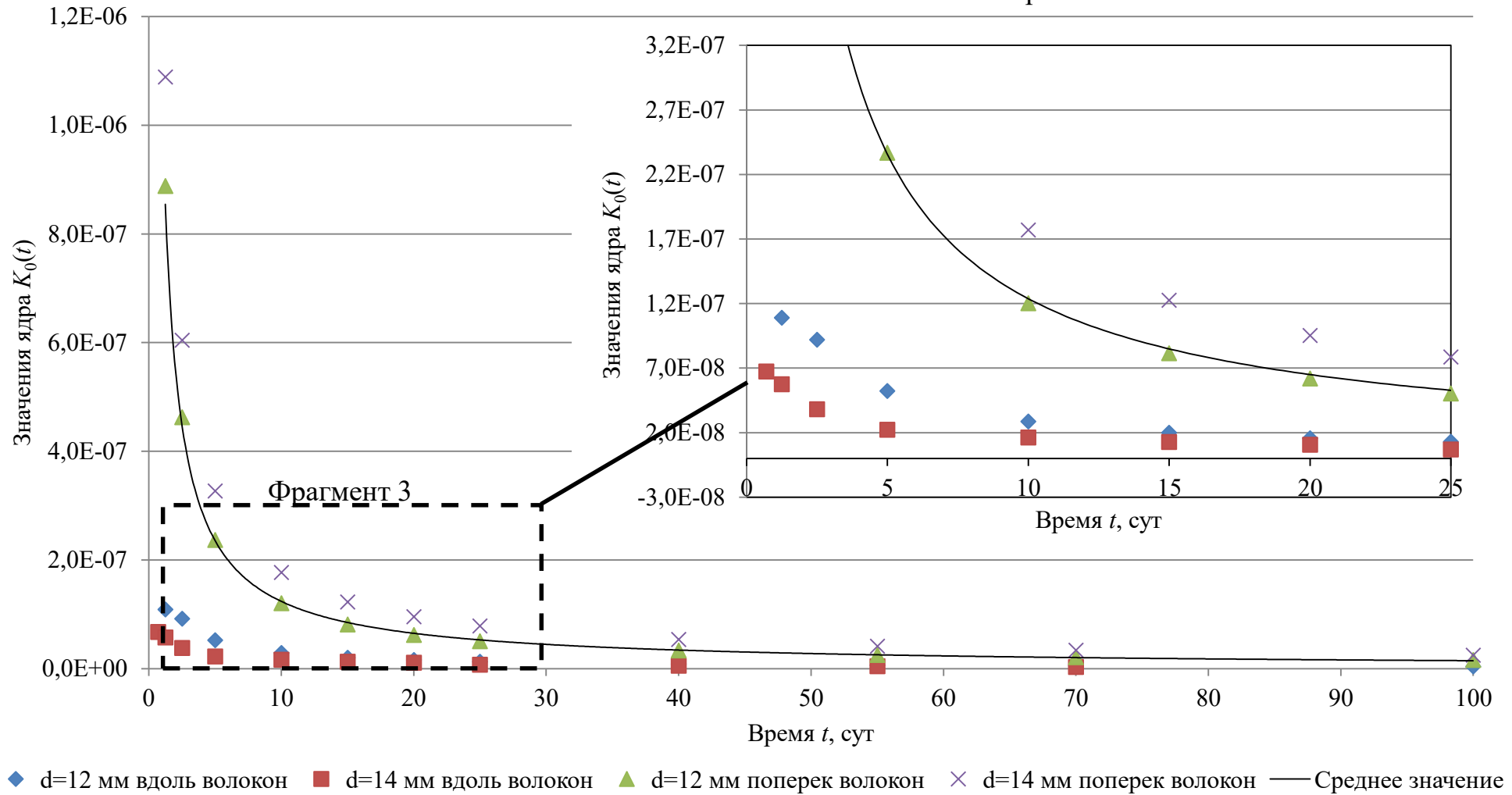


Рисунок 3.23. Влияние размеров штампов на значения ядра интегрального уравнения линейной наследственности во времени для цилиндрического штампа в *LVL* при влажности $W=9.8\%$

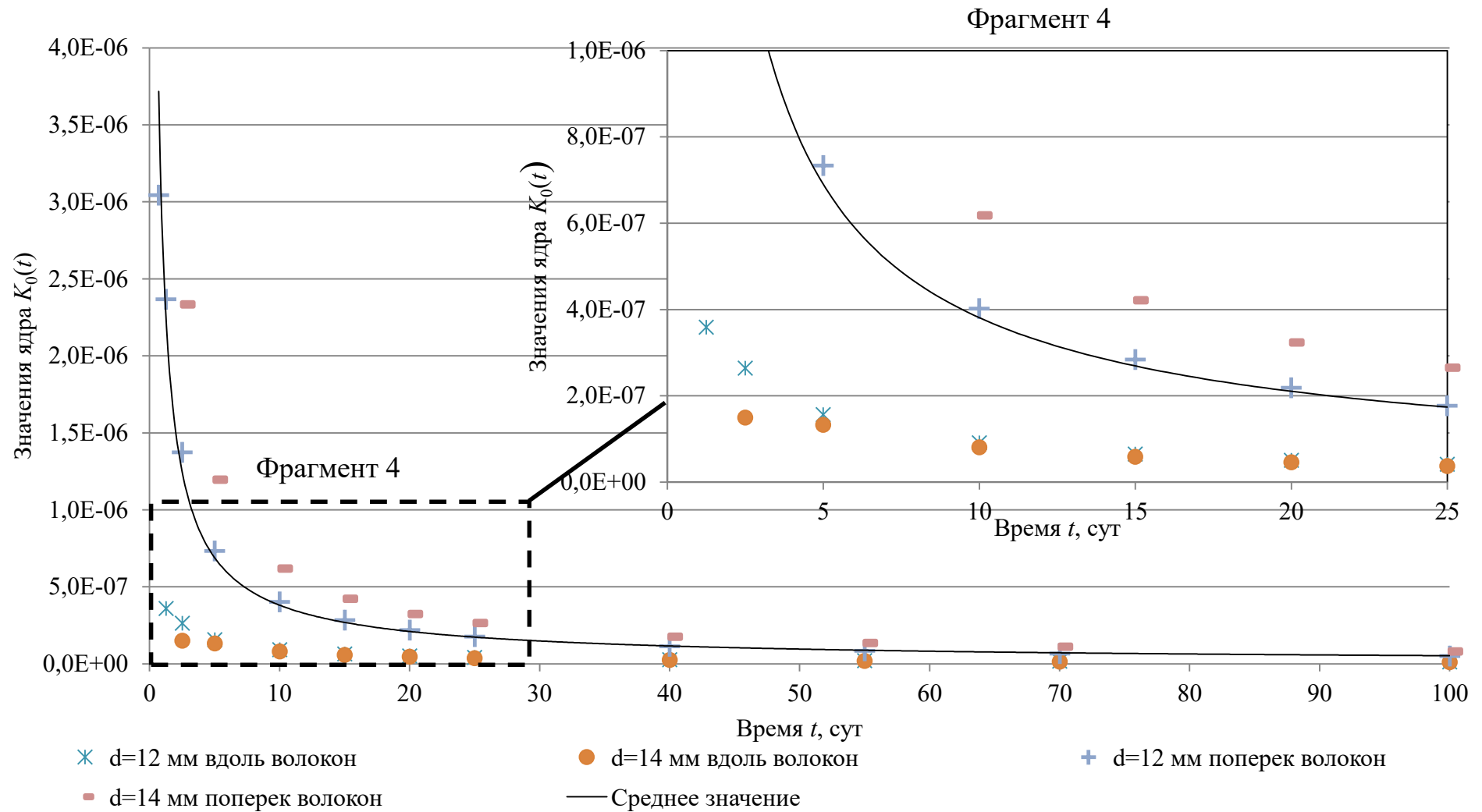


Рисунок 3.24. Влияние размеров штампов на значения ядра интегрального уравнения линейной наследственности во времени для цилиндрического штампа в *LVL* при влажности $W=11,2\%$.

В результате длительных испытаний *LVL* под действием сжимающего усилия штампа цилиндрической формы были получены кривые ползучести и ядро мгновенного деформирования $K_0(t)$ для образцов влажностью $W=9,8\%$ и $W=11,2\%$ при действии цилиндрическими штампами $d = 12$ мм и $d = 14$ мм.

3.3. Определение прочностных характеристик стали соединителей

На производство когтевых шайб существует европейский нормативный документ стандарт *EN 912* [124]. Для изготовления когтевых шайб используется низкоуглеродистая сталь с холоднокатаным покрытием (без покрытия). Материал тела шайбы должен соответствовать типам сталей *DC01+C390* по *EN 10139* [122], или холоднокатанной высокопрочной стали для холодной штамповки *H320M* по *EN 10268* [123].

Для производства нагелей для деревянных конструкций, как правило, используется конструкционная углеродистая сталь *A240* обыкновенного качества (СтЗсп по ГОСТ 380-94 [14]).

Для определения предела текучести и модуля упругости сталей были проведены испытания на растяжение по ГОСТ 1497-84 [8] и ГОСТ 11701-84 [7]. Для когтевой шайбы образцы были вырезаны из тела когтевой шайбы $\varnothing 140$ мм. Для нагелей образцы были изготовлены из стали, идентичной той, что используется при испытаниях соединений в Главе 4. Испытания проводилась на испытательных машинах *Instron 5969* и *Instron 5989*. Снятие по приборам информации о перемещении и уровне нагрузке фиксировались в автоматическом режиме. Программное обеспечение испытательной машины позволило получить график зависимости между напряжением в материале и его перемещениями. Размеры образцов приведены на Рисунке 3.25 и Рисунке 3.27.

Модуль упругости для образцов был определен, как среднее значение нескольких ступеней загрузки в области упругой работы материала. Предел текучести был определен по диаграммам растяжения согласно с ГОСТ 1497-84. Результаты испытаний приведены в Таблице 3.9 и Таблице 3.10. Усредненные

диаграммы работы материалов на растяжение приведены на Рисунке 3.26 и на Рисунке 3.28, процесс проведения испытаний приведен на Рисунках 3.29-3.30.

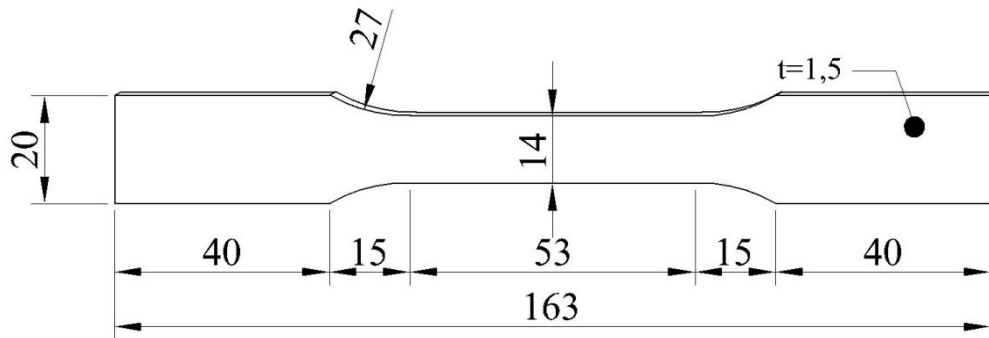


Рисунок 3.25. Размеры образцов для испытания стали когтевых шайб на растяжение.

Таблица 3.9. Результаты испытания стали когтевой шайбы

Образец №	Ширина b_0 , мм	Толщина, t , мм	Площадь расчетного сечения, мм ²	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Модуль упругости, МПа
1	14,24	1,51	21,502	470,599	397,537	199565
2	14,47	1,5	21,705	477,448	402,903	193768
3	13,13	1,54	20,22	445,001	374,081	210032
4	14,38	1,49	21,426	458,224	395,684	212350
5	14,18	1,54	21,837	451,065	368,912	201251
Средние значения				460,467	387,823	203393

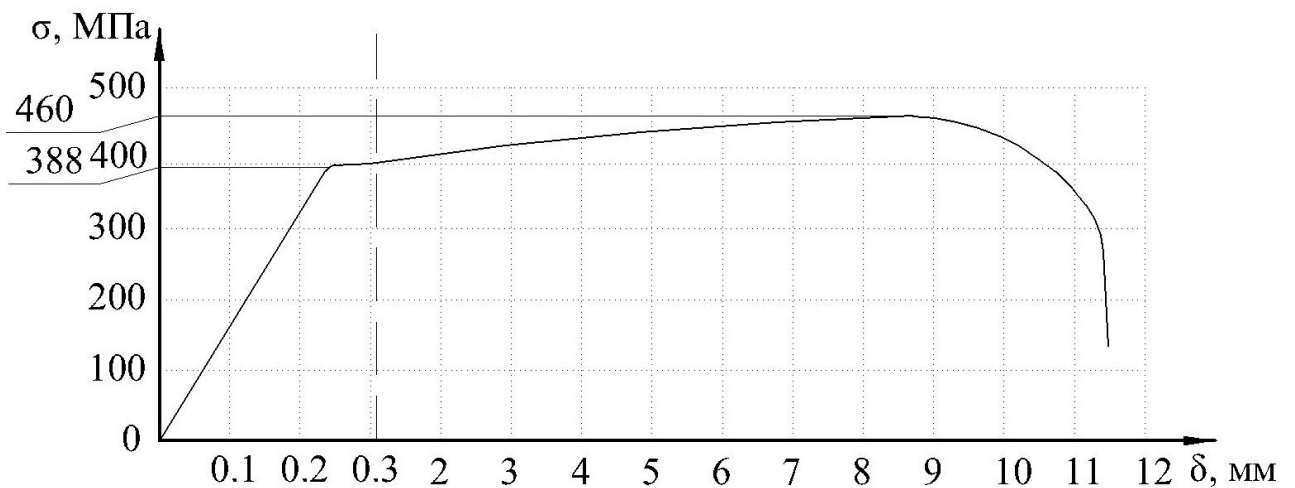


Рисунок 3.26. Усредненная диаграмма работы стали когтевой шайбы на растяжение.

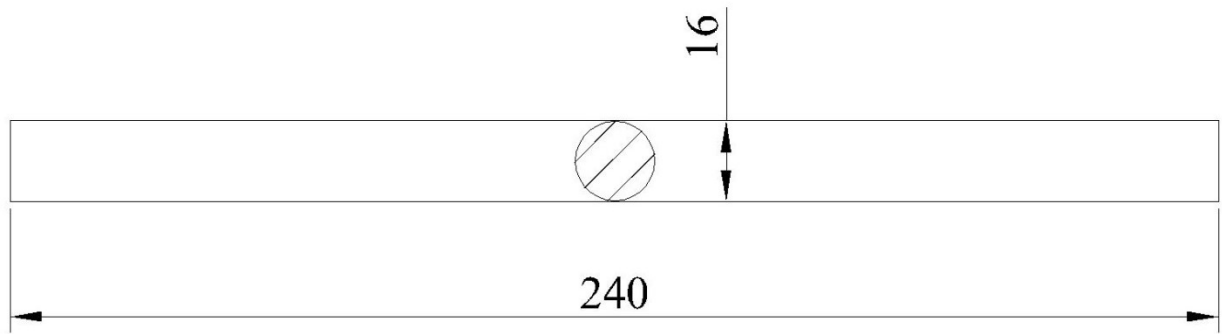


Рисунок 3.27. Размеры образцов для испытания стального нагеля на растяжение.

Таблица 3.10. Результаты испытания стального нагеля

Образец №	Диаметр d , мм	Площадь расчетного сечения, мм ²	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Модуль упругости, МПа
1	15,7	193,593	310,82	278,31	213705
2	15,6	191,135	310,00	279,48	202053
3	15,8	196,067	297,62	272,81	210321
4	15,8	196,067	311,28	271,04	204560
5	15,7	193,593	312,65	280,35	209434
Средние значения			308,47	276,40	208014

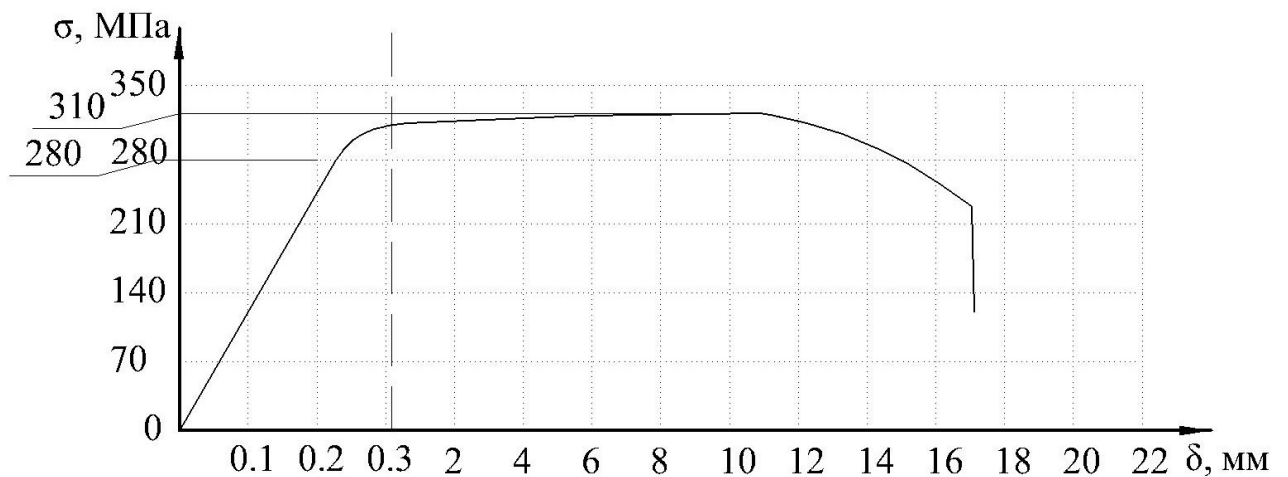


Рисунок 3.28. Усредненная диаграмма работы стального нагеля на растяжение.

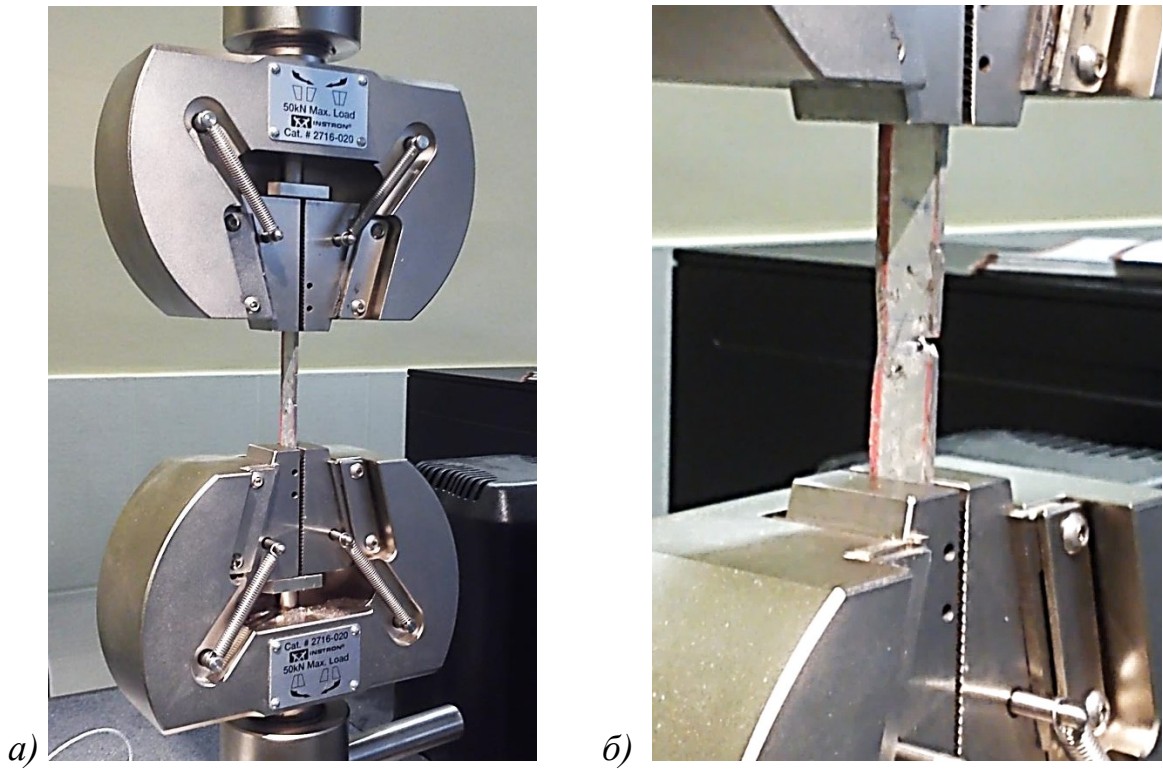


Рисунок 3.29. Определение прочностных характеристик стали когтевой шайбы: *а)*- закрепление образца в щечках испытательной установки, *б)* – разрушение образца.

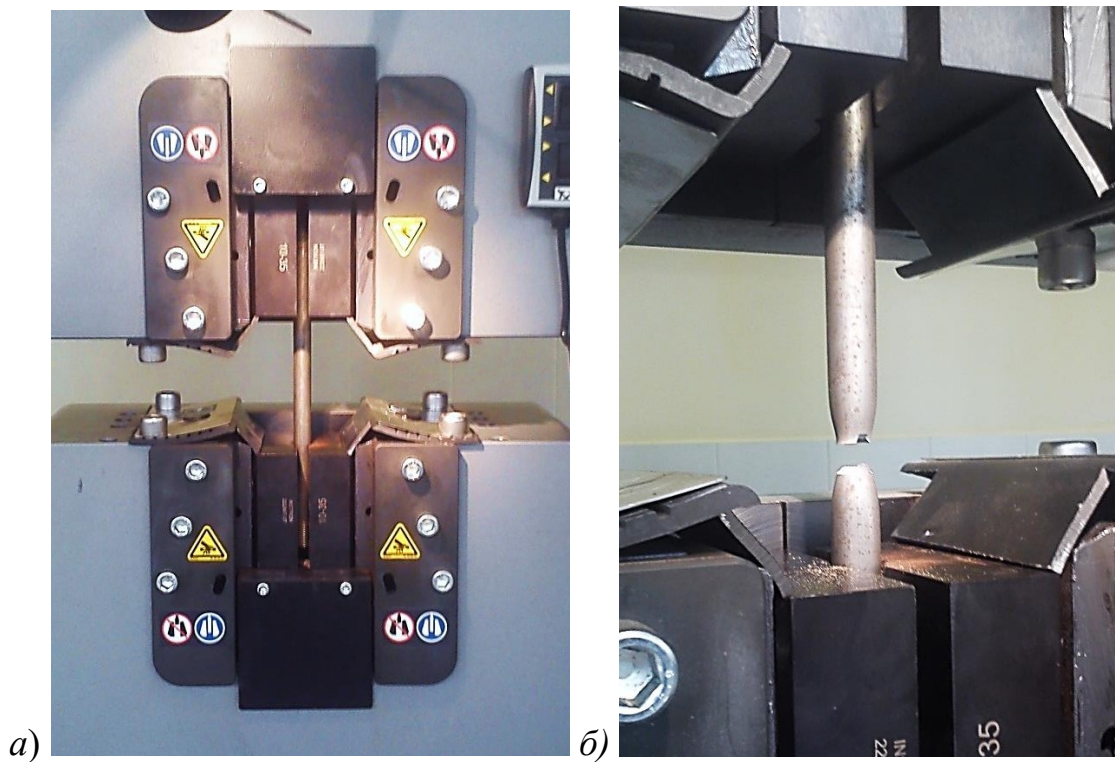


Рисунок 3.30. Определение прочностных характеристик стального нагеля: *а)*- закрепление образца в щечках испытательной установки, *б)* – разрушение образца.

При холодной штамповке когтевых шайб возникает некоторое изменение прочностных свойств материала стали. В месте основания когтя шайбы имеет место некоторое упрочнение, которое необходимо учитывать при расчете когтей шайбы на изгиб. Для определения коэффициента упрочнения металла n при холодной штамповке для когтевых шайб было проведено испытание. Для испытаний было необходимо изготовить испытуемый коготь из стали марки DC01+C390 по EN10139 [122] или H320M по EN10268 [123], с геометрическими размерами, соответствующими зубцам выбранного типа когтевой шайбы. В связи с дефицитностью данной марки стали было принято решение использовать в качестве образца коготь самой шайбы диаметрами $d = 50$ мм, 95 мм и 117 мм, предварительно подготовленной. Для этого все, кроме одного когтя, были выпрямлены, таким образом, чтобы обеспечить удобное опирание полосы с когтем 3 в жесткое основание 1 через прорезь 4 (см. Рисунок 3.31) и обеспечивать надежное закрепление в захватах 2 испытательной машины. Минимальное количество образцов каждого диаметра было принято 5 штук.

Для проведения испытания применялась следующая аппаратура: универсальная машина *Instron 5969*, обеспечивающая заданную скорость перемещения нагружаемой головки равную 0,5 мм/мин, позволяющая измерять нагрузку с погрешностью не более 1%, приспособление (кондуктор), обеспечивающее необходимое опирание когтя в жесткое основание, штангенциркуль, с погрешностью измерения не более 0,01 мм. Испытание продолжалось до разрушения образца, определялась максимальная нагрузка P_{max} с погрешностью не более 1%.

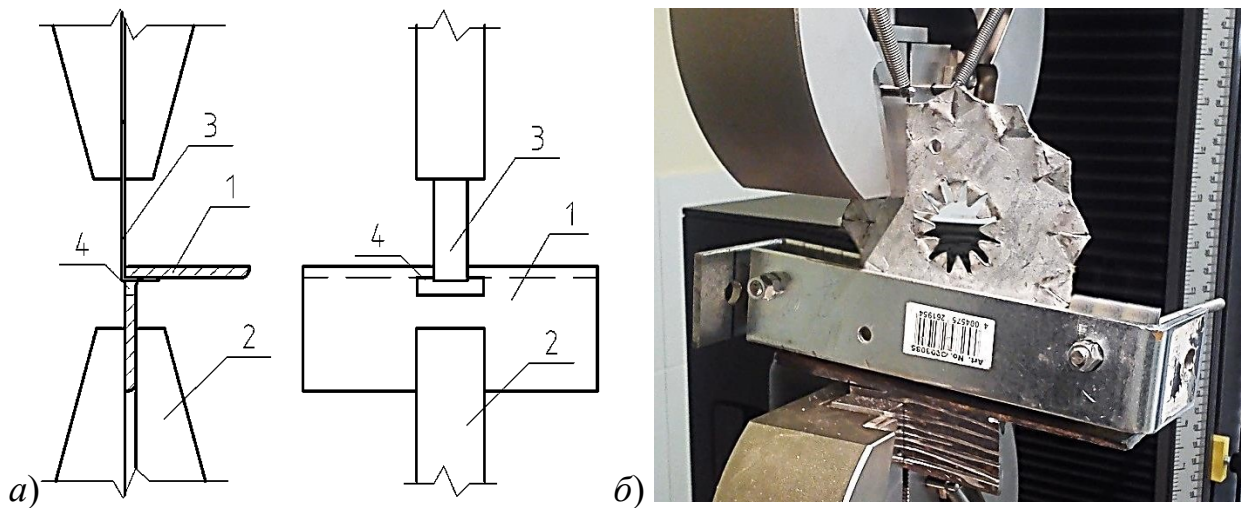


Рисунок 3.31. Схема испытания для определения коэффициента упрочнения n для стали шайбы: а) 1 – равнополочный уголок 50x5 мм, 2 – захват испытательной машины, 3 – полоса с когтем, 4 – прорезь для когтя в равнополочном уголке; б) образец во время испытания.

Момент, действующий на сечение в основании когтя будет найден, как произведение максимального усилия и плеча c_{Δ} с которым будет передаваться нагрузка:

$$M = P_{max}c_{\Delta}; \quad (3.24)$$

где c_{Δ} - плечо передачи нагрузки P_{max} к основанию когтя, которое принимается как $c_{\Delta} = h/3$, мм;

h – величина высоты когтя, мм.

Для определения коэффициента упрочнения металла n , необходимо сравнить значения момента M , действующего на сечение, при котором фактически образуется пластический шарнир со значением $M_{пл}$, рассчитанным по формулам:

$$M_{пл} = R_u W_{пл}; \quad (3.25-3.27)$$

$$R_u = \sigma_{тек} n; \quad W_{пл} = S_{пл}^B + S_{пл}^H;$$

где R_u – расчетное сопротивление когтя шайбы с учетом упрочнения металла при штамповке, МПа;

$W_{пл}$ – пластический момент сопротивления сечения зуба, мм³;

$\sigma_{тек}$ – предел текучести материала стали когтя шайбы, принимаемый 390 МПа;

$S_{пл}^в, S_{пл}^н$ – статические моменты сопротивления верхней и нижней частей сечения относительно пластической нейтральной оси, мм³.

Результаты эксперимента приведены в Таблице 3.11, причем указаны средние значения для пяти образцов для каждого размера когтя шайбы.

Таблица 3.11. Результаты определения коэффициента упрочнения металла n при холодной штамповке.

h , мм	Результат эксперимента			Результат расчета по формулам (2.51-2.53)			n
	P_{max} , Н	s_d , мм	M , Н·м	σ , МПа	W , мм ³	$M_{пл}$, Н·м	
6 (для $d=50$ мм)	722	2	1444	390	3	1170	1,234
11.5 (для $d=95$ мм)	1359	3,833	5209,5		10,935	4264,65	1,222
15 (для $d=117$ мм)	1734	5	8670		16,875	6581,25	1,317
Среднее							1,258

В ходе испытаний стали соединителей с округлением по ГОСТ 1497-84 было выяснено, что предел текучести $\sigma_{тек}$ для когтевых шайб составил 390 МПа, для нагелей 620 МПа, модуль упругости E принят 203000 МПа для когтевых шайб и $E = 208000$ МПа для нагелей. Так же был получен коэффициент упрочнения стали при холодной штамповке n определенный из испытаний, принимаемый $n=1,258$. Полученные данные используются, в дальнейшем, для решения уравнений (2.31), (2.37).

3.4. Приведение параметров к расчетным значениям

В результате экспериментальных исследований определены необходимые для расчётов характеристики материалов.

Для стали когтевой шайбы расчетное сопротивление изгибу принимается $R_u = \sigma_i \cdot n = 390 \cdot 1,258 = 490,62$ МПа, модуль упругости принимается $E = 203000$ МПа.

Для стального нагеля расчетное сопротивление изгибу принимается $R_u = 280$ МПа, модуль упругости принимается $E = 208000$ МПа.

Средние временные сопротивления LVL и коэффициентов постели при различных углах приложения нагрузки и форм штампов представлены в Таблице 3.12

Таблица 3.12. Средние временные сопротивления LVL и коэффициентов постели при различных углах приложения нагрузки и форм штампов.

Направление приложения нагрузки	Для когтя шайбы	Для нагеля
Вдоль волокон	$R_{см}^{вр,0} = (-0,005h + 0,993)R_{сж,0};$ $C^{вр,0} = (-0,016h + 3,103) R_{сж,0}$	$R_{см}^{вр,0} = (-0,051d + 1,483)R_{сж,0};$ $C^{вр,0} = (-0,032d + 1,028) R_{сж,0}$
Поперек волокон	$R_{см}^{вр,90} = (-0,054h + 2,993)R_{сж,90};$ $C^{вр,90} = (-0,216h + 5,774) R_{сж,90}$	$R_{см}^{вр,90} = (-0,109d + 3,29)R_{сж,90};$ $C^{вр,90} = (-0,092d + 2,128) R_{сж,90}$
Под углом α к волокнам	$R_{см,\alpha}^{вр} = \frac{R_{см,0}^{вр}}{1 + \left(\frac{R_{см,0}^{вр}}{R_{см,90}^{вр}} - 1\right) \sin^2 \alpha};$ $C_{см,\alpha}^{вр} = \frac{C_{см,0}^{вр}}{1 + \left(\frac{C_{см,0}^{вр}}{C_{см,90}^{вр}} - 1\right) \sin^2 \alpha}$	

Здесь $R_{сж}^{вр,0}$ – среднее значение временных сопротивлений LVL сжатию вдоль волокон при влажности 12%, принимаемое 57,04 МПа из испытаний;

$R_{сж}^{вр,90}$ – среднее значение временных сопротивлений LVL сжатию поперек волокон при влажности 12%, принимаемое 10,60 МПа из испытаний;

α – угол по отношению к нормали сминающей стороны когтя и направление волокон, градус;

h – высота когтя шайбы, мм;

d – диаметр нагеля, мм.

Переход к расчетным характеристикам длительной прочности $R_{дл,\alpha}$ и нормативным значениям коэффициента постели C_{α}^H может быть выполнен следующим образом:

$$R_{дл,\alpha} = R_{вр,\alpha} (1 - 2,33\nu)m_{дл}; \quad (3.28)$$

$$C_{\alpha}^H = C_{вр,\alpha} (1 - 1,65\nu)m_{дл}; \quad (3.29)$$

где ν – коэффициент вариации сопротивления древесины при местном смятии;

$m_{дл}$ – коэффициент учета длительности загрузки.

Данные прочностные и жесткостные характеристики материалов используются для расчета соединений деревянных конструкций из LVL с когтевыми шайбами.

3.5. Выводы по главе

1. Определена временная прочность материала *LVL* для влажности $W=12\%$ вдоль волокон $R_{сж.вп.0}=57,04$ МПа, прочность на сжатие поперек волокон $R_{сж.вп.90}=10,60$ МПа, модуль упругости $E=14000$ МПа.

2. Разработана методика определения взаимосвязи между пределами прочности *LVL* при сжатии $R_{сж.α}$ и коэффициентами постели $C_α$ при смятии штампами треугольных и цилиндрических форм, и габаритами штампов.

3. Подтверждена гипотеза о влиянии габаритов штампа на величину предела прочности *LVL* и коэффициент постели. Найдена взаимосвязь между пределами прочности *LVL* при сжатии $R_{сж.α}$ и коэффициентами постели $C_α$ при смятии штампами треугольных и цилиндрических форм, а также размерами h и d штампов. При увеличении габаритов штампа, происходит снижение прочности на сжатие $R_{сж.α}$ штампом и уменьшается коэффициент постели $C_α$ для любого направления волокон.

4. Получены кривые ползучести и найдено ядро мгновенного деформирования $K_0(t)$ отражающее характер ползучести материала *LVL* при воздействии цилиндрическим и треугольным штампом при длительной нагрузке. Установлено, и количественно выявлено изменение влажности W на ползучесть материала *LVL*.

5. Получены значения прочностных и жесткостных характеристик материалов. Для стали когтевой шайбы расчетное сопротивление изгибу $R_u=490,62$ МПа, модуль упругости $E = 203000$ МПа. Для стали нагеля расчетное сопротивление изгибу $R_u = 280$ МПа, модуль упругости $E = 208000$ МПа. Коэффициент упрочнения стали при холодной штамповке n был определен из испытаний и принят $n=1,258$.

Глава 4. Исследование НДС соединений и конструкций из однонаправленного клееного бруса LVL с когтевыми шайбами

Проведение испытаний соединений с использованием когтевых шайб обусловлено необходимостью апробации предлагаемой методики расчета, путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных.

4.1. Действие на соединение осевого усилия

Определение воздействия на соединение осевого усилия должно проводиться для соединений фиксированных толщин, а также необходимо определить зависимости НДС соединений от изменения толщин элементов LVL.

4.1.1 Исследование соединений фиксированной толщины элементов

В поясах конструкций часто встречаются соединения, подверженные только растягивающему или сжимающему усилиям. Если же изгибающий момент и поперечное усилие незначительны, ими можно пренебречь.

Для изучения воздействия на соединение продольного усилия ранее проводились исследования [117]. Испытания учитывали влияние сдвигающего усилия для разных диаметров когтевых шайб и нагелей. Экспериментальные исследования проводились с двусрезными соединениями с установленной парой когтевых шайб, одним нагелем с гайками и без. Постановка одного нагеля обоснована возможным попаданием нагелей в различные слои древесины по прочности, что может повлечь получение различных деформации нагеля при одном и том же среднем значении деформации древесины.

Для исследования влияния продольного усилия на соединение с элементами из LVL производилось несколько серий испытаний двусрезных соединений. Характеристики образцов и условий испытаний приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1. Характеристики проводимых испытаний.

Характеристика соединения	Номер подгруппы испытаний:		
	1	2	3
Для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 0^\circ$			
Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш.}$, мм	50	95	117
Диаметр нагеля $d_{н.}$, мм	12	16	20
Толщина элементов t , мм	45	45	45
Для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 90^\circ$			
Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш.}$, мм	50	95	117
Диаметр нагеля $d_{н.}$, мм	12	16	20
Толщина элементов t , мм	45	45	45

Размеры образцов и их форма приняты с учетом конструктивных требований к соединениям деревянных элементов с использованием когтевых шайб и нагелей. Образцы выполнялись двусрезными с учетом требований [89, 90, 92, 125]. Соединения собраны с установкой одного нагеля в образце для удобства сопоставления с результатами проводимых ранее экспериментов.

При изготовлении образцов соединений применялся брус *LVL Ultralam* [93] толщиной 45 мм. В качестве когтевых шайб были установлены двухсторонние зубчато-кольцевые пластины типа *C1* [124], диаметрами 50, 95 и 117 мм производства компании *Simpson*. В качестве нагелей применялись гладкие стальные шпильки диаметрами 12, 16 и 20 мм по ГОСТ 9066-75 с резьбой по концам с гайками и усиленными шайбами. Размеры образцов представлены на Рисунках 4.1-4.3.

Серия №1 испытывалась при действии нагрузки вдоль волокон для всех элементов. Всего испытывалось 9 образцов (3 повторения для 3-х типов испытаний). Серия №2 испытана при действии нагрузки на средний элемент, повернутый на угол $\alpha = 90^\circ$ к направлению волокон крайних элементов. Толщина элементов *LVL* принята $t = 45$ мм. Испытывались 9 образцов (3 повторения для 3-х типов испытаний).

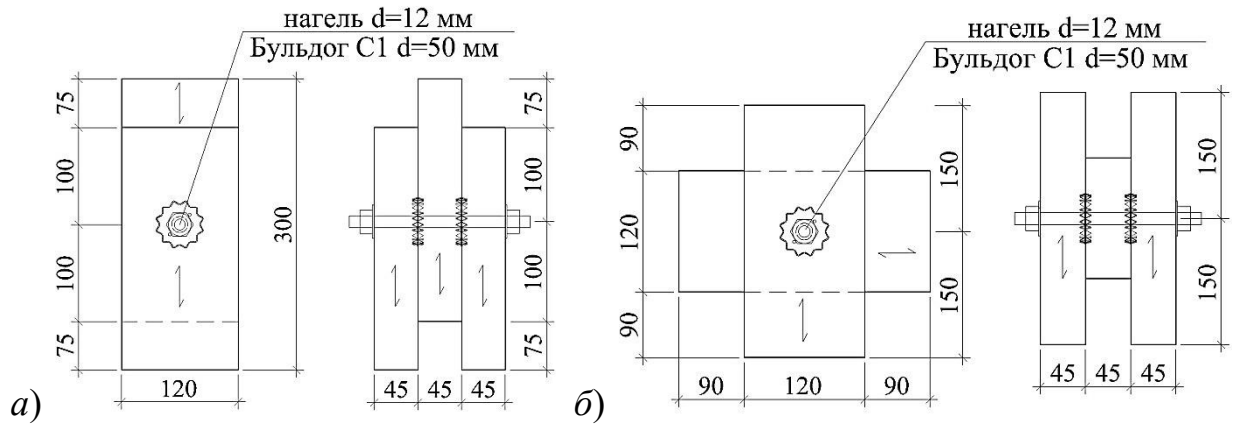


Рисунок 4.1. Геометрические характеристики образцов 1 типа испытаний для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов: а) $\alpha = 0^\circ$, б) $\alpha = 90^\circ$.

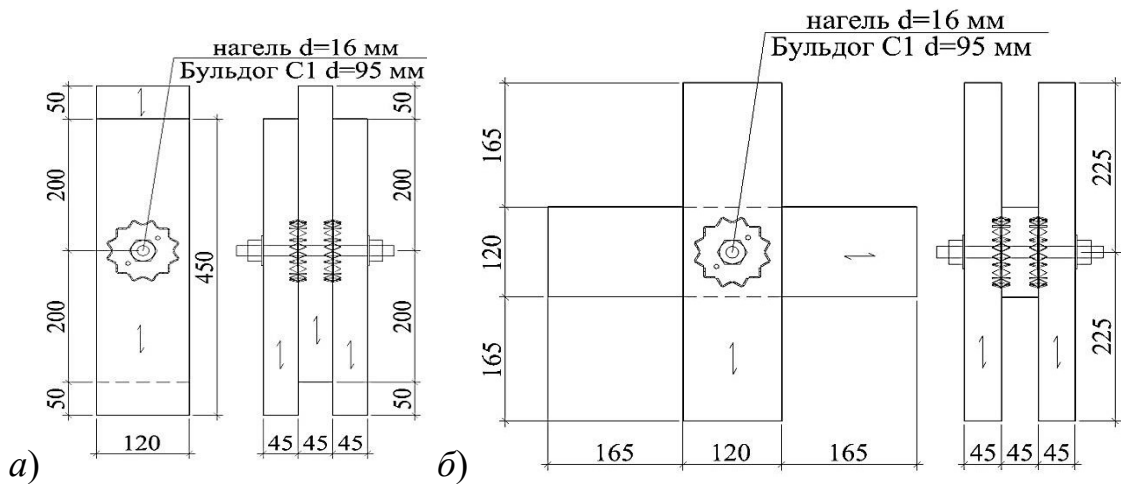


Рисунок 4.2. Геометрические характеристики образцов 2 типа испытаний для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов: а) $\alpha = 0^\circ$, б) $\alpha = 90^\circ$.

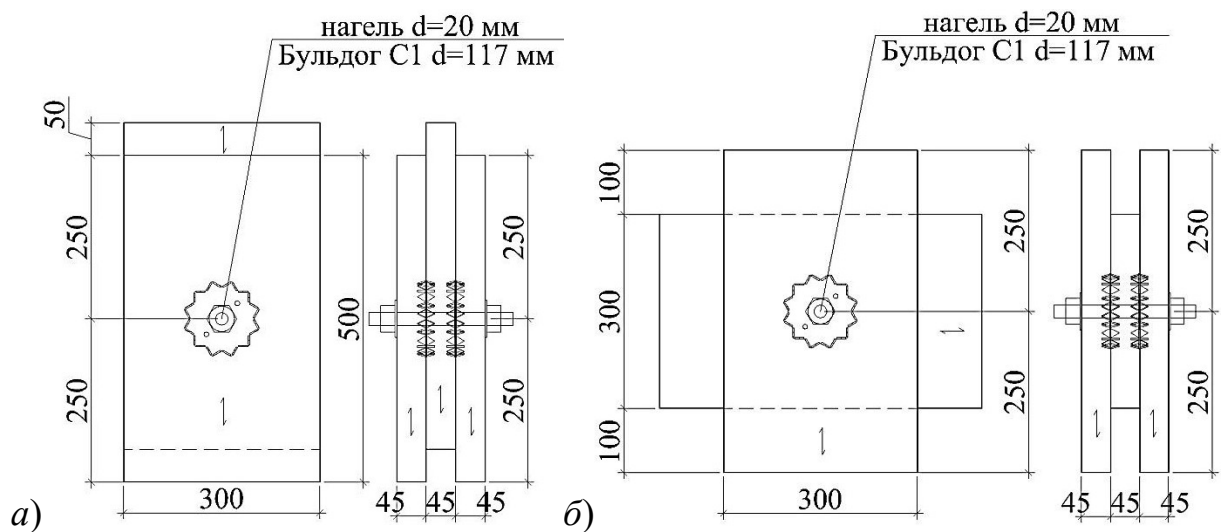


Рисунок 4.3. Геометрические характеристики образцов 3 типа испытаний для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов: а) $\alpha = 0^\circ$, б) $\alpha = 90^\circ$.

До проведения испытаний к образцам закреплялись пластины, препятствующие повороту элементов относительно друг друга. Для измерения деформаций к образцам с противоположных сторон прикреплялись индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Крепление индикаторов к древесине производилось при помощи шурупов. Для измерения вертикального смещения среднего элемента относительно крайних индикаторы устанавливались так, чтобы под нагрузкой они выдвигались из корпуса, что исключило возможность повреждения датчиков и появлялась возможность не снимать датчики на образце до конца испытаний.

Проведение экспериментальных исследований проводилось согласно существующим рекомендациям по испытаниям [73]. Передача нагрузки для образцов на сжатие вдоль волокон осуществлялась на средний элемент через распределительную пластину. При проведении испытаний образцов на сжатие поперек волокон нагрузка подавалась через стальную призму, установленную под рабочим органом испытательной машины на средний элемент образца. Процесс испытания представлен на Рисунках 4.4-4.5.

Испытания на сжатие проводились ступенчато, с постоянной ступенью загрузки, которая определена в ходе пробных экспериментов и принята как 0,1 единица от максимального разрушающего значения N_d . До приложения первоначальной ступени нагрузки записывались начальные показания индикаторов перемещений. Нагрузка передавалась универсальной испытательной машиной *Instron 5989*. После каждой ступени загрузки производилась разгрузка до значения, равного 0,1 N_d . При достижении каждой ступени нагрузка выдерживалась в течении 30 секунд и с индикаторов снимались показания смещений. После окончания испытаний индикаторы демонтировались и производилась полная разборка образцов. После испытаний из элементов вырезались образцы для определения физико-механических свойств материала, при этом влажность составила $W = 12,1 \%$, прочность на сжатие вдоль волокон

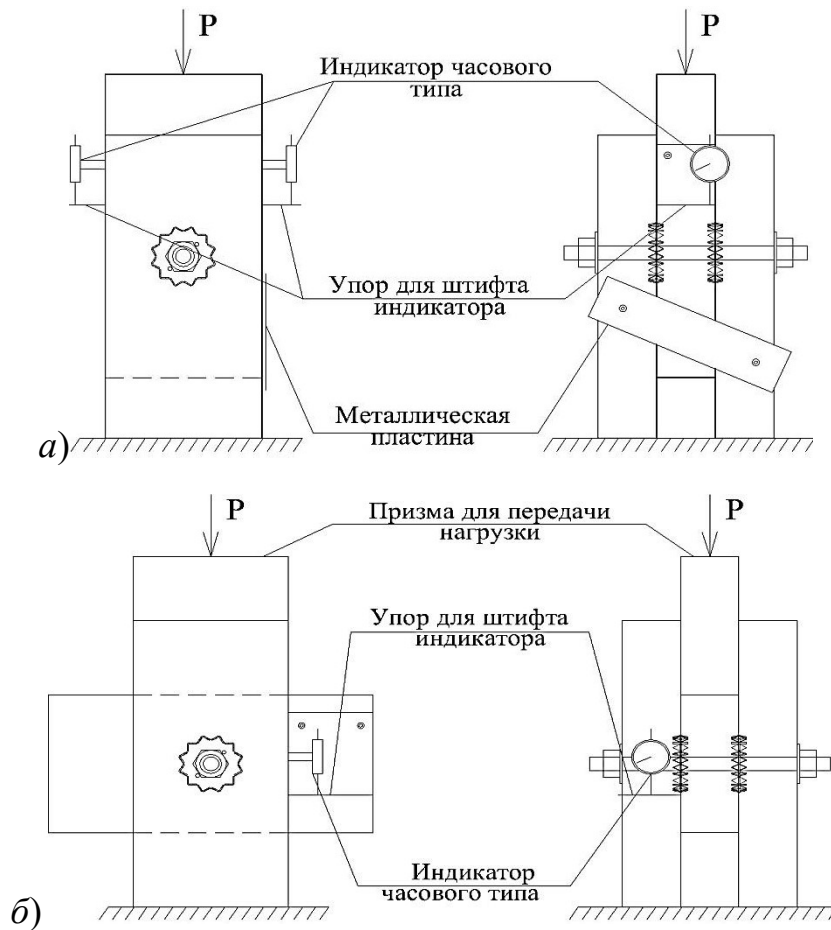


Рисунок 4.4. Схема проведения испытаний на сжатие для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов: а) $\alpha = 0^\circ$, б) $\alpha = 90^\circ$.

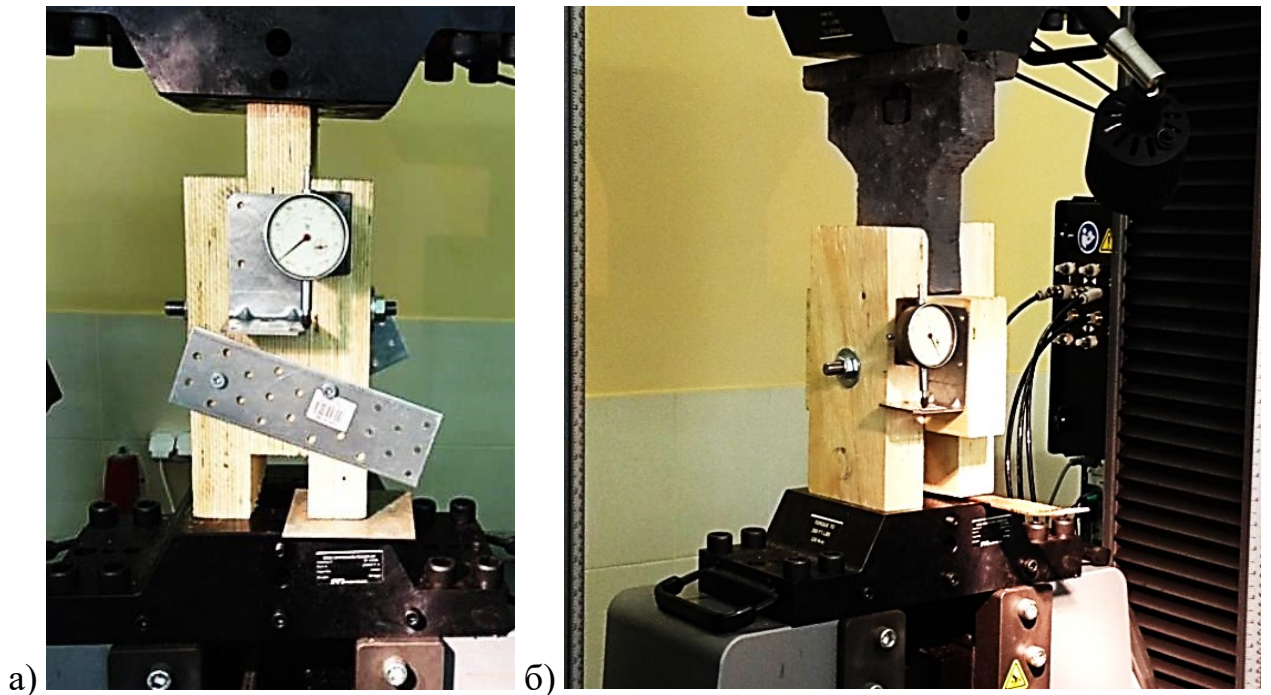


Рисунок 4.5. Испытание образцов на сжатие для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов а) $\alpha = 0^\circ$, б) $\alpha = 90^\circ$.

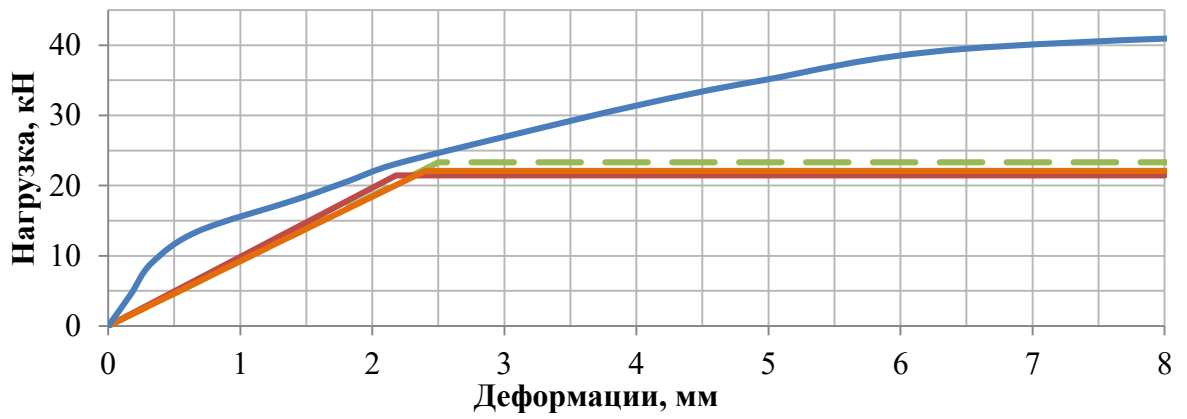
$R_{сж} = 56,3$ МПа. По результатам испытаний были построены кривые зависимости смещения от прикладываемой нагрузки, представленные на Рисунке 4.7. Так же на этих графиках приведены значения расчетной несущей способности, посчитанные с применением предлагаемой методики расчета и используя методики расчета СтАДД 3.2 – 2011 и *EuroCode 5* [92, 125]. Методики расчета, предлагаемые в данной работе подразумевают ограничение нагрузки, исходя из условий (2.21-2.22).

Результаты расчетов из условия достижения предельного смещения равного 2 мм представлены на Рисунках 4.6, 4.7 как линия «1», результаты при достижении напряжений смятия в древесине обозначены как линия «2». Из графиков видно, что линия «2» повторяет характер изменения экспериментальных кривых деформирования достаточно адекватно, что обосновывает рассмотрение результатов расчетов с использованием всех ограничительных условий (2.21-2.22) совместно друг с другом.

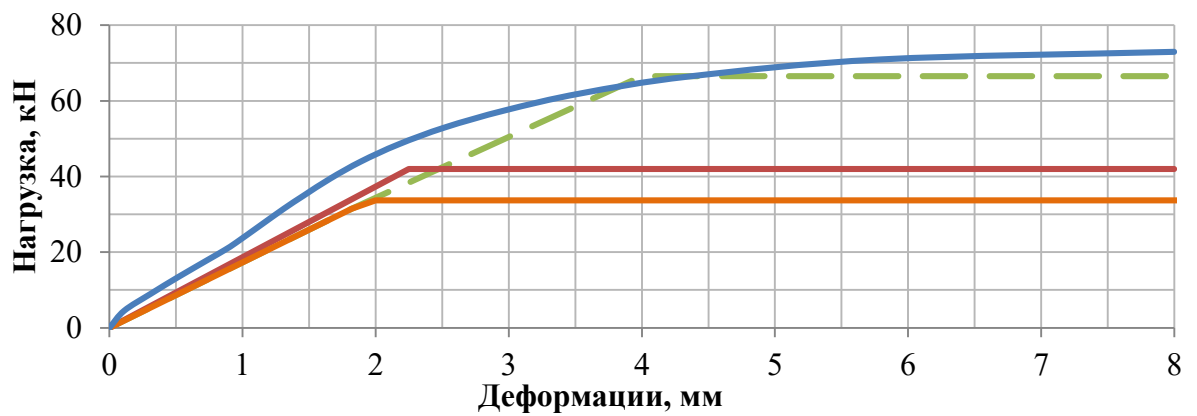
Результаты определения максимальных $N_{разруш.}$ для теории и эксперимента приведен в таблице 4.2. Средняя разница в результатах составила 14%.

Таблица 4.2. Линейная жесткость испытанных соединений

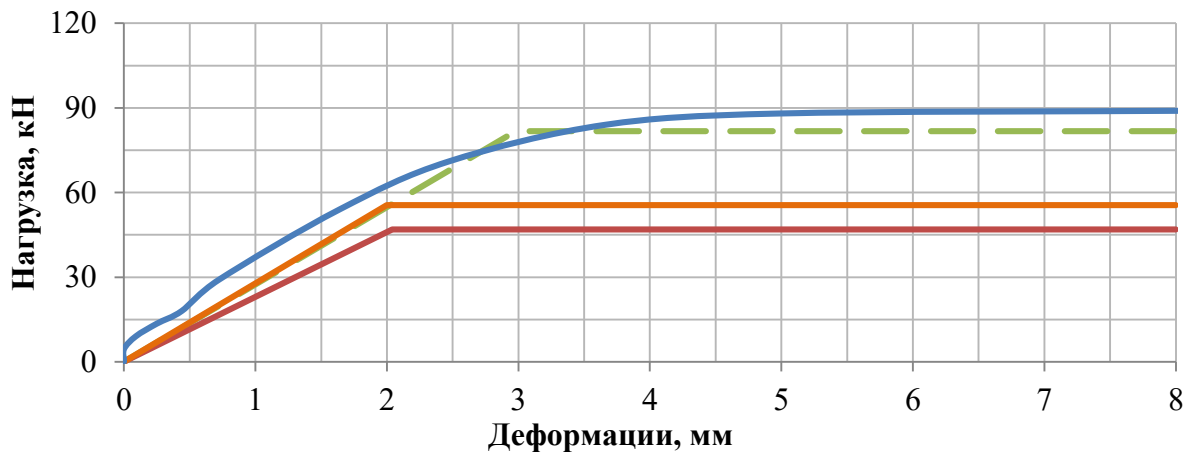
Угол приложения нагрузки к волокнам α , град.	Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш.}$, мм	Диаметр нагеля, $d_{наг.}$, мм.	Экспериментальные значения $N_{разруш.}$, кН	Теоретические значения $N_{разруш.}$, кН	Отклонение теоретических и экспериментальных значений
0	50	12	39,55	23,35	40,96%
	95	16	71,61	66,5	7,14%
	117	20	88,20	81,78	7,28%
90	50	12	31,53	24,95	20,87%
	95	16	71,31	62,75	12,00%
	117	20	78	83,95	-7,63%



а)

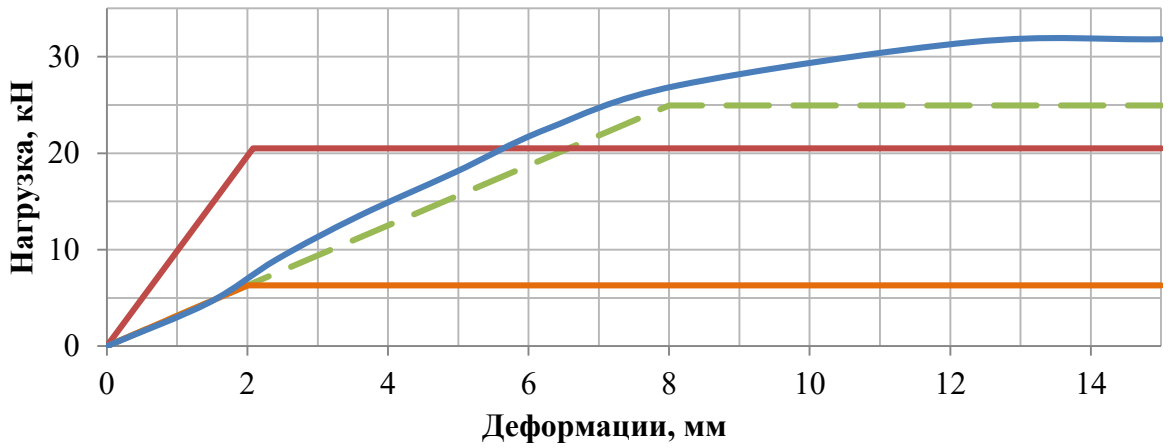


б)

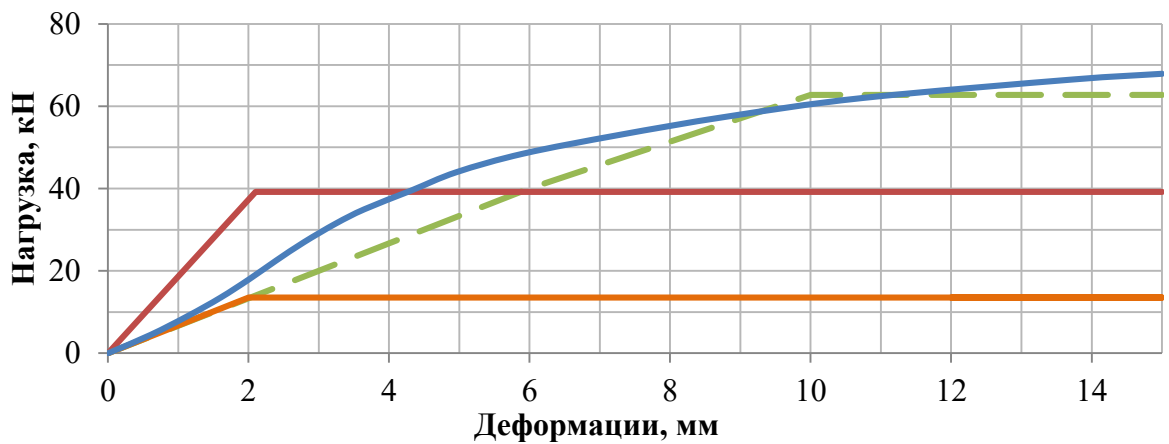


в)
 1 Экспериментальные значения
 2 Значения вычисленные по СТАДДЗ.2

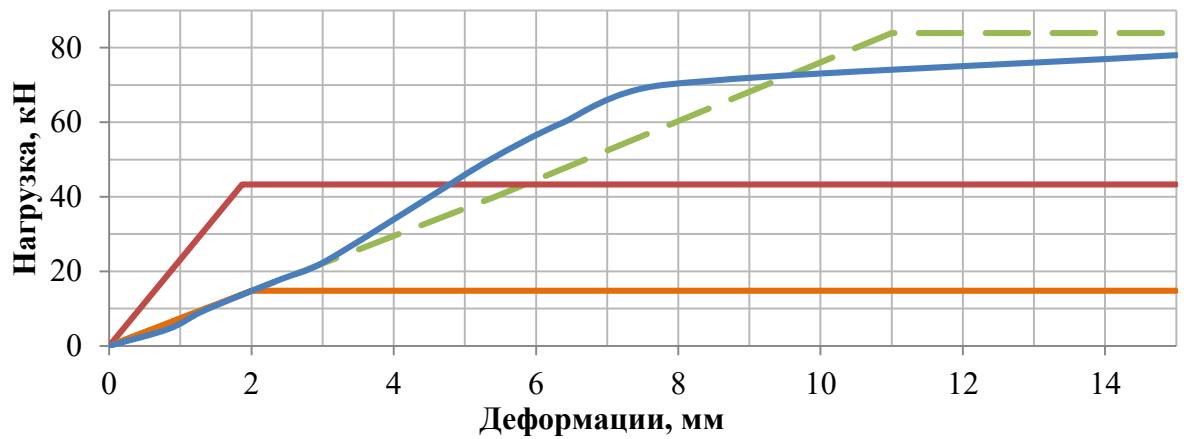
Рисунок 4.6. Теоретические и экспериментальные диаграммы деформирования для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 0^\circ$, при диаметре когтевой шайбы $d_{к.ш.}$ и диаметре нагеля d_n : а) $d_{к.ш.} = 50$ мм, $d_n = 12$ мм, б) $d_{к.ш.} = 95$ мм, $d_n = 16$ мм, в) $d_{к.ш.} = 117$ мм, $d_n = 20$ мм.



а)



б)



в) — 1 — Экспериментальные значения
 — 2 — Значения, вычисленные по СтАДДЗ.2

Рисунок 4.7. Теоретические и экспериментальные диаграммы деформирования для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 90^\circ$, при диаметре когтевой шайбы $d_{к.ш.}$ и диаметре нагеля d_n : а) $d_{к.ш.} = 50$ мм, $d_n = 12$ мм, б) $d_{к.ш.} = 95$ мм, $d_n = 16$ мм, в) $d_{к.ш.} = 117$ мм, $d_n = 20$ мм.

Анализируя результаты экспериментальных исследований (Рисунок 4.6, 4.7) было определено значительное снижение величины отношения экспериментальной и расчетной теоретической нагрузки $N_{I-II \text{ эксп.}} / N_{I-II \text{ теор.}}$, из чего можно сделать вывод о влиянии фактора толщины на исследуемые параметры прочности соединений с когтевыми шайбами. Это может быть объяснено тем фактом, что при прорезании волокон когтями шайбы возникает некоторое ослабление соединения, которое влечет снижение несущей способности соединения. Для деревянных элементов значение минимальных возможных толщин элементов нормируется, как $t_{min} = 2,25 h_e$, где за h_e принимается высота когтя шайбы в существующих методиках проектирования когтевых шайб [92, 125]. При этом указывается, что заметного изменения несущей способности когтевой шайбы не будет происходить при увеличении толщины элементов при $t_{min} \geq 5 h_e$. Предлагаемая методика расчета соединений на когтевых шайбах в данной работе учитывает снижение несущей способности когтевой шайбы при изменении толщин элементов соединения в пределах толщин при $t < 5 h_e$.

В ходе анализа результатов теоретических расчетов были определены значения линейной жесткости K для узлов с разными значениями диаметра нагеля и когтевой шайбы и фиксированной толщине элементов LVL (45 мм) при действии нагрузки вдоль и поперек волокон и приведены в Таблице 4.3. Данные значения определялись в зоне упругих деформаций и используются в предлагаемой методике для определения перемещений элементов узлов.

Для апробации предлагаемой методики определения жесткостных характеристик нагельных соединений конструкций из LVL с когтевыми шайбами требуется сопоставить полученные значения для испытанных узлов и значений, рассчитанных по предлагаемой методике. Для этого были определены жесткости для различных вариантов использования диаметров нагелей (12, 16, 20 мм) и когтевых шайб (50, 75, 117 мм).

Линейная жесткость нагельных соединениях с когтевыми шайбами в LVL для значений из выбранного диапазона (0 – 90 град.) может быть найдена интерполированием зависимостей линейной жесткости K от факторов

находящихся в промежуточных значениях диаметров нагелей $d_{\text{наг}}$, диаметров когтевых шайб $d_{\text{к.ш.}}$ или промежуточных значений угла действия нагрузки по отношению к волокнам α . Результаты определения жесткости соединений приведены на рисунках 4.8.1-4.8.3. и в Таблице 4.3

Таблица 4.3. Линейная жесткость испытанных соединений

Угол приложения нагрузки к волокнам α , град.	Диаметр когтевой шайбы $d_{\text{к.ш.}}$, мм	Диаметр нагеля, $d_{\text{наг}}$, мм.	Факт. жесткость K , кН/мм	Теор. жесткость K , кН/мм	$\left(\frac{K_{\text{факт}}}{K_{\text{теор}}} - 1\right) 100\%$
0	50	12	11,2	10	12,0%
	95	16	18,5	16,43	12,6%
	117	20	24,15	20,19	19,6%
90	50	12	1,89	1,78	6,2%
	95	16	2,85	3,34	-14,7%
	117	20	4,91	4,45	10,3%

Из таблицы 4.3 видно, что теоретические и экспериментальные значения близки друг к другу (средняя разница значений составляет 12%), что характеризует предлагаемую методику, как корректную для рассматриваемого диапазона значений.

Данная методика позволяет рассчитать теоретические значения линейной жесткости для более широкого диапазона геометрических параметров соединений - различных соотношений диаметра нагеля, диаметра когтевой шайбы, угла приложения нагрузки к волокнам. Результаты данных вычислений представлены на рисунках 4.8.1-4.8.3, и используются для вычисления смещений элементов соединений в конструкциях из *LVL* с когтевыми шайбами. При необходимости выполнения расчета к узлам конструкции назначаются жесткости соединения в соответствии с углом приложения нагрузки и габаритами элементов соединений, что позволяет рассчитать деформации конструкции с учетом смещений в узлах.

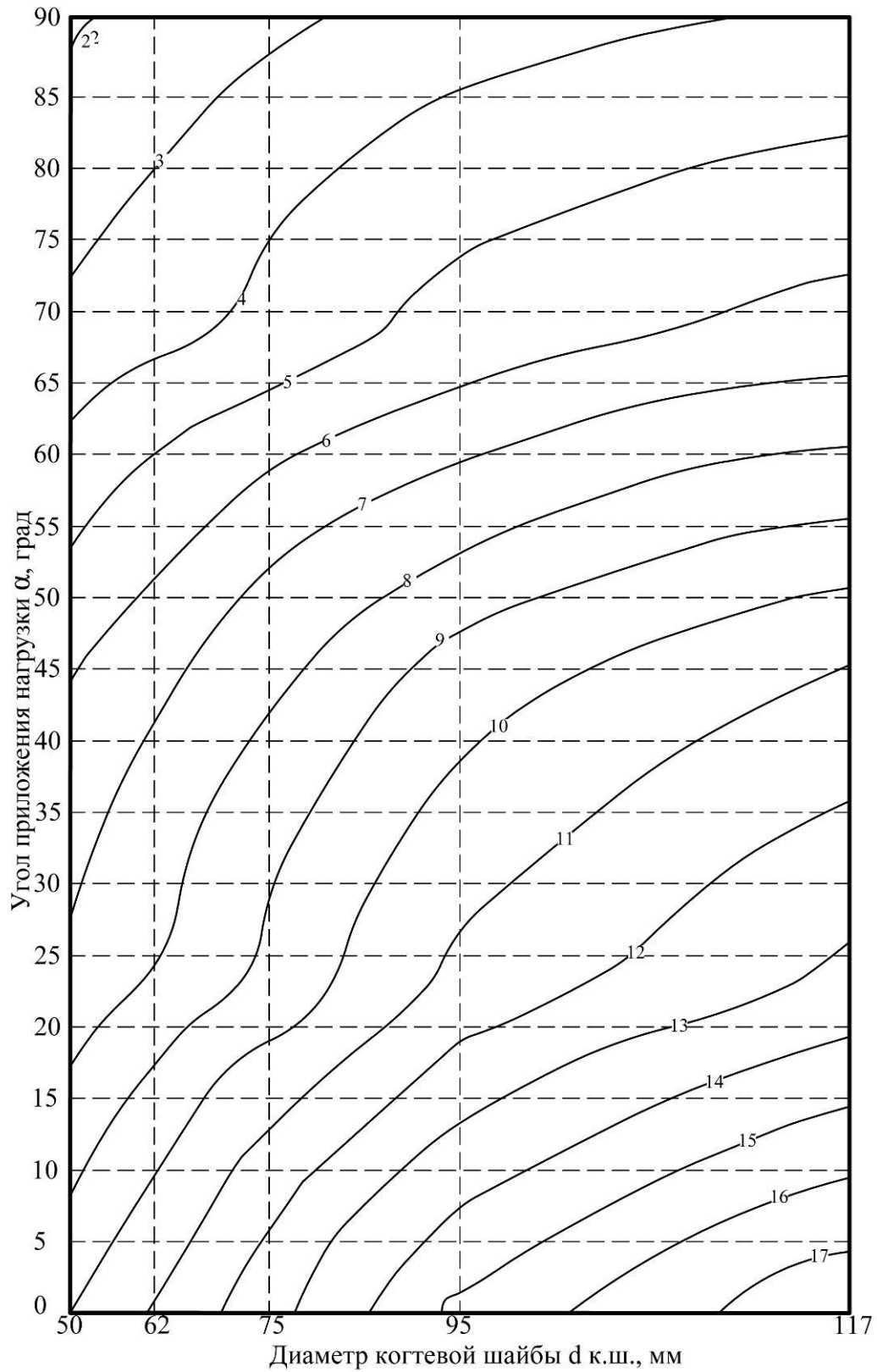


Рисунок 4.8.1. Теоретическая зависимость жесткости K для нагельных соединений с когтевыми шайбами в LVL при диаметре нагеля $d_{\text{наг}}$ 12 мм, на 1 уловный срез соединения, кН/мм.

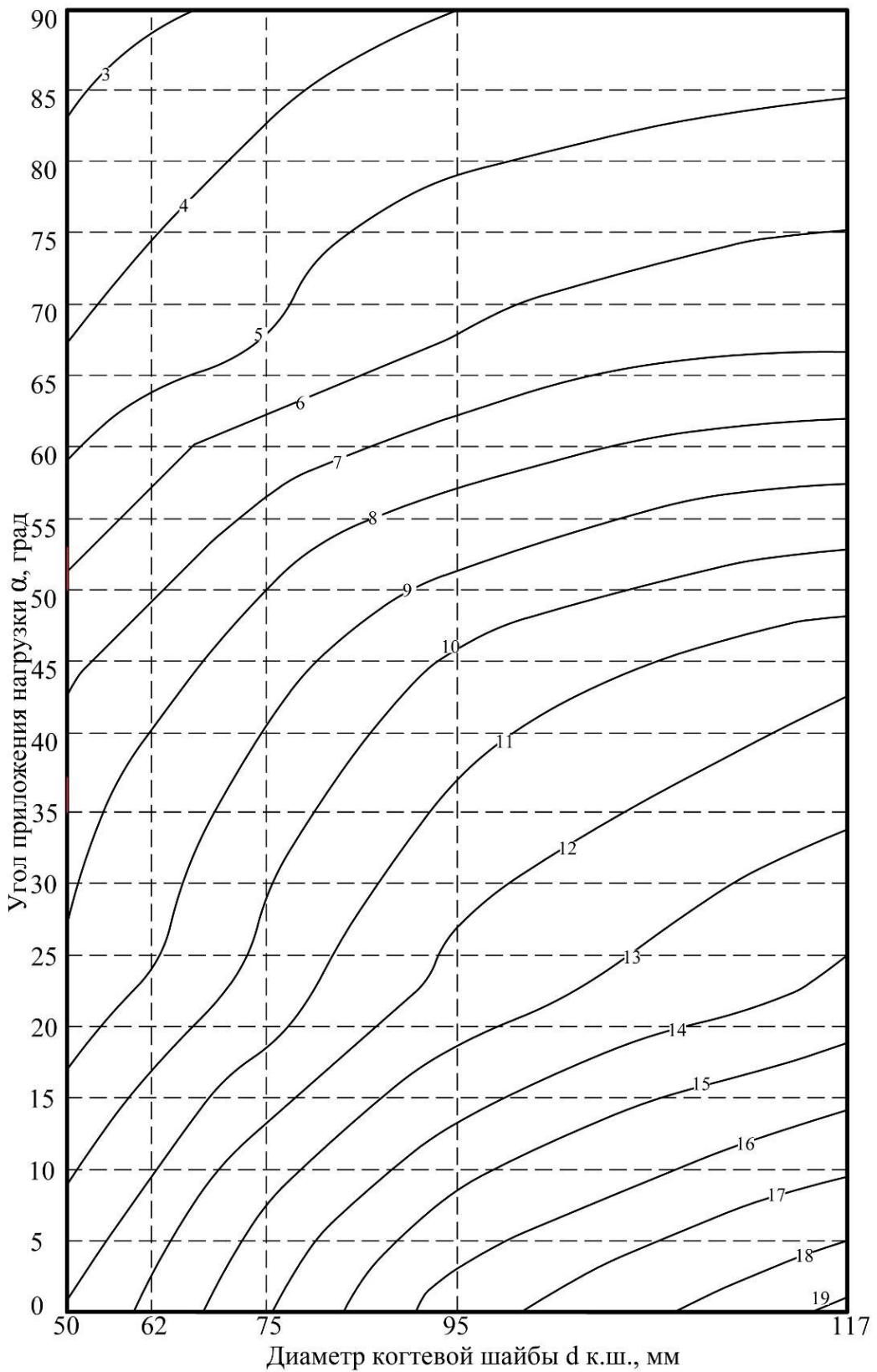


Рисунок 4.8.2. Теоретическая зависимость жесткости K для нагельных соединений с когтевыми шайбами в *LVL* при диаметре нагеля $d_{\text{наг}}$ 16 мм на 1 уловный срез соединения, кН/мм.

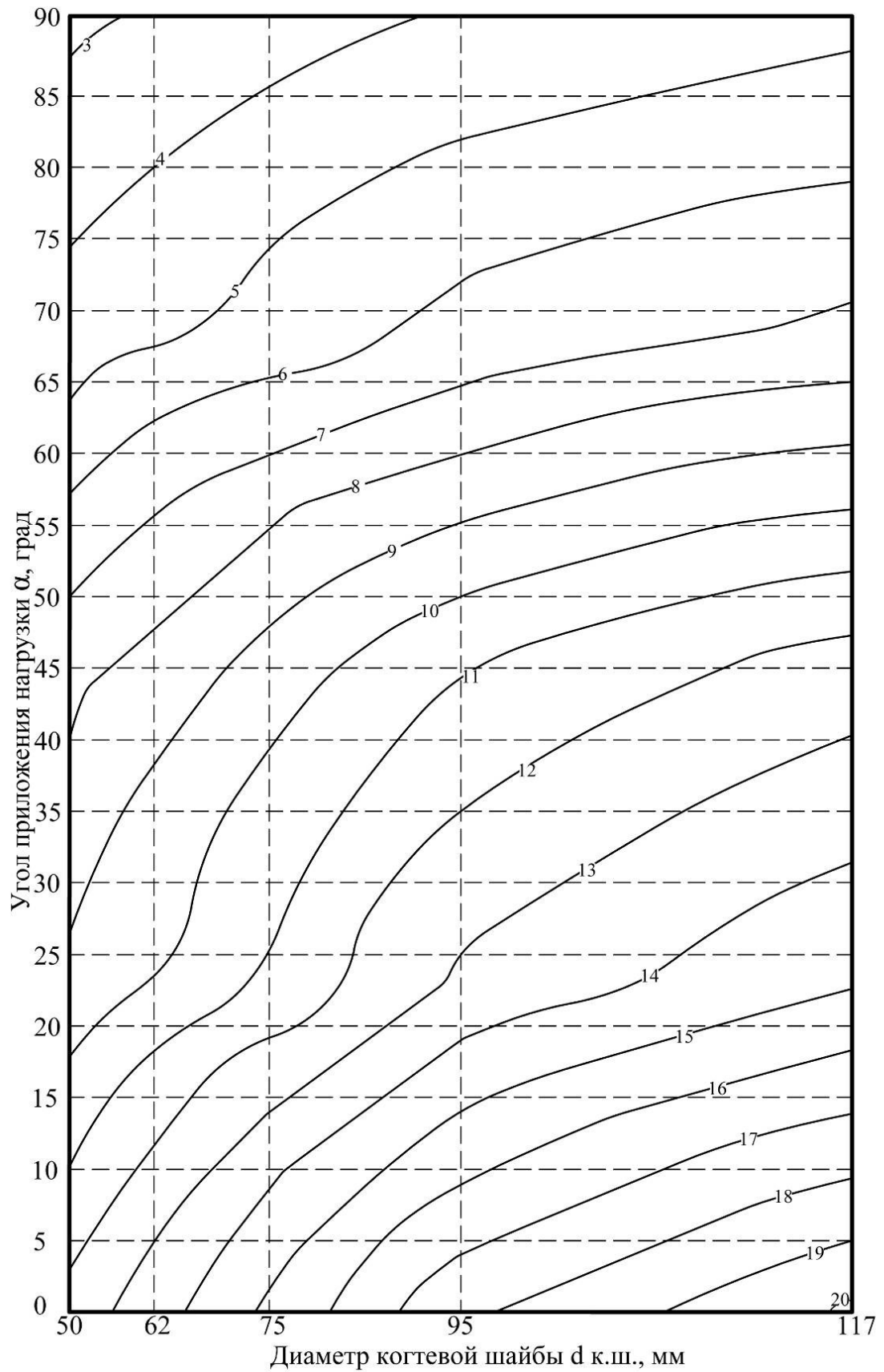


Рисунок 4.8.3. Теоретическая зависимость жесткости K для нагельных соединений с когтевыми шайбами в *LVL* при диаметре нагеля $d_{\text{наг}}$ 20 мм на 1 уловный срез соединения, кН/мм.

4.1.2 Исследование зависимости НДС соединений от изменения толщин элементов LVL

Для изучения воздействия толщин элементов *LVL* на прочность соединений с когтевыми шайбами были произведены испытания по определению прочности соединений при изменяемой толщине элементов и фиксированном диаметре когтевой шайбы и нагеля для определения необходимости эмпирической корректировки полученных результатов.

Испытания проводились в две серии с использованием образцов форм и размеров, указанных на Рисунке 4.2 *a* (серия 1) и Рисунке 4.3 *a* (серия 2), но толщина элементов *LVL* принята была принята, для серии 1 как $t = 45$ мм, $t = 63$ мм, $t = 75$ мм, для серии 2 как $t = 36$ мм, $t = 45$ мм, $t = 63$ мм. Было испытано 12 образцов (2 серии по 2 дубликата для 3-х типов толщин). Методика испытаний была выбрана аналогичной воздействию на соединение продольного усилия. Результаты испытаний приведены на Рисунках 4.9-4.11. Параметры испытаний для оценки влияния толщин на несущую способность приведены в Таблице 4.4.

Таблица 4.4. Параметры испытаний для оценки влияния толщин на несущую способность

Испытания			Толщины элементов t , мм		
№ серии	$d_{к.ш.}$, мм	$d_{н.}$, мм			
1	117	20	45	63	75
2	95	16	36	45	63

По результирующим графикам (Рисунки 4.10-4.11) можно заметить увеличение сходимости результатов теоретических расчетов и экспериментов при увеличении толщин элементов соединения. В качестве корректирующего коэффициента для теоретических значений используется величина k_t , с помощью которой учитывается разница в показаниях расчетной и фактической несущими способностями:

$$k_t = N_{I-II \text{ эксп.}} / N_{I-II \text{ теор.}} \quad (4.3)$$

где k_t – расчетный коэффициент, учитывающий изменение толщин элементов *LVL*

в соединении, N_{I-II} эксп - экспериментальное значение несущей способности в упругой зоне работы соединения, N_{I-II} теор - теоретическое значение несущей способности в упругой зоне работы соединения.

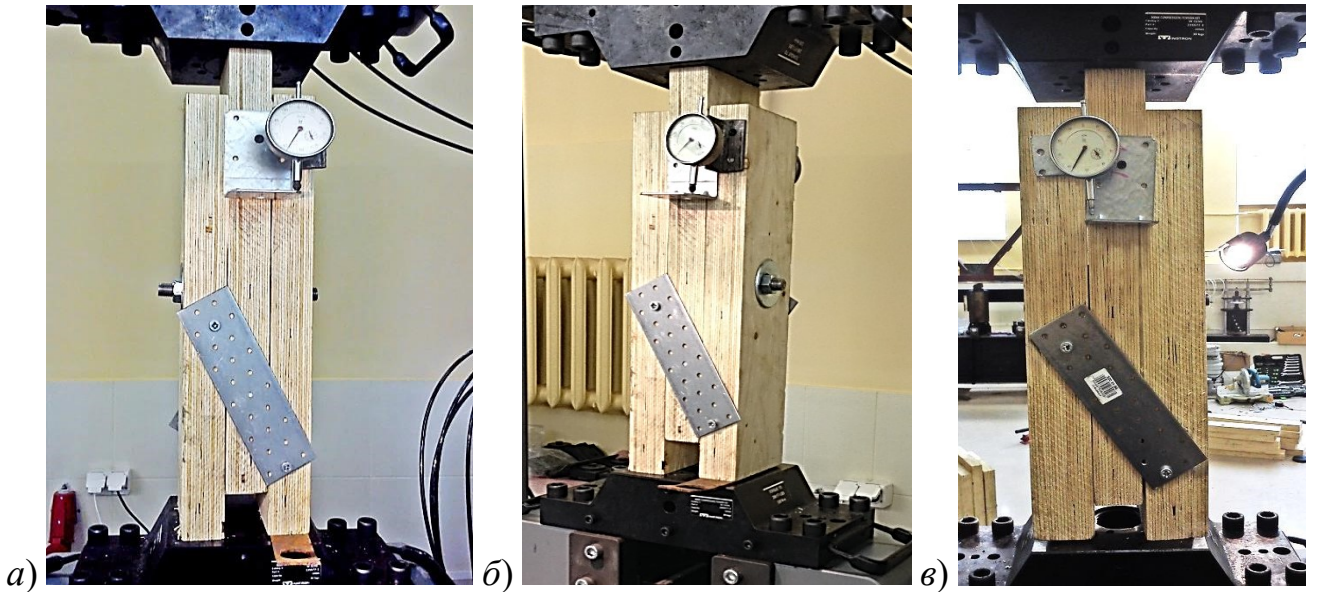


Рисунок 4.9. Образцы серии 2 в период испытаний: а) толщина элементов $t = 36$ мм, б) толщина элементов $t = 45$ мм, в) толщина элементов $t = 63$ мм.

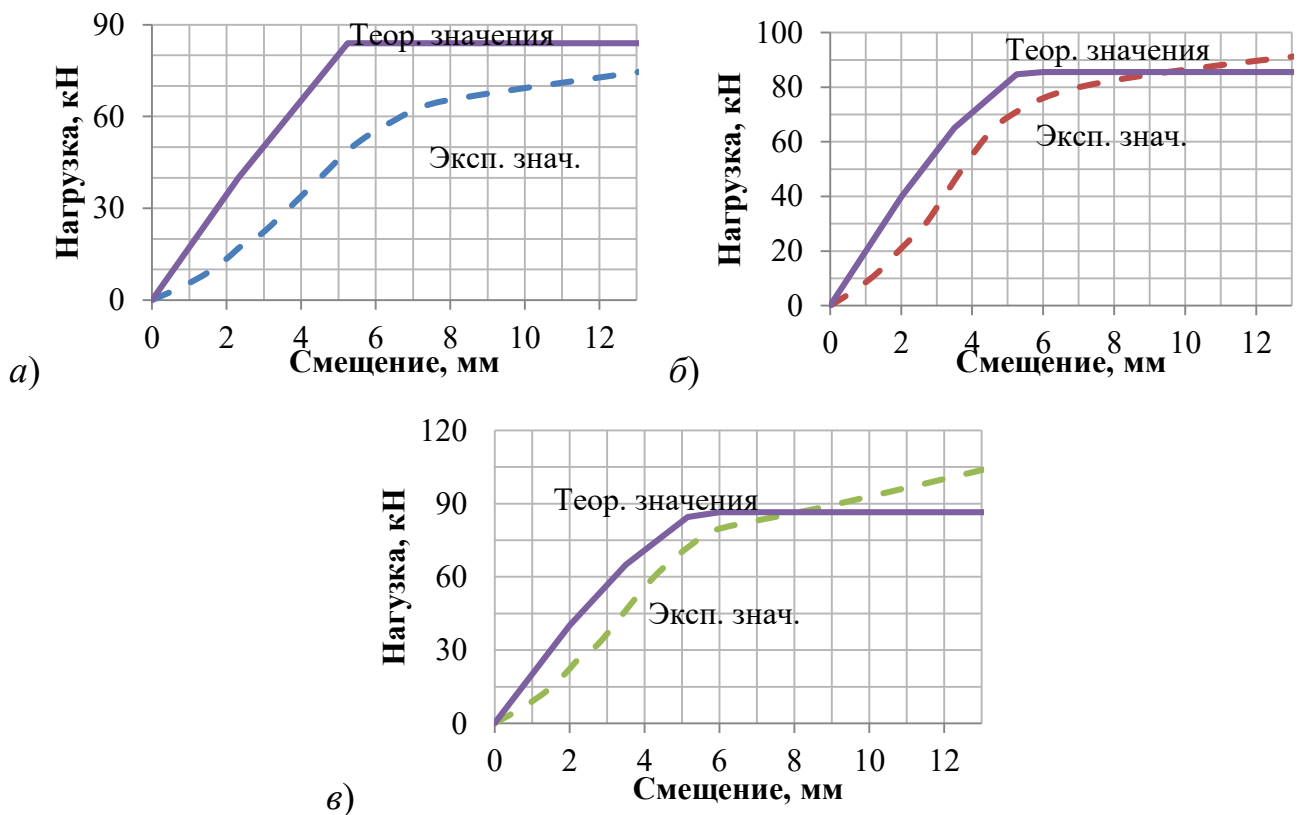


Рисунок 4.10. Результаты испытаний 1 серии: а) толщина элементов $t = 45$ мм, б) толщина элементов $t = 63$ мм, в) толщина элементов $t = 75$ мм.

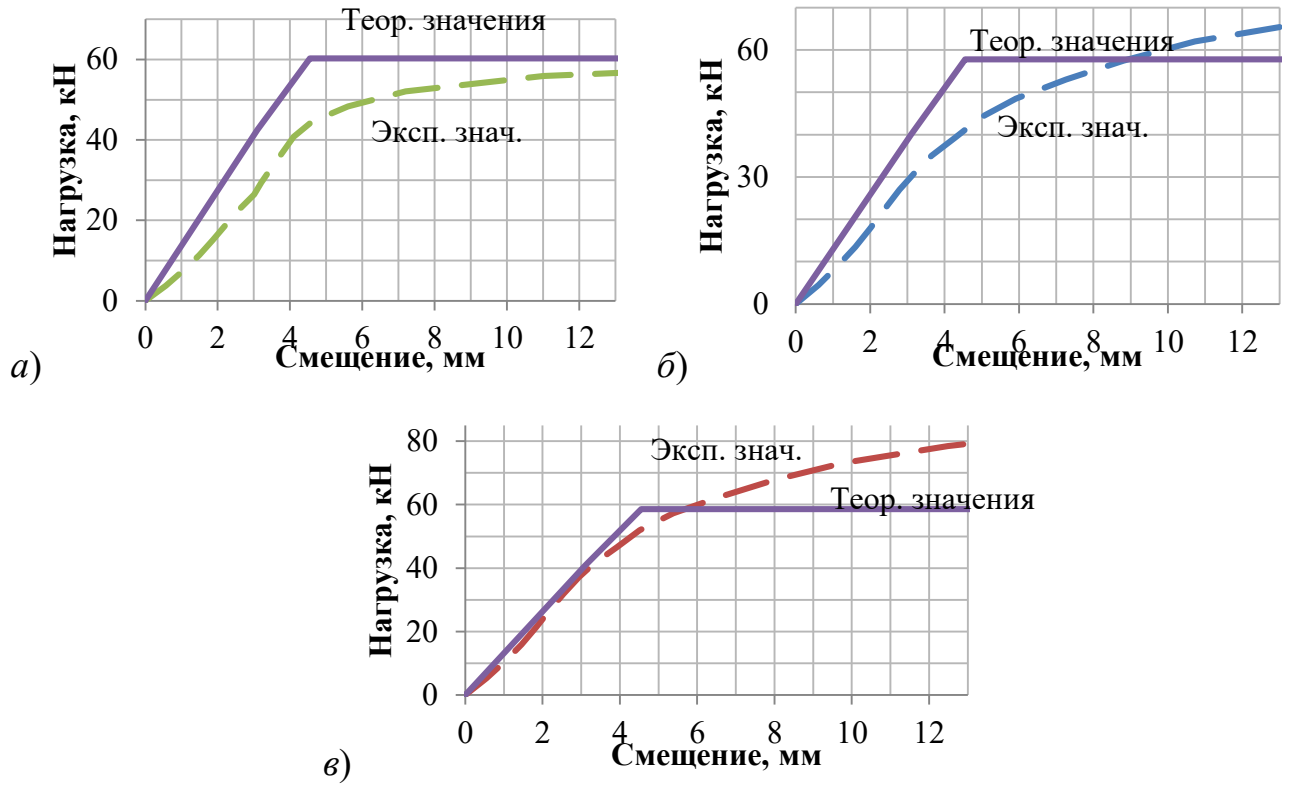


Рисунок 4.11. Результаты испытаний 2 серии: а) толщина элементов $t = 36$ мм, б) толщина элементов $t = 45$ мм, в) толщина элементов $t = 63$ мм.

По результатам эксперимента возможно построение зависимости между значениями отношений t/h_e и $N_{I-II \text{ эксп.}}/N_{I-II \text{ теор.}}$ для двух серий (Рисунок 4.12).

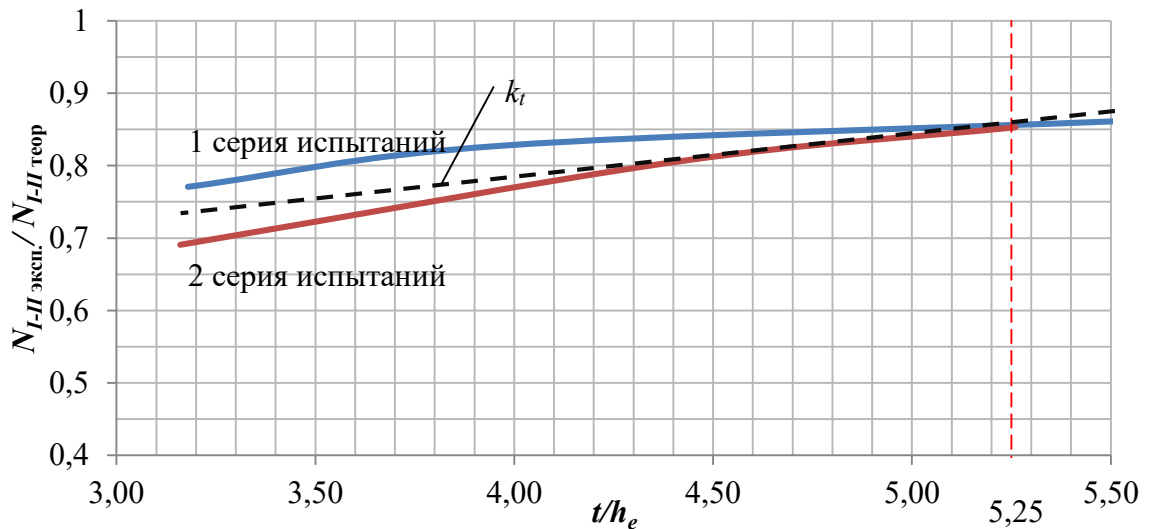


Рисунок 4.12. Зависимость отношений толщины элементов и высоты когтей шайбы t/h_e и теоретических и экспериментальных несущих способностей $N_{I-II \text{ эксп.}}/N_{I-II \text{ теор.}}$

По Рисунку 4.12 для всех испытаний заметна аналогия в распределении величин. Отношение разницы экспериментальных и теоретических значений ближе к единице при увеличении отношения t/h_e до 5,25. При значениях t/h_e более 5,25 значительного изменения разницы между значениями N_{I-II} эксп. и N_{I-II} теор не происходит. Это значит, что при фиксированном диаметре когтевой шайбы и нагеля при толщинах элементов $LVL t_{min} \geq 5,25 h_e$ предлагаемая методика позволяет рассчитывать несущую способность с постоянной достоверностью, а при толщинах лежащих в интервале $3 h_e \leq t_{min} < 5,25 h_e$ постоянство достоверности теоретических значений учитывается коэффициентом k_t . Величину коэффициента k_t можно определить по Рисунку 4.12, как средние величины между показаниями 1 и 2 серии испытаний и аппроксимировать в виде следующего уравнения:

$$k_t = 0,068 \frac{t}{h_e} + 0,51. \quad (4.4)$$

Использование корректирующего коэффициента k_t обосновано при использовании ограничительного условия (2.50) для расчета соединений с когтевыми шайбами.

4.2. Исследование влияния изгибающего момента на НДС нагельного соединения с когтевыми шайбами

Особенности работы соединений при воздействии изгибающего момента в соединении с когтевыми шайбами на сегодняшний момент изучен недостаточно. Для определения влияния изгибающего момента на НДС нагельного соединения с когтевыми шайбами в конструкциях из *LVL* произведены испытания 6 образцов (3 дубликата в 2-х сериях).

Были изготовлены балки пролетом 4 м с двусрезным соединением по центру. Для изготовления деревянных элементов использовался *LVL Ultralam* сечением 300x45 мм (1 серия) и 400x45 мм (2 серия). Элементы были закреплены на 4 гладкие шпильки $d = 12$ мм (1 серия) $d = 14$ мм (2 серия) по ГОСТ 9066-75 с шайбами и гайками, а также на 8 когтевых шайб в виде двухсторонних зубчато-кольцевых пластин типа C1 [124] $d = 50$ мм (1 серия) и $d = 62$ мм (2 серия). Размеры

образцов представлены на Рисунке 4.15.

Для уменьшения трудоемкости изготовления образцов было использовано универсальное устройство для запрессовки когтевых шайб [15] (Приложение Г). В используемом устройстве содержатся опорные элементы, соединенные между собой с возможностью возвратно-поступательного перемещения одного элемента относительно другого, полый механизм для нагнетания нагрузки, опирающийся на втулку, связанную с одним из опорных элементов, и центральный стержень, соосно установленный сквозь указанный механизм и опорные элементы и зафиксированный с обеих сторон, каждый опорный элемент выполнен в виде телескопических стержней прямоугольного профиля, установленных по окружности относительно центрального стержня с возможностью их поворота и последующей жесткой фиксации, а полый механизм для нагнетания нагрузки выполнен в виде гидравлического домкрата, причем каждый телескопический стержень одного опорного элемента соединен с симметричным телескопическим стержнем другого элемента.

Использование указанного устройства позволило изготовить качественное соединение за счет обеспечения равномерной передачи усилий запрессовки и их равномерного распределения по поверхности соединяемых элементов *LVL* при запрессовке одновременно нескольких пар когтевых шайб. Причем используемое устройство обеспечило сокращение рабочего времени на изготовление образца и упростило его сборку. Принципиальный вид полезной модели представлен на Рисунке 4.13. Сборка соединения с использованием универсального устройства для запрессовки когтевых шайб приведена на Рисунке 4.14.

Для измерения горизонтальных и вертикальных смещений к изготовленным образцам были прикреплены прогибомеры ПАО-6 с ценой деления 0,01 мм, с возможностью отслеживать смещения в крайних опорах балки и с обеих сторон центрального узла. Прикрепление прогибомеров производилось при помощи шурупов. Горизонтальные и вертикальные смещения позволяют получить значения углов поворота конструкции под воздействием изгибающего момента.

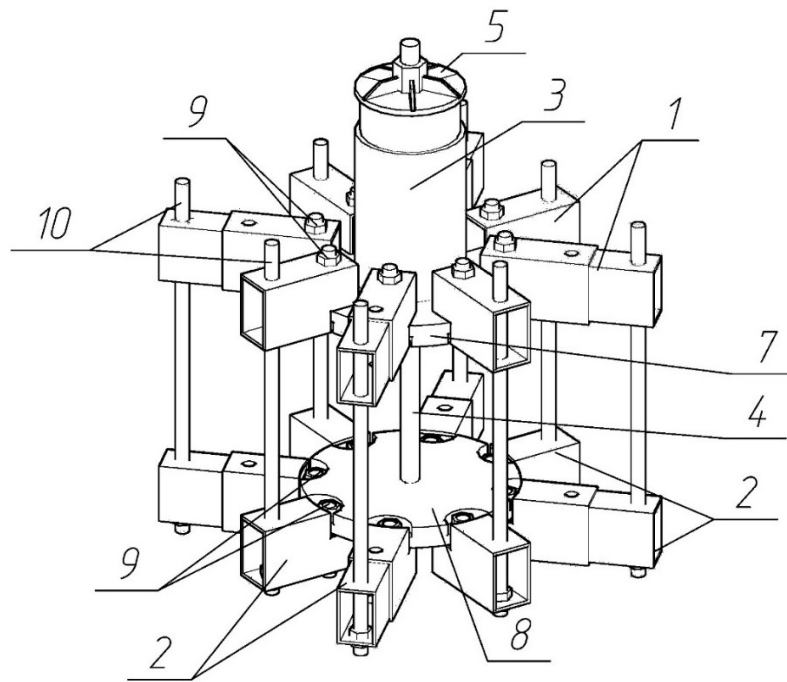


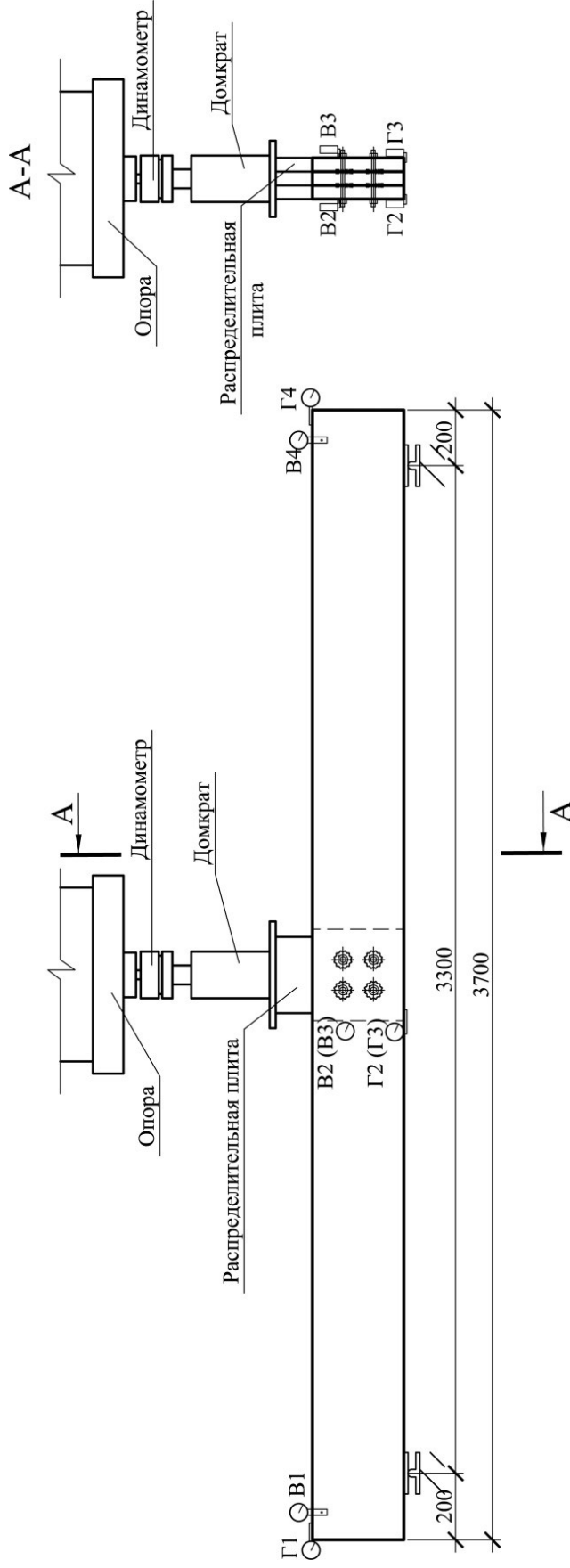
Рисунок 4.13. Полезная модель устройства для запрессовки когтевых шайб:
 1, 2 – опорные элементы, 3- механизм для нагнетания нагрузки, 4-центральный
 стержень, 5, 6 - гайка-крышка, 7, 8- втулка, 9 - стяжные элементы, 10-
 цилиндрические стержни.



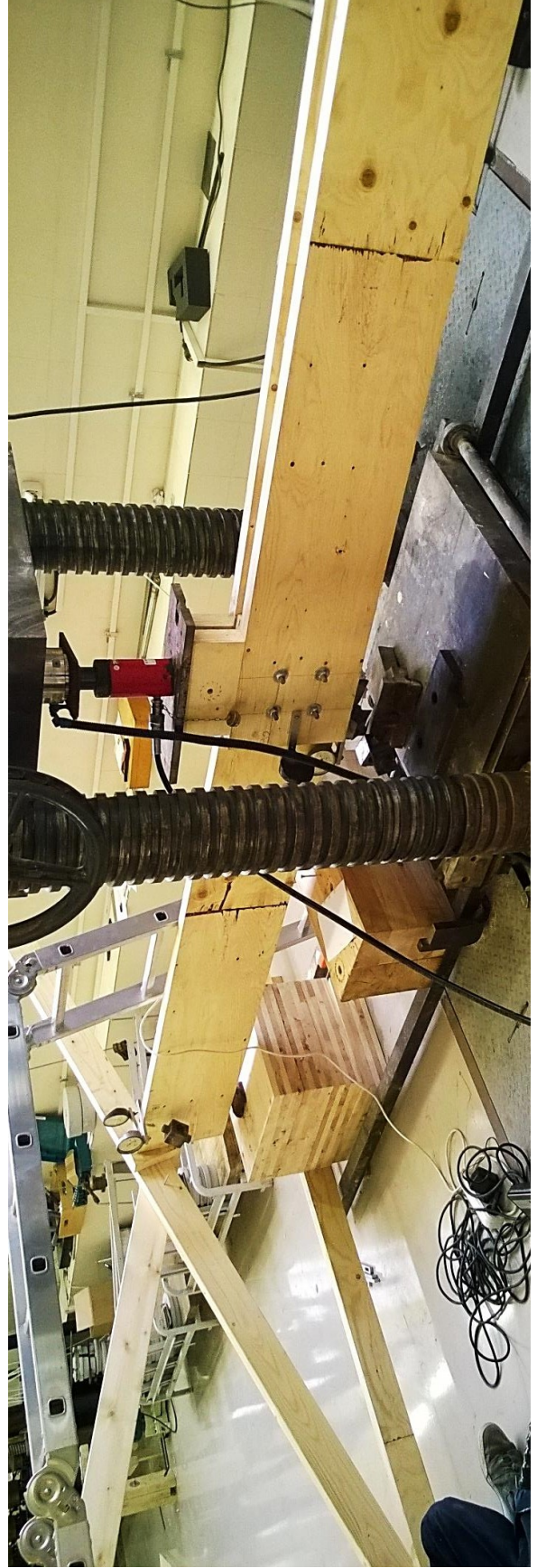
Рисунок 4.14. Сборка узла с использованием универсального устройства для
 запрессовки когтевых шайб.

Проведение испытаний выполнялось согласно существующим рекомендациям [71, 72]. При испытании образцов на действие изгибающего момента нагрузка передавалась через стальную распределительную призму от гидравлического домкрата, установленную над крайними элементами соединения. Это позволяло среднему элементу вращаться относительно крайних элементов. Над гидравлическим домкратом был установлен динамометр, позволяющий определять сжимающие нагрузки с точностью 0,01 кН. Для предотвращения выхода конструкции из плоскости были предусмотрены перекрестные связи, удерживающие испытываемые балки в горизонтальном положении. Схема проведения испытаний и процесс приведены на Рисунке 4.16.

Испытания на действие изгибающего момента осуществлялись ступенчато, со ступенью загрузки 800 кг, определенной в ходе пробных экспериментов (3% от предполагаемого разрушающего значения N_d). Скорость нагружения была принята 2,5 кг/с. При достижении каждой ступени нагрузка выдерживалась в течении 20 секунд для снятия показаний с прогибомеров. Все датчики перемещений демонтировались при достижении вертикальных смещений $\delta_y = 50$ мм, и образцу передавалось максимальное усилие. После испытаний из элементов вырезались образцы для определения физико-механических свойств материала, при этом влажность составила $W = 11,4$ %, прочность на сжатие вдоль волокон $R_{сж} = 54,52$ МПа.



а)



б)

Рисунок 4.16. Испытание соединений на действие момента: а) схема испытаний б) проведение испытания.

По диаграммам деформирования соединений с когтевыми шайбами, подверженные крутильному моменту, полученные с помощью предлагаемой методики и экспериментально, можно определить расхождение в области достижения максимальных нагрузок в пределах 6 - 9 % (Рисунки 4.17-4.18).

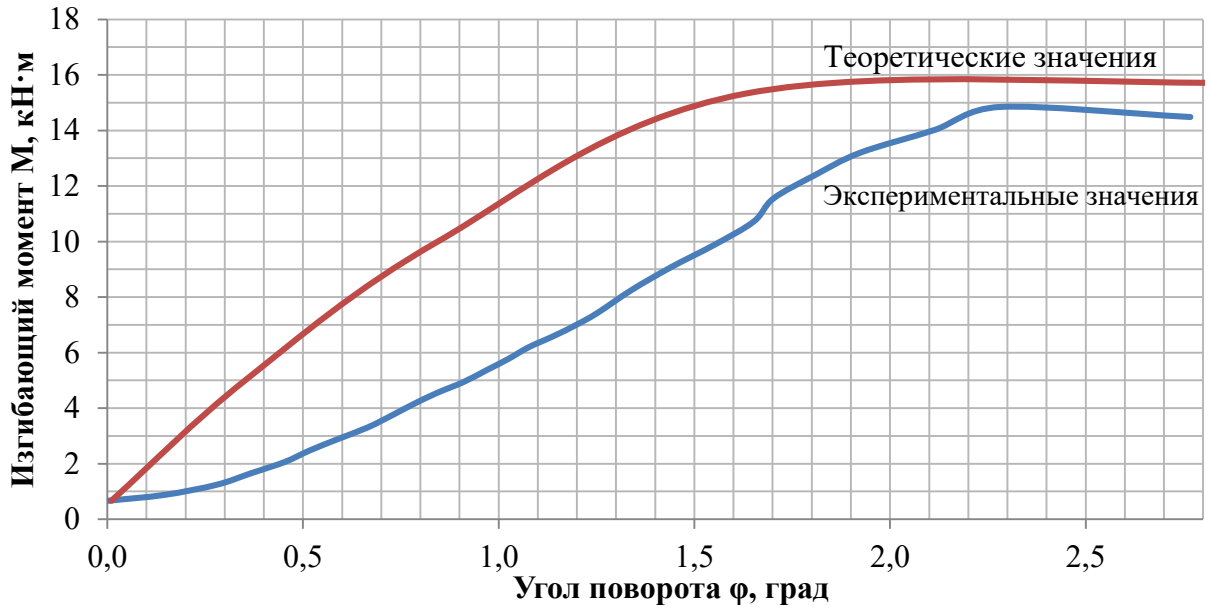


Рисунок 4.17. Экспериментальные и теоретические зависимости угла поворота соединения от изгибающего момента для соединений 1 серии.

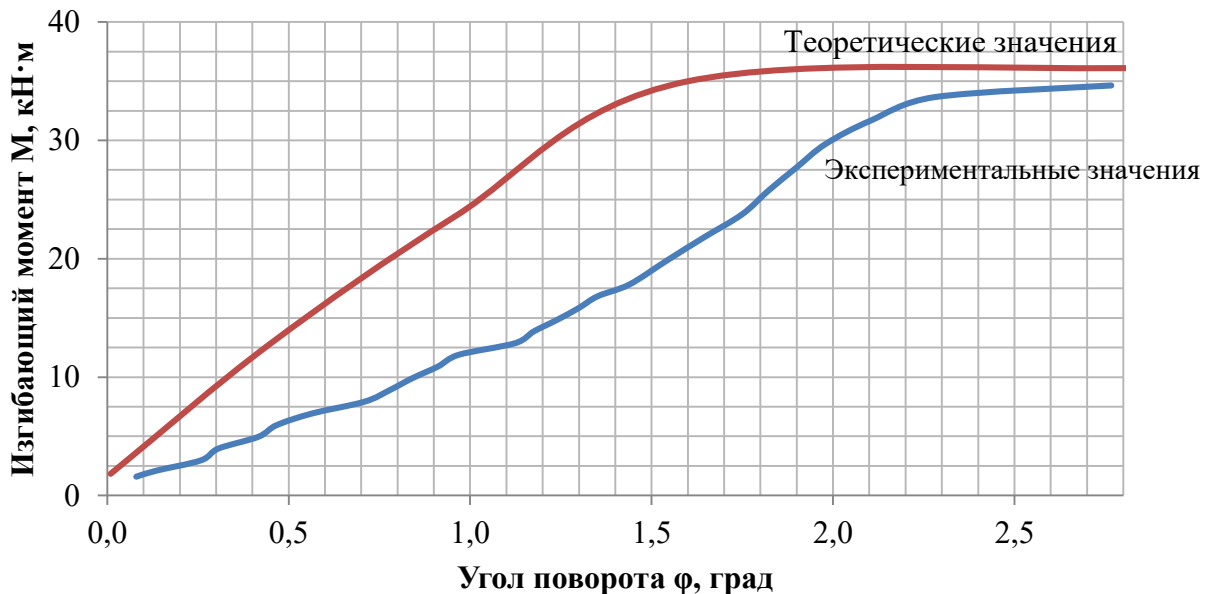


Рисунок 4.18. Экспериментальные и теоретические зависимости угла поворота соединения от изгибающего момента для соединений 2 серии.

4.3. Исследование НДС нагельных соединений с когтевыми шайбами при действии длительного усилия

Для изучения влияния на НДС соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из *LVL* действия длительного осевого усилия и исследования характера развития деформаций во времени, а также апробации предлагаемой методики расчета были проведены соответствующие длительные испытания для 4-х образцов.

Для испытания были выбраны образцы в двусрезном исполнении, форма и размеры которых приняты согласно соответствующим конструктивным требованиям к соединениям деревянных элементов [89, 90, 92, 125]. Образцы выполнены с использованием одного нагеля в образце для возможности сопоставления с результатами проводимых ранее аналогичных экспериментов (в том числе испытаний при кратковременном действии нагрузки). Двусрезные соединения выполнялись с углом между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 0^\circ$.

Материалом элементов соединения использовался брус *LVL Ultralam* толщиной 45 мм. В качестве когтевых шайб применялись двухсторонние зубчато-кольцевые пластины типа *C1*, диаметрами 50 (1 серия) и 95 (2 серия) мм производства компании *Simpson*. В качестве нагелей использовались гладкие стальные шпильки диаметрами 12 (1 серия) и 16 (2 серия) мм по ГОСТ 9066-75 с гайками и шайбами. Размеры образцов представлены на Рисунках 4.2 *a* - 4.3. *a*.

Аналогично испытаниям на кратковременное воздействие осевого усилия перед испытаниями к образцам были прикреплены металлические пластины во избежание поворота элементов относительно друг друга. Перед установкой измерительного оборудования образцы были обмотаны герметичной стрэтч-пленкой, для фиксации неизменности влажности на период испытаний. Так же для измерения деформаций предварительно к образцам с противоположных сторон были прикреплены индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм (Рисунок 3.19). Из элементов образцов были выпилены параллелепипеды и определены

прочность на сжатие вдоль волокон ($R_{сж} = 56,3$ МПа) и влажность материала ($W = 12,1$ %).

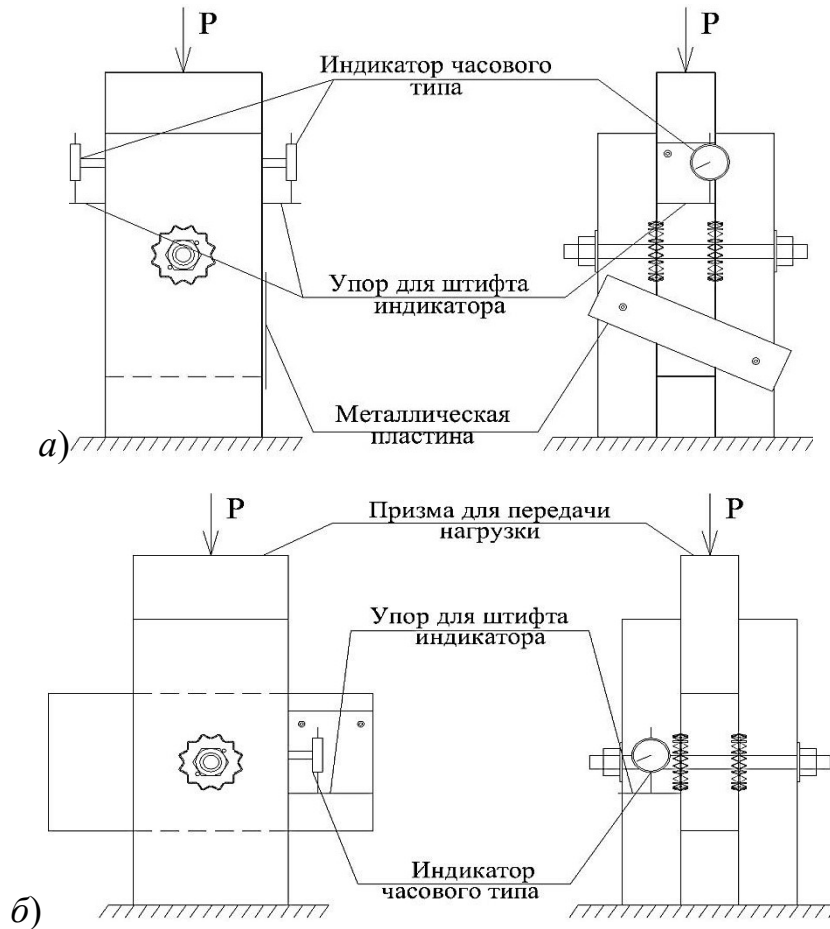


Рисунок 4.19. Схема проведения длительных испытаний на сжатие для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов: а) $\alpha = 0^\circ$, б) $\alpha = 90^\circ$.

Экспериментальные образцы были испытаны в пружинных прессах с при уровне нагрузки равной 0,3 единицы от максимального загрузения, передаваемого при испытаниях от действия кратковременной нагрузкой и составили для 1 серии $P = 9,525$ кН, для 2 серии $P = 20,4$ кН. Перед передачей усилия пружинные установки были оттарированы с помощью электронного динамометра с возможностью контролирования усилия с точностью до 0,1 кН.

Всего было проведено 4 испытания (2 серий по 2 опыта в каждой). Испытания проводились в течение 100 суток каждая. Разгрузка образцов выполнялась в течении 24 суток. После испытаний были построены графики кривых

деформирования для экспериментальных значений и произведено сравнение с теоретическими значениями.

Диаграммы прироста деформаций представлены на Рисунке 4.20. Средняя смещение по истечении 10 минут после загрузки составила 0,45 мм для 1 серии, и 0,51 мм для 2 серии. По истечении срока испытаний конечная величина смещения составила 0,68 мм для 1 серии и 0,77 мм для 2 серии. Относительная ползучесть в конце испытания составила 0,56 для 1 серии, 0,61 для 2 серии.

При сопоставлении результатов длительных испытаний *LVL* и древесины с когтевыми шайбами, заметна аналогия в распределении величин относительной ползучести во времени. Для древесины на 100 сутки была отмечена величина средней относительной ползучести на уровне 0,75. Для *LVL* эта величина была меньше и составила в среднем 0,57.

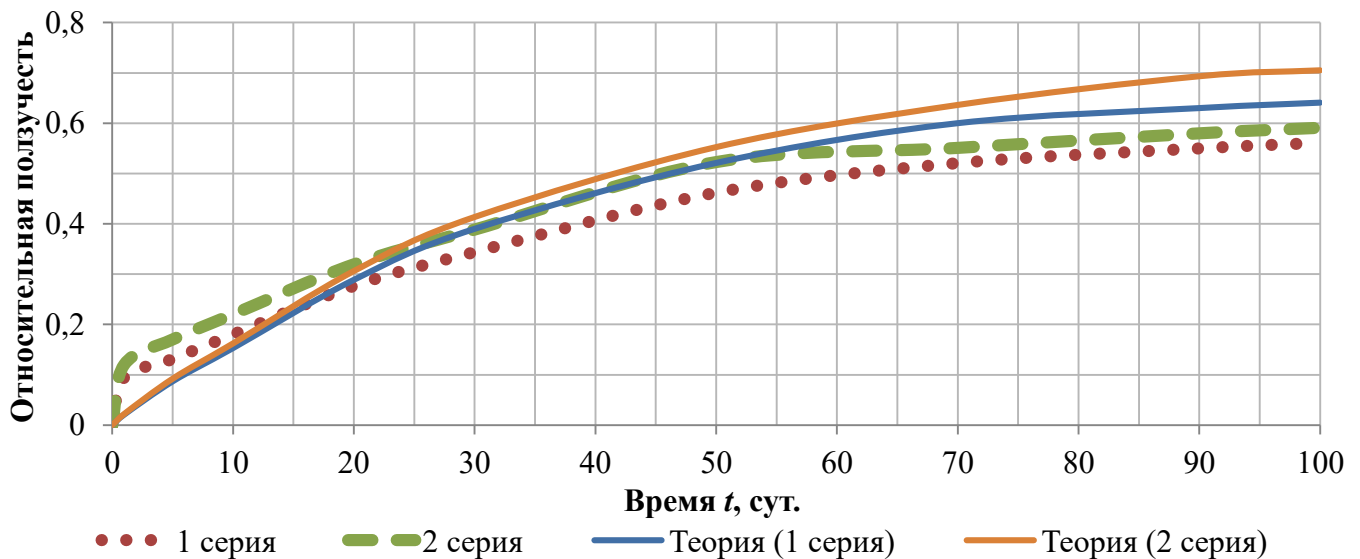


Рисунок 4.20. Экспериментальные и теоретические зависимости относительной ползучести соединения от времени для уровня нагрузки в $0,3 P_{max}$.

Используя алгоритм расчета соединений, предлагаемый автором (см. п. 2.3), были получены теоретические значения изменений деформаций во времени, при этом относительная ползучесть на 100 сутки составила для 1 серии 0,641 и для 2 серии 0,704, при этом расхождения расчетных теоретических и экспериментальных значений оказались равными 9,5 % и 16,05% соответственно, что является удовлетворительной сходимостью.

4.4. Исследование НДС ферм из *LVL* с когтевыми шайбами при действии статической нагрузки

Для оценки достоверности предлагаемой методики расчета стержневых конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами, а так же изучения работы конструкции под нагрузкой были проведены экспериментальные исследования полномасштабной модели фермы с параллельными поясами пролетом 4,6 м.

Эксперимент выполнен с целью апробации методики расчета и для нахождения НДС конструкций ферм при действии статической нагрузки.

В процессе подготовки и испытаний опытной конструкции являлось необходимым:

- оценить технологичность изготовления конструкции;
- оценить деформативность узлов конструкции;
- определить распределение напряжений в элементах конструкции.

4.4.1 Конструирование и сборка образца конструкции для испытания

Изготовление опытной фермы из *LVL* с когтевыми шайбами производилось в условиях механической лаборатории СПбГАСУ силами автора в соответствии с требованиями [89, 90, 92, 125]. Геометрические размеры конструкции представлены на Рисунке 4.21.1 В качестве материала элементов конструкции был использован брус *LVL Ultralam-R* производства завода *Taleon Terra* (г. Торжок). Для закрепления элементов фермы использовались стальные гладкие шпильки из стали С255 диаметрами 16 мм с резьбой на концах с гайками и усиленными шайбами, а также использовались когтевые шайбы типа «Бульдог» С1 диаметрами 75 мм производства компании *Simpson* (США). При проектировании испытываемой фермы предполагалось разрушение по узлу с когтевыми шайбами, т.к. запас несущей способности по материалу принят минимум – 44%, запас несущей

способности по узлу – 7%. Ферма была запроектирована для уровня разрушающей нагрузки, соответствующей $P_n = 6,68$ кН/м в соответствии [93].

Перед испытаниями из материалов элементов конструкции фермы были изготовлены образцы для определения влажности W , прочности на кратковременное сжатие вдоль волокон R_c и модуля упругости E . Влажность материала LVL для нижнего и верхнего поясов составила $W=10,6\%$, при приведении к стандартной влажности $W=12\%$, прочность на сжатие составила $R_c = 56,6-56,9$ МПа в соответствии с ГОСТ 16483.10-73* [13], модуль упругости $E = 14000$ МПа в соответствии с ГОСТ 16483.24-73* [9]. Для элементов раскосов влажность составила $W=11,1\%$, при приведении к стандартной влажности $W=12\%$, прочность на сжатие составила $R_c = 52,1-53,4$ МПа в соответствии с ГОСТ 16483.10-73*, модуль упругости $E = 13800-13900$ МПа в соответствии с ГОСТ 16483.24-73*. Значения характеристик для LVL при приведении к 12% влажности определялись, как среднее арифметическое для каждого значения элементов конструкции. Геометрические и прочностные характеристики элементов представлены в Таблице 4.5. Обозначение элементов фермы представлено на Рисунке 4.21.2.

Таблица 4.5. Геометрические и прочностные характеристики элементов конструкции испытываемой фермы, приведенные к влажности $W=12\%$.

Элемент конструкции	Габариты, мм $l \times h \times b$	Прочность на сжатие R_c , МПа	Модуль упругости E , МПа
ВП	3240x100x45	56,6	14000
НП	4800x100x45	56,9	14000
P1	1190x100x45	52,1	13800
P2	1160x100x45	53,4	13900
P3	1090x100x45	52,8	13800
Ст1	475x100x45	50,9	12300

Порядок сборки конструкции состоял из следующих операций:

- размещение элементов конструкции в проектное положение и закрепление с помощью зажимных средств;

- сверление отверстий для стяжных болтов;
- установка когтевых шайб в предусмотренные проектом места;
- поочередная запрессовка слоев конструкции;
- установка стяжных болтов.

Элементы конструкции были замаркированы и размещены в соответствующее положение согласно размерам, указанными на Рисунке 4.21.1. При этом контуры элементов относительно друг друга фиксировались на частях соседних элементов, для контроля сборки конструкции при дальнейших операциях. Закрепление элементов относительно соседних выполнялось с помощью струбцин.

Сверление отверстий выполнялось без использования дополнительной оснастки, контролирующей точность сверления, при этом вертикальность сверла определялась визуально, путем осмотра с двух взаимно перпендикулярных сторон и корректировки угла действия сверла.

Установка когтевых шайб подразумевает их постановку в проектное положение и фиксацию от смещения путем закрепления шайб с помощью гвоздей. Гвозди закрепляют когтевую шайбу через предусмотренные в ней монтажные отверстия. При этом использование в качестве крепежных средств гвоздей не препятствуют дальнейшей запрессовке и не изменяют несущей способности соединения. Затем элементы с закрепленными когтевыми шайбами устанавливались в проектное положение.

Запрессовка когтевых шайб выполнялась с использованием гидравлического домкрата с полым штоком. При этом, сквозь отверстие для болта продевалась металлическая шпилька, с одной стороны устанавливался гидравлический полый домкрат с продетой внутри шпилькой, с обеих сторон которой установлены широкие усиленные шайбы с гайками. Поскольку изготавливаемая конструкция состоит из 5 слоев элементов, то для сохранения необходимой точности сборки производили вначале трех внутренних слоев 2, 3, 4, а затем внешних 1, 5.

После запрессовки выполнялась затяжка с помощью рабочих болтов с гайками и усиленными шайбами. Затяжка гаек выполнялась из условия сохранения

просветов между сплавляемыми элементами на толщину тела когтевой шайбы согласно требованиям [125].

В ходе работы по сборке конструкции фермы было отмечено, что использование размеченного сборочного стола и гидравлического инструмента для запрессовки когтевых шайб значительно ускоряет процесс сборки в построечных условиях и увеличивает технологичность сборки конструкции. Так трудоемкость изготовления конструкции фермы в хорошо отлаженных условиях может быть ниже 1,167 чел.·час на 1 м пролета конструкции, что представляет деревянные конструкции на когтевых шайбах как имеющие преимущество. При производстве конструкций в заводских условиях процесс сборки достаточно просто усовершенствовать путем использования высоко эффективных универсальных сборочных столов, а также автоматических прессов.

4.4.2 Методика и проведение испытаний ферм

Испытания проводились на семиштемпельном гидравлическом прессе *Amsler*. Конструктивная особенность данного испытательного стенда заключается в возможности подачи нагрузки только с нижней стороны, поэтому было принято решение перевернуть конструкцию фермы для подачи нагрузки на верхний пояс. Горизонтальные связи были закреплены к элементам верхнего пояса, для обеспечения пространственной жесткости конструкции. Для передачи нагрузок от гидравлических домкратов были предусмотрены распределительные пластины. Конструкция фермы проектировалась для передачи нагрузки в узлы закрепления раскосов, стоек и верхнего пояса. Закрепление фермы в опорной зоне выполнялось путем опирания конструкции на распределительную плиту, которая, в свою очередь, передает нагрузки на цилиндрические опоры, жестко связанные с конструкцией прессы.

Измерения перемещений выполнялось с использованием прогибомеров Аистова БПАО с ценой деления 0,01 мм, путем установки приборов в опорной зоне фермы и по узлам верхнего и нижнего поясов. Всего было установлено 9 прогибомеров, расположение которых приведено на Рисунке 4.23.

Деформации и напряжения в элементах фермы определялись с использованием тензометрических преобразователей *Kyowa* с базой 50 мм и номинальным сопротивлением 405 Ом, коэффициент тензочувствительности – 4.42. Измерения сигналов датчиков производилось на измерительно-вычислительном комплексе (ИВК) *Tokyo Sokki Kenkyujo Co. TDS-150* с возможностью снятия показаний с частотой 60 Гц/ ИВК имеет 40 измерительных каналов и обеспечивает измерением по различным схемам включения датчиков, в том числе: измерение по схеме «1/4 моста», «1/2» моста, полный мост, а также позволяет снятие показаний с термопар. Для измерения деформаций и напряжений элементов конструкции применялись розетки, составленные из отдельных датчиков, ориентированных под углами 0°, 45°, 90° к волокнам. Использование такого вида расстановки датчиков позволяет определить вектор главных

деформаций. Установка тензодатчиков на элементах конструкции фермы приведена на Рисунках 4.22, 4.24. Процесс раскрепления фермы в испытательной установке представлен на Рисунках 4.25.1-4.25.2.

Перед испытаниями была произведена тарировка используемой партии тензодатчиков [3], которая позволяет корректно интерпретировать результаты испытаний конструкции. Тарировка производилась в универсальной испытательной машине *Instron 5989*, путем сжатия образца *LVL* с размерами 100x45x185 мм с фиксацией усилия и соответствующего показания тензорезисторов. Тарирование тензодатчиков представлено на рисунке 4.26.

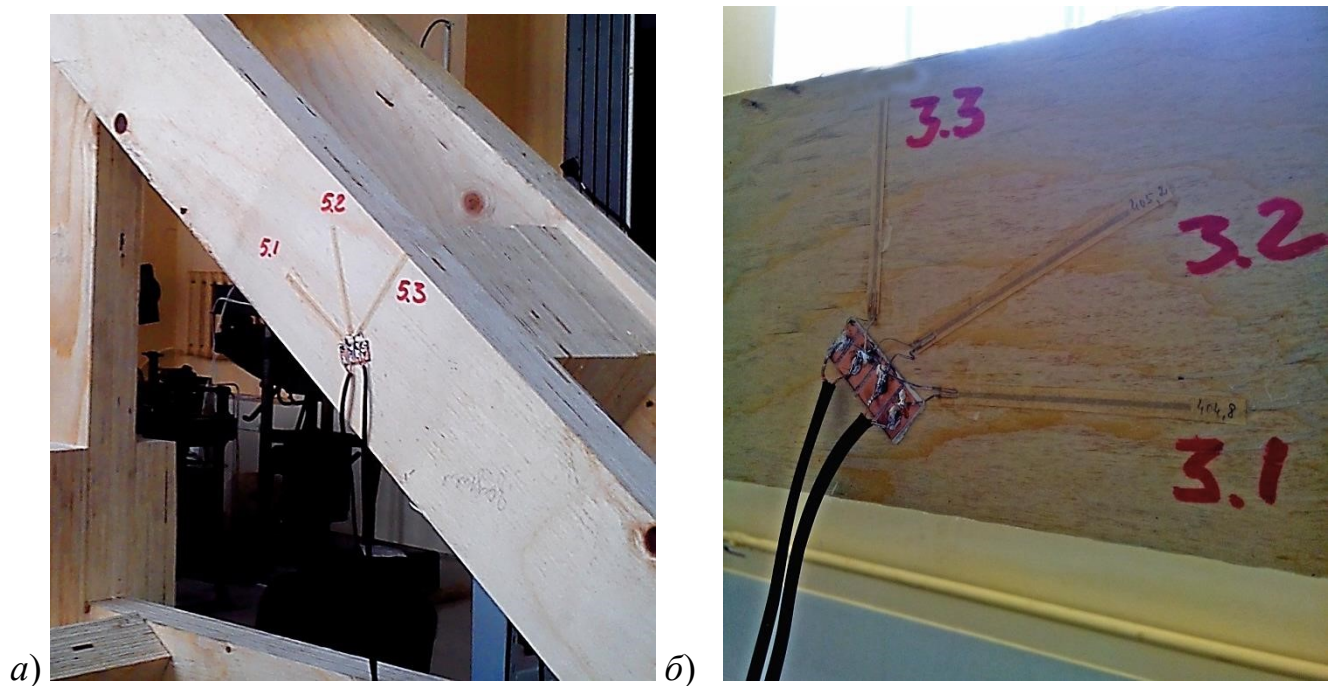


Рисунок 4.22. Установка розеток тензодатчиков: а) на раскосах фермы, б) на нижнем поясе фермы.

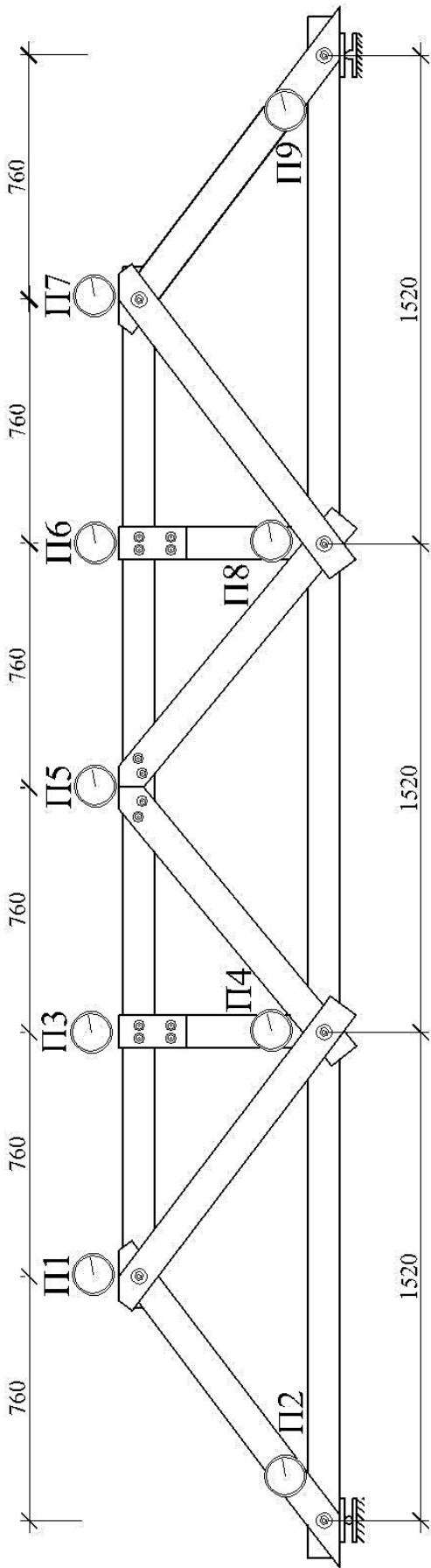


Рисунок 4.23. Расположение прогибомеров на конструкции.

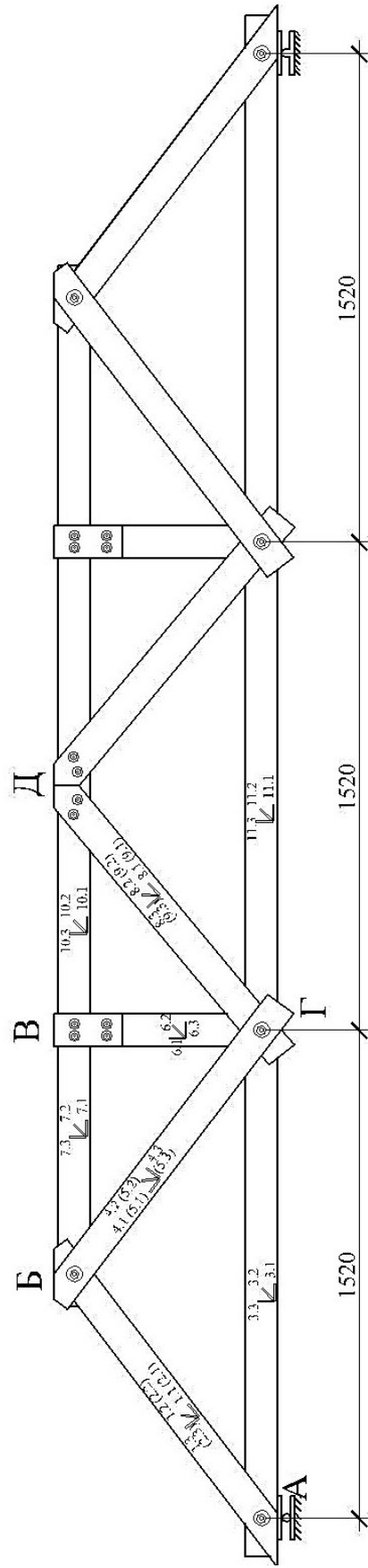


Рисунок 4.24. Расположение тензодатчиков на конструкции.

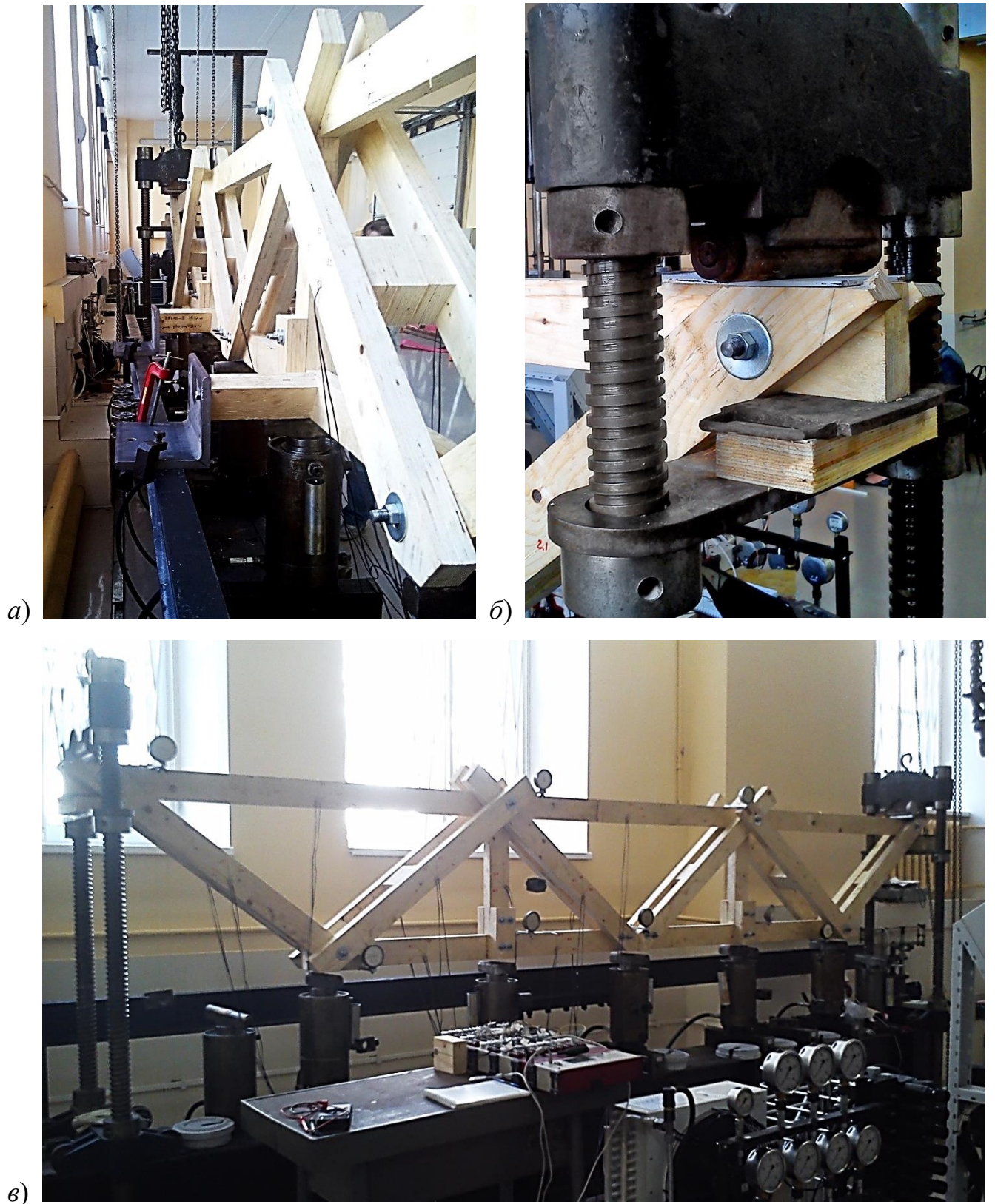


Рисунок 4.25.1. Испытуемая ферма: *а)* раскрепление из плоскости верхнего пояса фермы, *б)* опорный узел фермы, *в)* внешний вид конструкции.

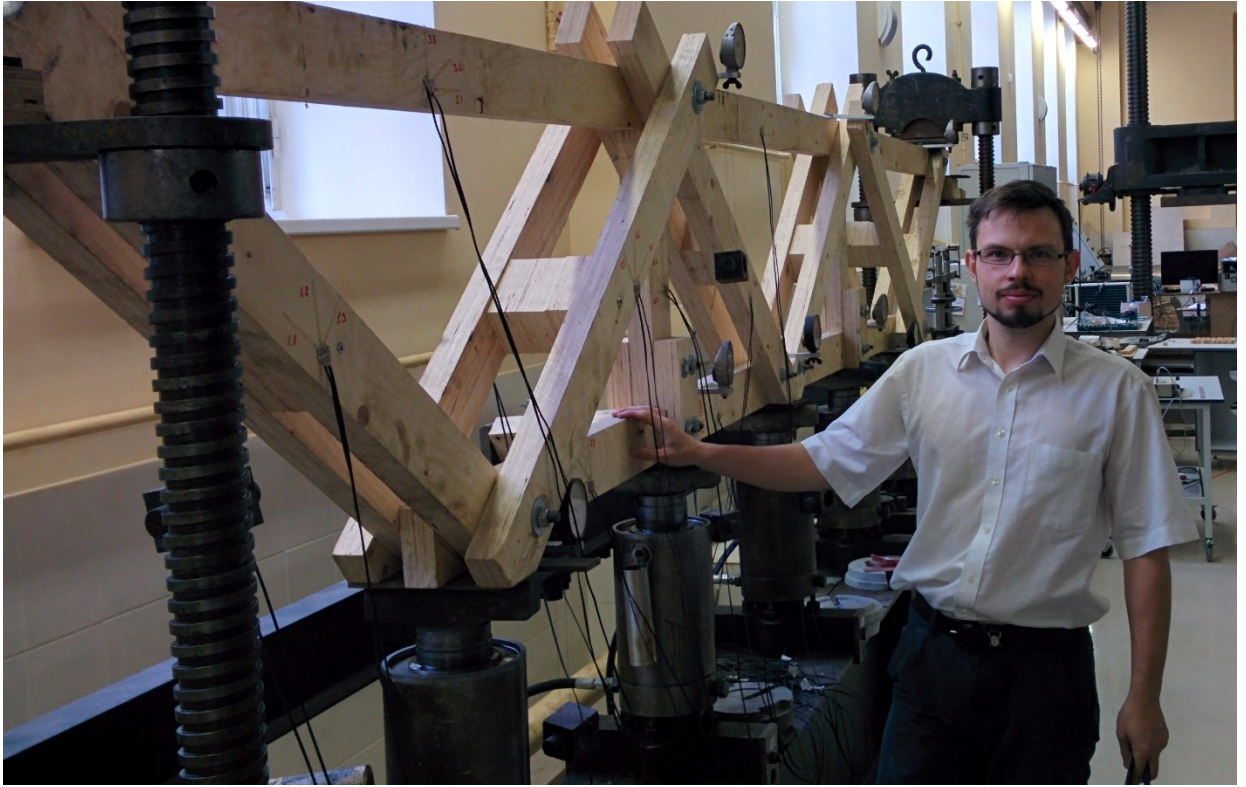


Рисунок 4.25.2. Испытуемая ферма до проведения испытаний.

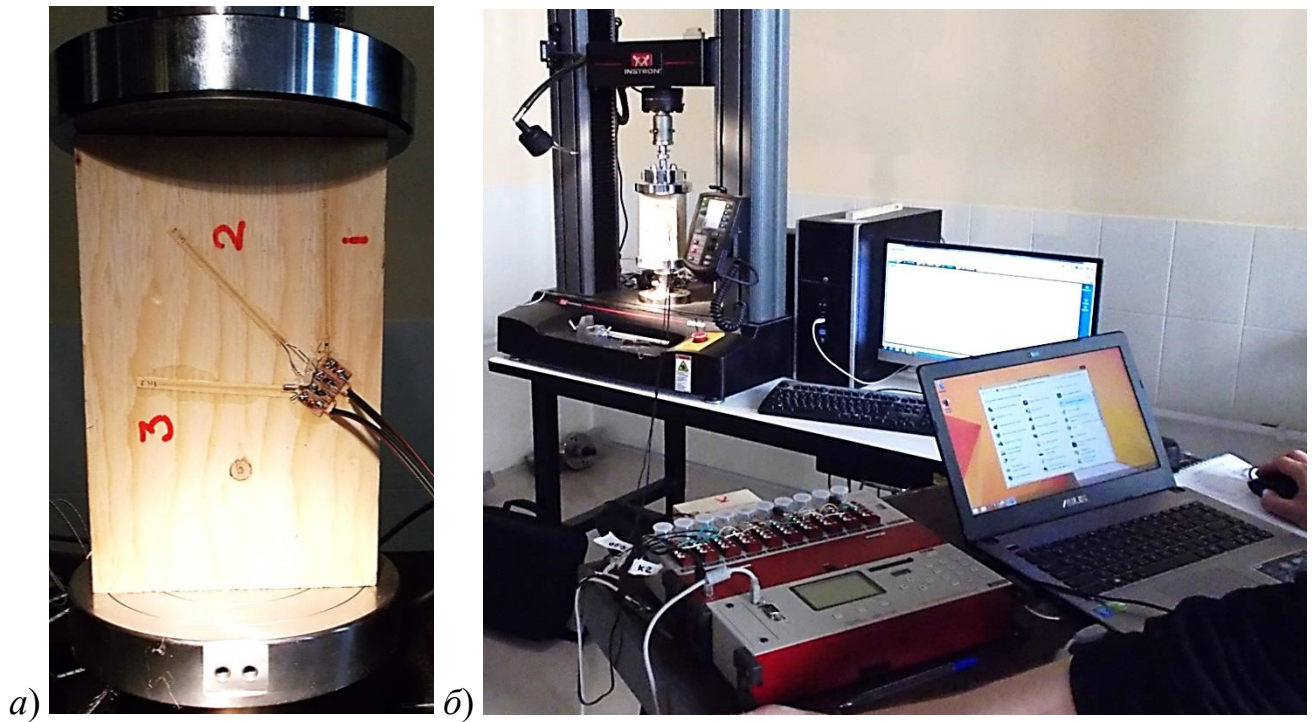


Рисунок 4.26. Тарировка тензодатчиков на бруске *LVL*: *а)* образец с расположением тензодатчиков, *б)* общий вид регистрации отсчетов по приборам.

Перед проведением основного испытания было произведено несколько пробных загрузок в 4 ступени при передаче суммарной нагрузки равной $0,4P_{\text{расч}}$. Была произведена проверка регистрирующих приборов на работоспособность.

При проведении основного испытания нагрузка прикладывалась к верхнему поясу ступенчато, согласно рекомендациям к испытанию деревянных конструкций [71] (таблица 4.6). Продолжительность приложения нагрузки составляла 3 мин. Выдержка конструкции для перераспределения усилий в конструкции составляла 25 мин - 40 мин. Разгрузка конструкции проводилась в обратном порядке. В ходе проведения эксперимента фиксировались смещения узлов элементов фермы и напряжения в элементах при передаче нагрузки в интервале от 2,34 кН/м до 8,19 кН/м с шагом загрузки 0,73 кН/м. После выполнения основного цикла загрузок и разгрузок (до 8,19 кН/м) конструкция фермы была доведена до разрушения при уровне нагрузки 15,48 кН/м. При этом, при уровне загрузки выше 8,19 кН/м снятия показаний с тензодатчиков не проводилось.

Таблица 4.6. Этапы нагружения

Этапы нагружения	Нагрузка на домкрате, кН					Всего на этапе, кН	Всего на этапе, кН/м
	1	2	3	4	5		
1	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134	10,670	2,34
2	2,772	2,772	2,772	2,772	2,772	13,862	3,04
3	3,447	3,447	3,447	3,447	3,447	17,237	3,78
4	4,387	4,387	4,387	4,387	4,387	21,934	4,81
5	4,852	4,852	4,852	4,852	4,852	24,259	5,32
6	5,481	5,481	5,481	5,481	5,481	27,406	6,01
7	6,110	6,110	6,110	6,110	6,110	30,552	6,7
8	6,794	6,794	6,794	6,794	6,794	33,972	7,45
9	7,469	7,469	7,469	7,469	7,469	37,346	8,19
10	8,828	8,828	8,828	8,828	8,828	44,141	9,68
11	10,187	10,187	10,187	10,187	10,187	50,935	11,17
12	11,546	11,546	11,546	11,546	11,546	57,730	12,660
13	12,905	12,905	12,905	12,905	12,905	64,524	14,150
14	14,118	14,118	14,118	14,118	14,118	70,589	15,480
15	13,58	13,58	13,58	13,58	13,58	67,90	14,89
16	14,12	14,12	14,12	14,12	14,12	70,59	15,48

В ходе проведения эксперимента отсчеты по приборам снимались непосредственно перед приложением нагрузки и в момент достижения требуемого

уровня загрузки. Снятие отсчетов по приборам выполнялось одновременно в течении 0,5 минут.

4.4.3 Исследование НДС фермы с параллельными поясами из LVL с когтевыми шайбами

Результаты испытаний представлены в виде диаграмм перемещений нижних и верхних узлов фермы, а также относительных деформаций конструкции (см. Рисунок 4.27). По показаниям прогибометров были построены эпюры перемещений для верхнего и нижнего поясов конструкции (см. Рисунки 4.28-4.29).

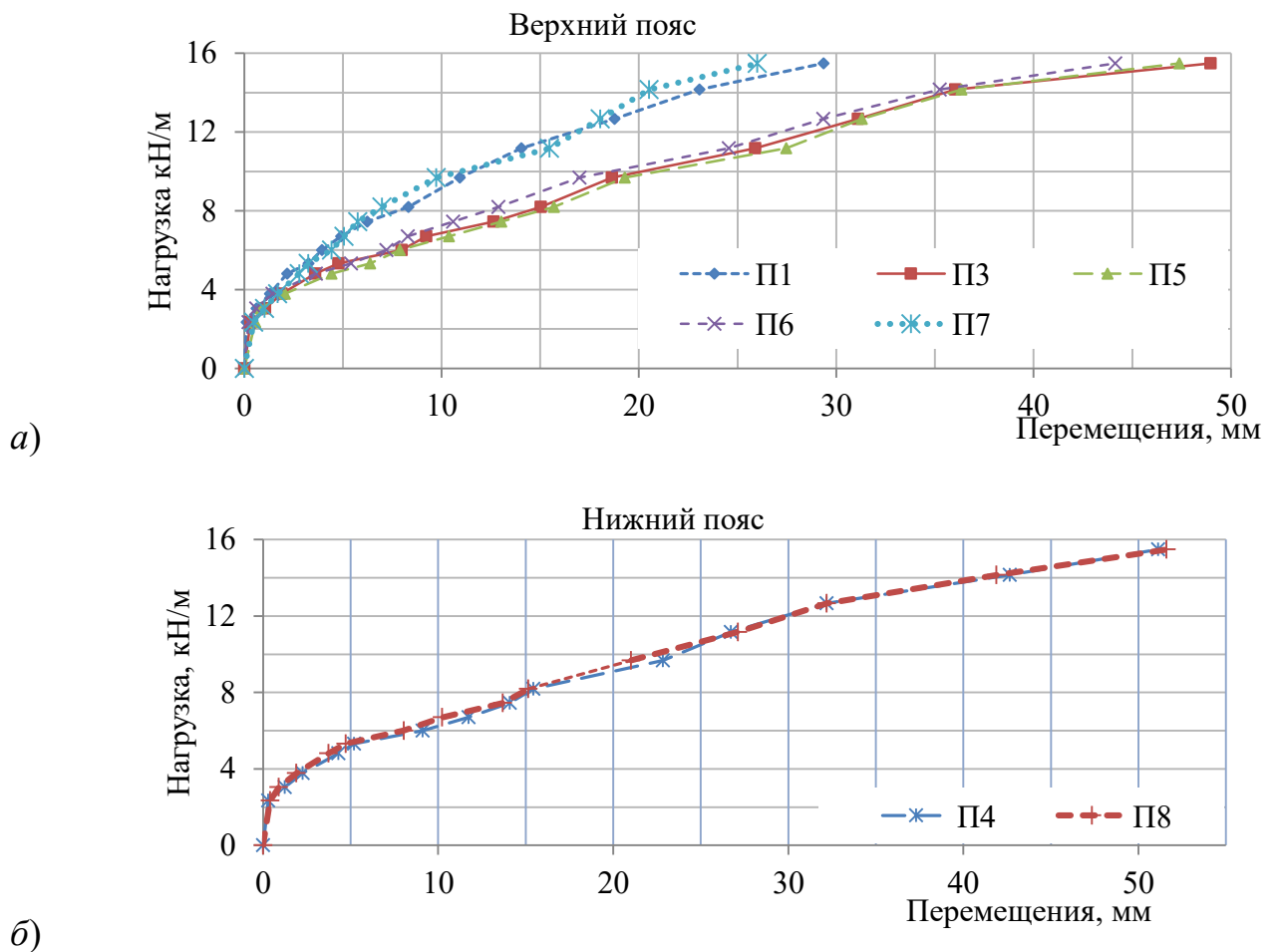


Рисунок 4.27. Диаграмма перемещений узлов фермы:

а) верхний пояс, б) нижний пояс.

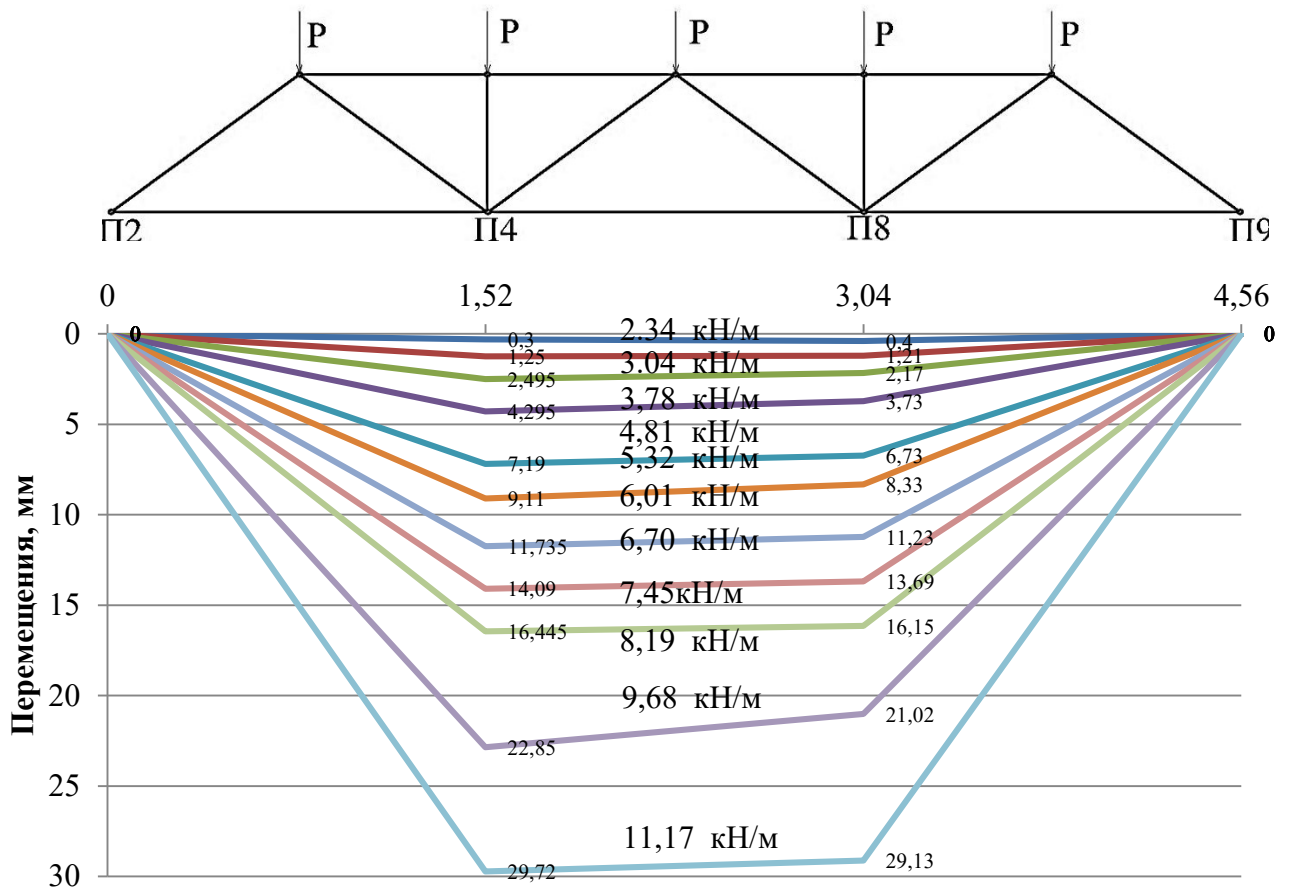
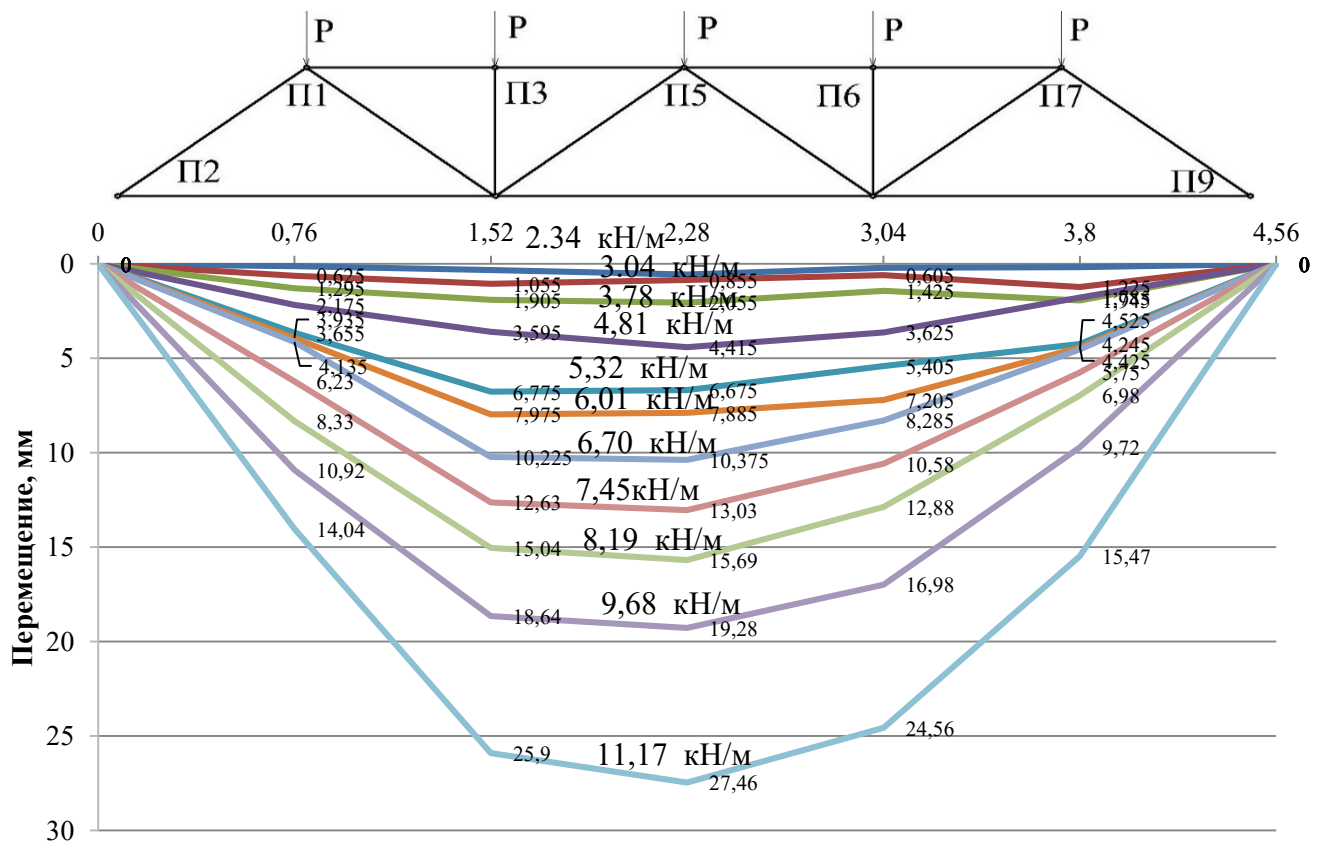


Рисунок 4.28. Эпюры прогибов узлов нижнего пояса фермы.



Анализ перемещений в узлах соответствует упругому характеру работы соединений до уровня нагрузки 3,78 кН/м фермы, при повышении нагрузки до 8,19 кН/м заметно изменение угла наклона кривой нагрузка-смещение, которая характеризуется пропорциональным изменением смещения от уровня нагрузки. Перераспределения в элементах фермы начинают возникать при уровне нагрузок 6,68 кН/м, при соответствующем перемещении узлов конструкции в среднем на 9,5 мм. При достижении расчетного усилия $P_n = 6,68$ кН/м прогиб фермы составил 1/484 от пролета, при допустимом прогибе 1/200 [88]. Процесс испытаний и разрушение фермы представлено на Рисунках 4.30-4.32.

Начало интенсивных деформаций возникает при уровне нагрузки N_{I-II} 9,67 кН/м. Данная нагрузка определяет границу области сравнительно небольших деформаций и области интенсивного развития деформаций. Характерное пластическое разрушение замечается при загрузке от 12,68 кН/м. На ферме отмечались значительные деформации, слышен характерный треск разрывающихся волокон материала *LVL*, заметен рост деформаций, однако внешних разрушений узлов замечено не было. При увеличении нагрузки до 15,48 кН/м, в течении 12 минут произошло разрушение в нижнем поясе фермы, что вызвало выход из строя всей правой части конструкции. Растянутый пояс фермы был разрушен от воздействия изгибающего момента в узле (узел установки прогибомера П8). После перераспределения усилий возникла трещина в элементе верхнего пояса и за счет передачи усилий под углом от крайнего раскоса она раскрылась, расщепив при этом элемент верхнего пояса (узел установки П7).

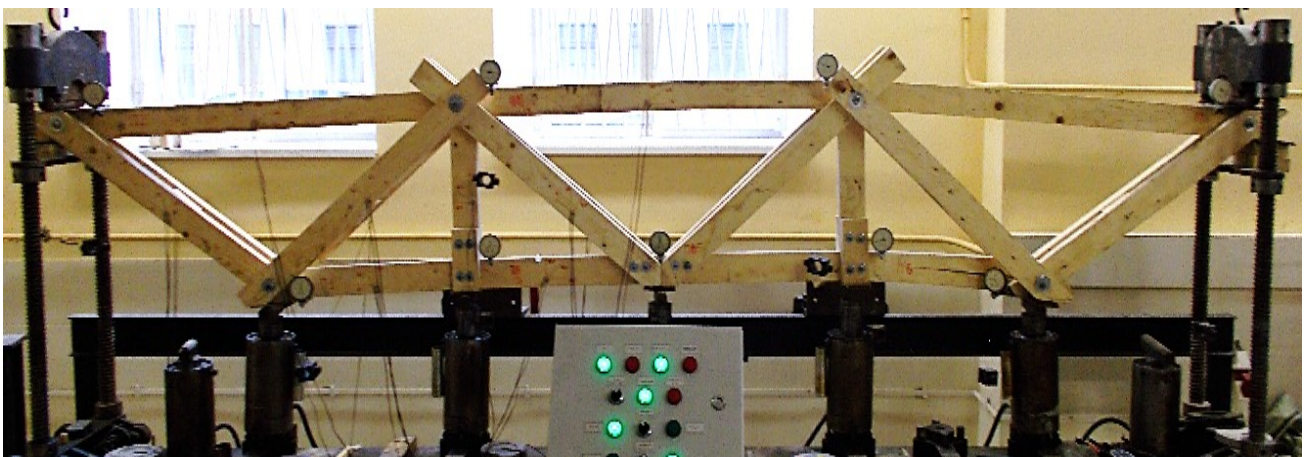


Рисунок 4.30. Деформации конструкции фермы при испытаниях.

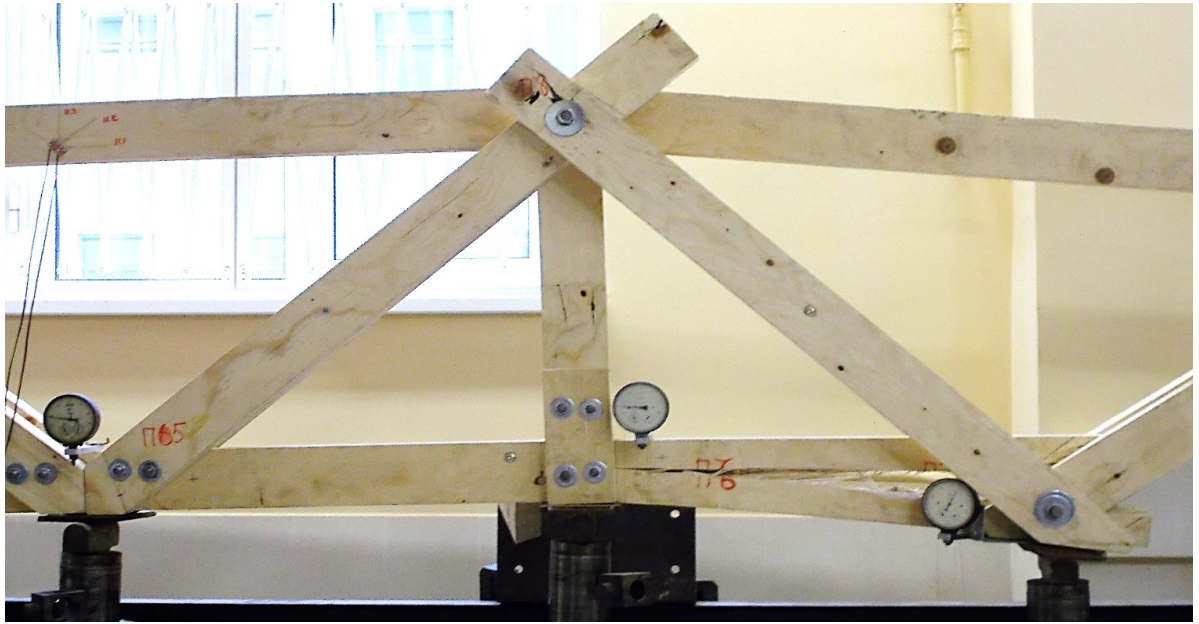


Рисунок 4.31. Разрушение конструкции фермы при испытаниях.

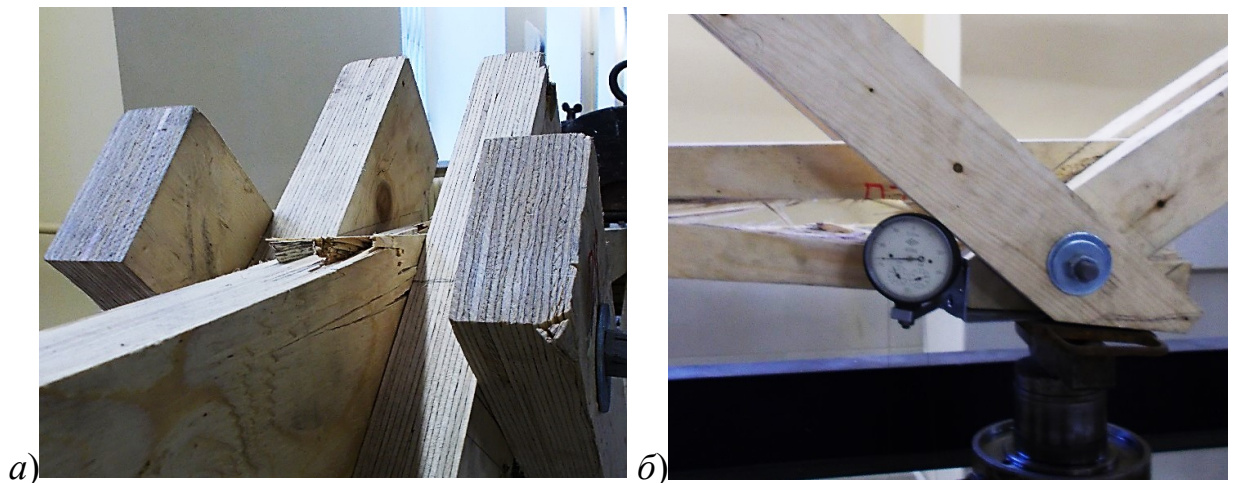


Рисунок 4.32. Узлы разрушенной конструкции фермы: *а)* нижний пояс (место установки П8) *б)* верхний пояс (место установки П7).

Распределение нагрузок в стержнях фермы на симметричной части конструкции в зависимости от уровня нагружения узлов приведено на Рисунке 4.33. Упругие деформации наблюдались во всем диапазоне нагрузок. Градиент продольных деформаций в нижнем поясе превышал поперечные деформации в 3,9 раза. В ходе испытаний выхода из строя измерительного оборудования замечено не было.

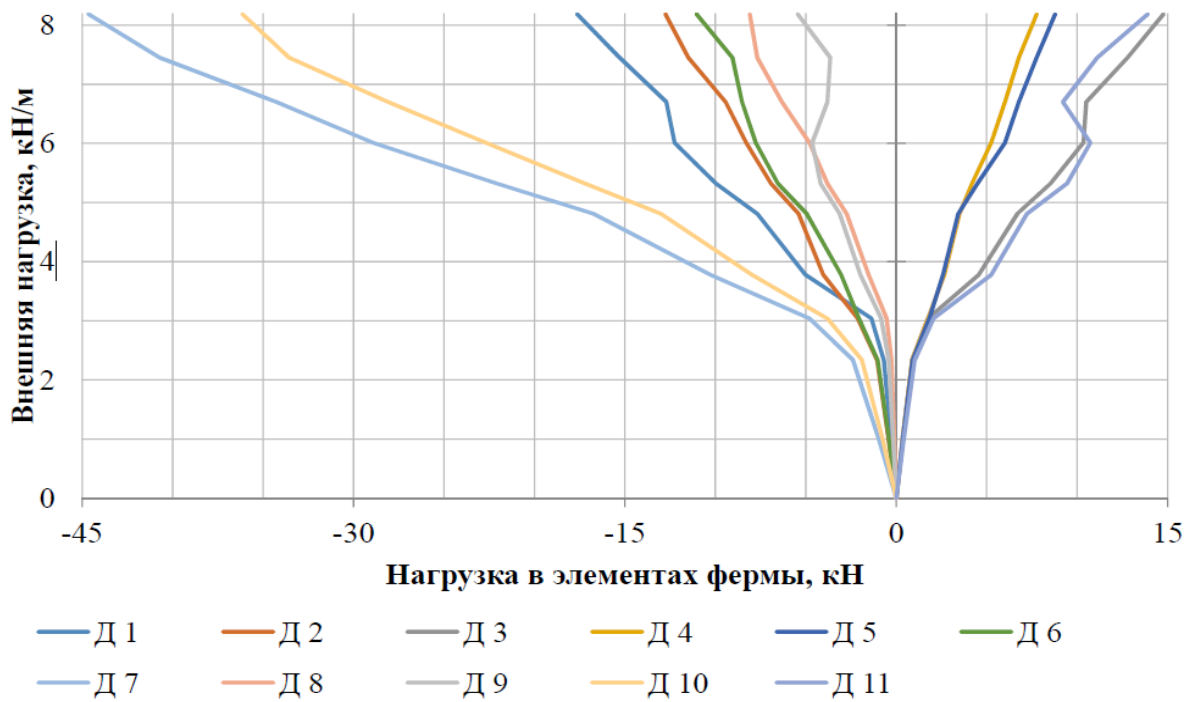


Рисунок 4.33. Распределение нагрузок в стержнях фермы на части конструкции в зависимости от уровня внешней нагрузки.

Для опорного узла А относительные деформации элементов приведены на Рисунке 4.34. В элементах раскосов возникали сжимающие деформации, которые в среднем составили $0,000879 \mu \text{ мм/мм}$. В элементе нижнего пояса были замечены растягивающие деформации, составляющие $0,000863 \mu \text{ мм/мм}$. В среднем при увеличении нагрузки на 1 кН/м на ферму, элементы раскосов деформировались на $0,000107 \mu \text{ мм/мм}$, а нижний пояс на $0,000106 \mu \text{ мм/мм}$.

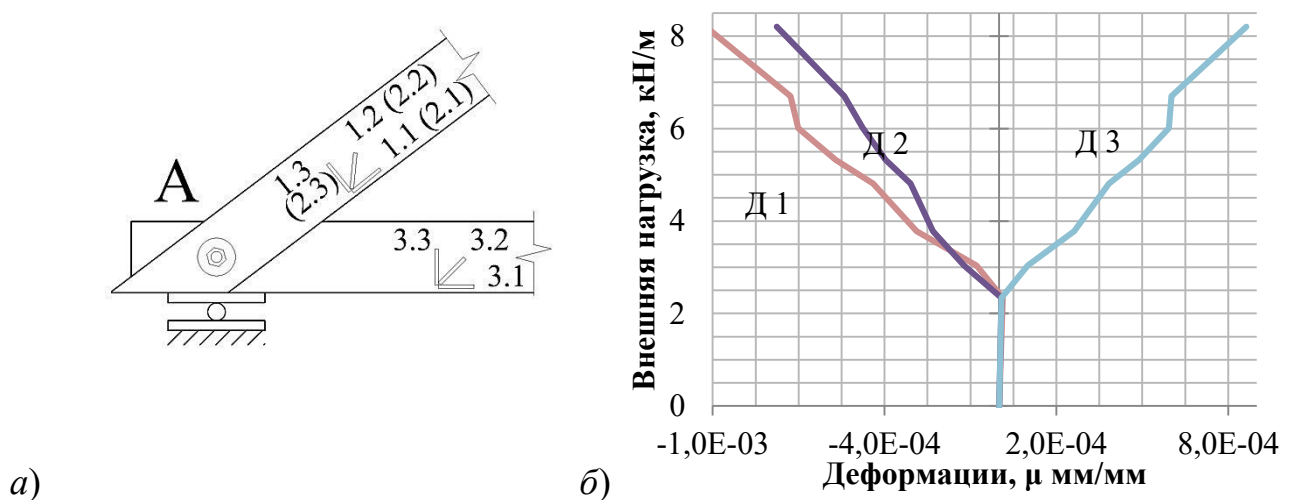


Рисунок 4.34. Узел А: а) схематическое отображение расположения датчиков в узле А, б) относительные деформации элементов фермы для узла А.

Для карнизного узла Б относительные деформации элементов приведены на Рисунке 4.35. В крайних раскосах конструкции возникали сжимающие деформации, которые в среднем составили $0,000893 \mu \text{ мм/мм}$. В элементах раскосов, соединяющих узлы Б и Г замечены растягивающие деформации, составляющие в среднем $0,000491 \mu \text{ мм/мм}$. Элемент верхнего пояса был сжат на $0,0027 \mu \text{ мм/мм}$. По сравнению с элементами решетки градиент развития деформаций верхнего пояса был больше. Для него скорость деформирования больше скорости деформирования крайних раскосов в 2,65 раза.

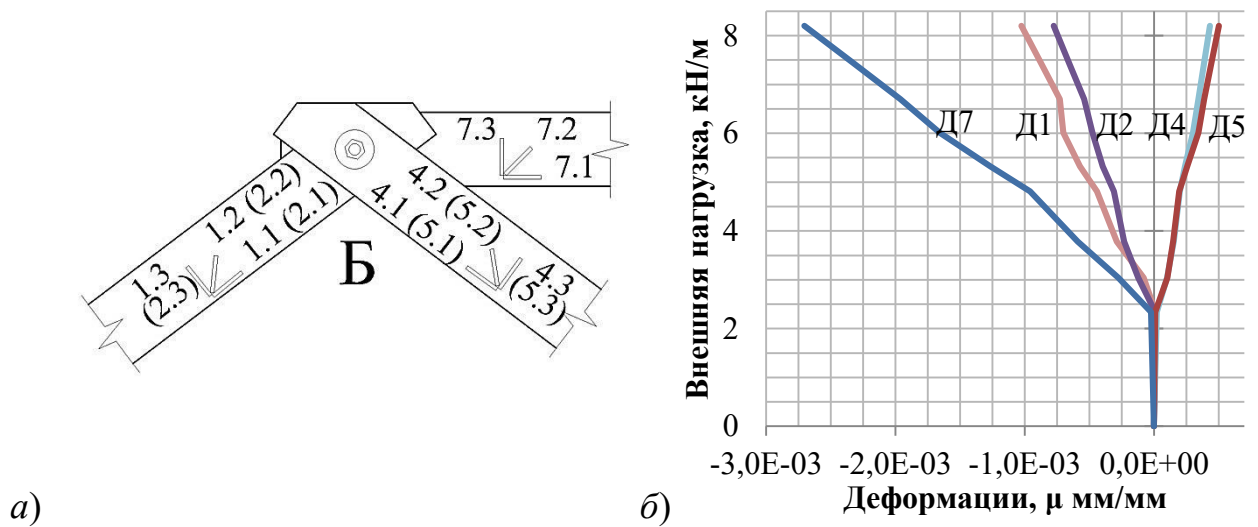


Рисунок 4.35. Узел Б: а) схематическое отображение расположения датчиков в узле Б, б) относительные деформации элементов фермы для узла Б.

Относительные деформации элементов для узла В сжатого пояса приведены на Рисунке 4.36. В элементах верхнего пояса конструкции возникали сжимающие деформации, которые в среднем составили $0,00245 \mu \text{ мм/мм}$. В стойке возникли сжимающие деформации, составляющие $0,000549 \mu \text{ мм/мм}$.

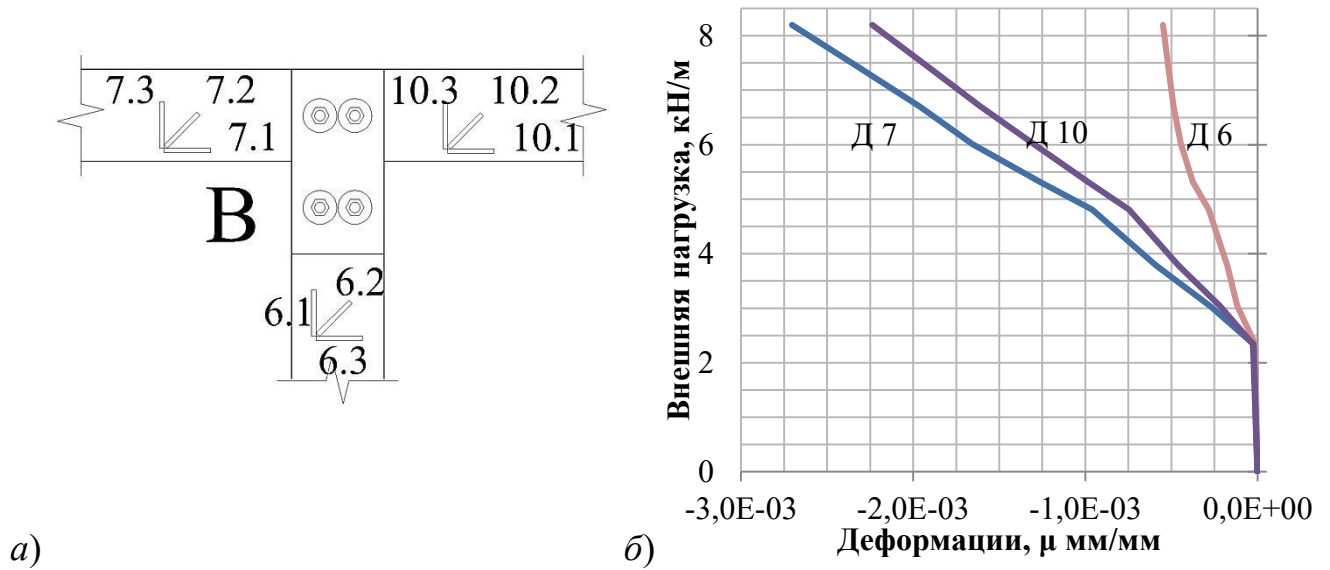


Рисунок 4.36. Узел В: а) схематическое отображение расположения датчиков в узле В, б) относительные деформации элементов фермы для узла В.

Для узла Г нижнего пояса относительные деформации элементов представлены на Рисунке 4.37. В раскосах, соединяющих узлы Г и Д возникали сжимающие деформации, которые в среднем составили $0,000516 \mu \text{ мм/мм}$. Разница между показаниями ветвей этих раскосов объясняется неравномерным перераспределением нагрузок, ввиду малых усилий в данных стержнях, которых недостаточно для равномерной обжимки узлов. В нижнем поясе по центру конструкции возникают растягивающие деформации, составляющие $0,000741 \mu \text{ мм/мм}$. По сравнению с элементами верхнего пояса градиент развития деформаций нижнего пояса был ниже. Для него скорость деформирования ниже скорости деформирования элементов верхнего пояса в 3,3 раза.

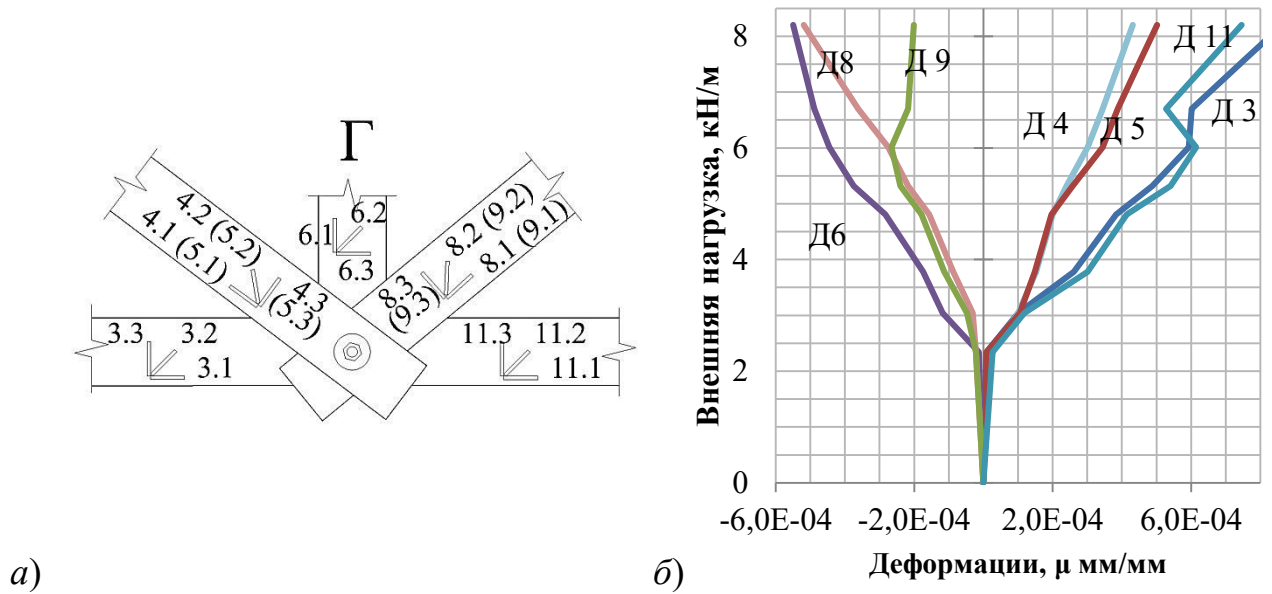


Рисунок 4.37. Узел Г: а) схематическое отображение расположения датчиков в узле Г, б) относительные деформации элементов фермы для узла Г.

Для узла Д верхнего пояса результаты измерений относительных деформаций элементов представлены на Рисунке 4.38. По сравнению с элементами верхнего пояса градиент развития деформаций раскосов данного узла был ниже. Для них скорость деформирования ниже скорости деформирования элемента верхнего пояса в 4,1 раза.

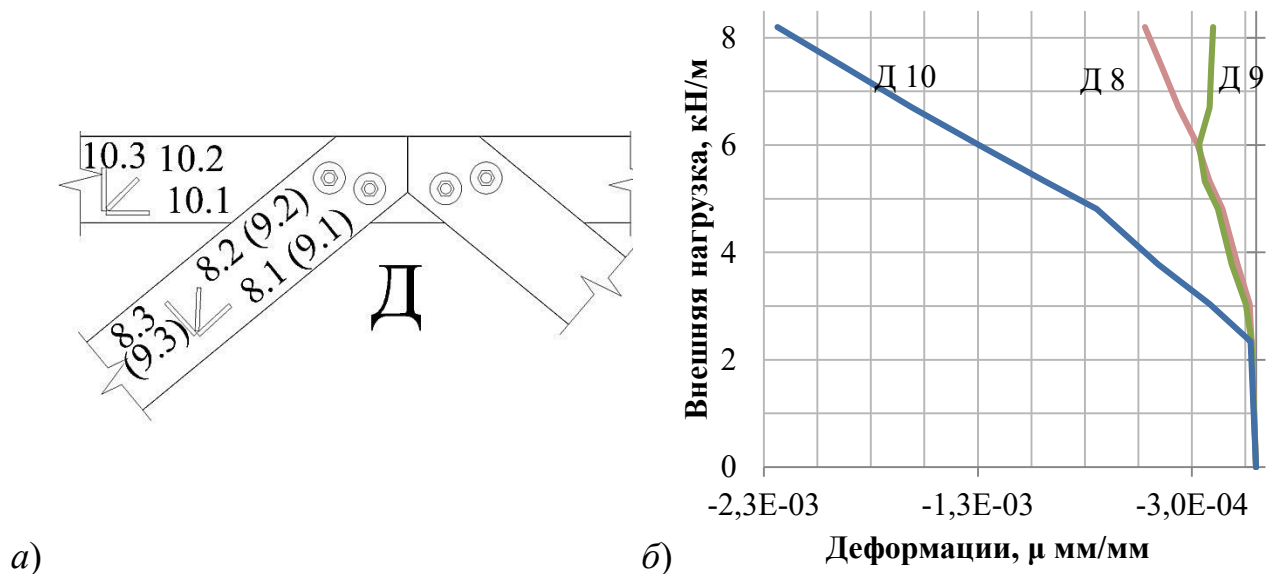


Рисунок 4.38. Узел Д: а) схематическое отображение расположения датчиков в узле Д, б) относительные деформации элементов фермы для узла Д.

Разрушение узлов характерно для хрупкого типа разрушения. Время приведенного действия нагрузки t :

$$t=0,02t'_1+t_2=0,02\cdot 21900+720=1158 \text{ сек},$$

где t'_1 – время доведения нагрузки до разрушающей величины, t_2 – время, в течении которого конструкция выдерживала разрушающую нагрузку.

Коэффициент безопасности для хрупкого разрушения K_{xp} для оценки несущей способности испытанной конструкции вычислен по формуле:

$$K_{xp}=1,25\cdot(1,88-0,106 \lg t) = 1,25\cdot(1,88-0,106 \lg(1158))=2,302.$$

По результатам испытаний отношение уровня разрушающей нагрузки I_t к расчетной P_{II} составило:

$$I_t/P_{II} = 15,48/6,68 = 2,317,$$

что больше вычисленного коэффициента безопасности ($2,317 > 2,302$). Для конструкций с вдавливаемыми элементами соединений, таких как фермы с когтевыми шайбами, рекомендуется выполнять проверку на выполнение условий [71]:

$$P_{I-II}/P_{II}=9,67/6,68=1,448 > 1,2.$$

Так как конструкция выдерживала разрушающую нагрузку I_t в течении времени t , то длительная несущая способность I_T для расчетного срока эксплуатации 50 лет найдется как:

$$I_T = \frac{I_t}{B - C \lg t} = \frac{15,48}{2,1 - 0,12 \lg 1158} = 8,94 \text{ кН/м};$$

где B , C постоянные коэффициенты для определения длительной прочности. Величина длительной нагрузки выше расчетной в 1,33 раза.

В механической лаборатории СПбГАСУ ранее проводились исследования конструкций ферм из *LVL* с использованием нагельных соединений [37]. Сопоставляя эпюры прогибов нижнего пояса испытываемой данной конструкции и фермы, испытанной в работе [37], можно отметить повышенную жесткость фермы с когтевыми шайбами в отличие от конструкции с соединениями на нагелях при

уровне нагрузки до 8,19 кН/м. В среднем, узлы фермы на когтевых шайбах сместились на 9,5% меньше, чем аналогичная ферма при одинаковых нагрузках.

4.5 Сравнение расчетных и экспериментальных результатов несущей способности фермы

Предлагаемой методикой расчета предусмотрено проведение расчета стержневых конструкций с учетом снижения прочности соединений во времени, возможности образования пластического шарнира в когтях шайбы и нагеле с использованием метода конечных элементов. Алгоритм расчета соединений приведен в Главе 2.

Расчетная схема для рассчитываемой конструкции задавалась из учета реальных условий проведения эксперимента. Так, например, верхний и нижний пояса фермы заданы неразрезными стержнями, а присоединение раскосов и стоек закрепляются шарнирно. Расчетная схема представлена на Рисунке 4.40.

Для расчета были приняты следующие характеристики соединительных элементов: диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш.} = 75$ мм, толщина металла когтевой шайбы $t = 1,2$ мм, высота когтя $h = 7,5$ мм, ширина когтя $b = 7$ мм, модуль упругости металла когтевой шайбы $E = 203000$ МПа, расчетное сопротивление изгибу когтя шайбы $R_u = 490$ МПа, диаметр нагеля $d = 16$ мм, модуль упругости металла нагеля $E = 208000$ МПа, расчетное сопротивление изгибу нагеля $R_u = 280$ МПа. Определение прочностных характеристик для элементов фермы из *LVL* принято по формулам (3.28-3.29) Главы 3 данной работы с учетом времени приложения усилия, соответствующему кратковременному загрузению.

Были определены усилия и деформации в элементах конструкции, без учета податливости узлов, при передаче нагрузки за этап 4,81 кН/м (1 случай), и 7,45 кН/м (2 случай).

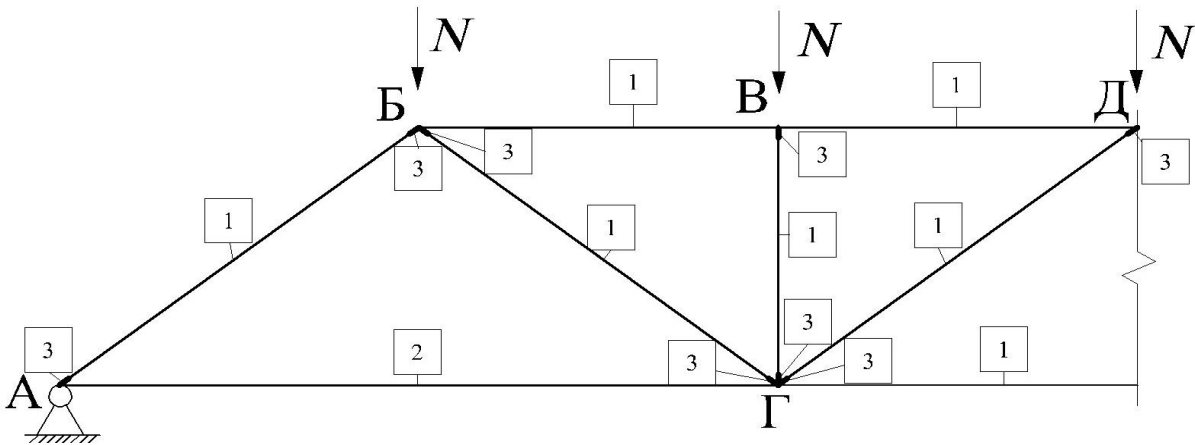


Рисунок 4.40. Расчетная схема конструкции фермы: узлы обозначены буквенными символами, номер типа конечных элементов обведен в рамку.

Сечения элементов были проверены на прочность по существующим нормативам [90]. Определена величина передаваемых усилий S на каждый узел. Исходя из существующей расстановки соединителей в узлах были получены значения эквивалентных усилий восприятия срезом соединителей $S_{\text{экр}}$ для каждого узла. Далее выполнялся расчет каждого узла с приложением начального усилия N_{01} с последующим догружением до расчетной нагрузки с заданным шагом. При выполнении расчетов на каждом этапе нагружения контролировалось соблюдение условий (2.46). При достижении условий возникновения пластических шарниров в когтях шайбы изменялись начальные условия, при которых угол поворота сечения когтя $\varphi_0 \neq 0$. Когда достигались условия (2.21, 2.22, 2.50) уровень нагрузки N_n для нагеля или когтя шайбы принимался как максимально допустимый. Затем уровни нагрузки N_n для когтей шайбы складывались, образуя $N_{\text{к.ш.}}$. Также определялось максимальное усилие и соответствующие деформации для нагеля.

Для нагеля и когтевой шайбы были получены жесткости по выражениям (2.64-2.71), используя расчетное значение деформации Δ . Несущая способность нагеля $N_{\text{наг}}$ и когтевой шайбы $N_{\text{к.ш.}}$ складывались, образуя F_{vRk} . Выполнялась проверка неравенства $F_{\text{vRk}} \geq S_{\text{экр}}$. Затем определялись фактические деформации, возникающие в расчетном узле.

Результаты перемещений узлов для верхнего и нижнего поясов приведены в Таблице 4.7. Эпюры прогиба для экспериментальных и расчетных значений приведены на Рисунках 4.41-4.42.

Таблица 4.7. Сопоставление результатов эксперимента и расчетов.

№ прогибомера	Экспериментальное значение прогибов, мм		Теоретическое значение прогибов, мм		Сходимость результатов, %	
	4,81 кН/м	7,45 кН/м	4,81 кН/м	7,45 кН/м	4,81 кН/м	7,45кН/м
П1	2,575	6,23	4,367	6,904	41,04	9,76
П2	0	0	0	0	0,00	0
П3	3,95	12,63	8,725	13,795	54,73	8,45
П4	5,15	14,09	8,704	13,761	40,83	-2,39
П5	4,815	13,03	9,562	15,118	49,64	13,81
П6	3,963	10,58	8,725	13,795	54,58	23,31
П7	2,785	5,75	4,367	6,904	36,23	16,71
П8	4,03	13,69	8,704	13,761	53,70	0,52
П9	0	0	0	0	0	0

Из Таблицы 4.7 и Рисунков 4.41 – 4.42 видно, что разница между теоретическими и экспериментальными значениями для уровня нагрузки 4,81 кН/м отличается на 35-50%, что вызвано особенностью методики расчетов для зоны упругих деформаций при малом времени загрузки (до 24 часов). Для уровня нагрузки 7,45 кН/м заметна разница в результатах от 1% до 23%, что является удовлетворительной сходимостью результатов. В прогибомерах П3 и П7 для уровня нагрузки 4,81 кН/м наблюдается разница в экспериментальных показаниях 25-29% между собой (несимметричная картина прогибов), что может являться следствием неравномерного включения в работу элементов фермы ввиду недостаточного уровня нагрузки для уплотнения гнезд соединений. Для уровня нагрузки 7,45 кН/м для прогибомера П6 также наблюдается расхождение с теоретическими значениями в 23%, что может являться следствием дефекта изготовления элементов конструкции, неточностью сборки конструкции или неравномерностью передачи усилий от нагружающего пресса *Amsler*. Следствием одной из этих причин может объясняться неравномерность деформаций остальных узлов конструкции.

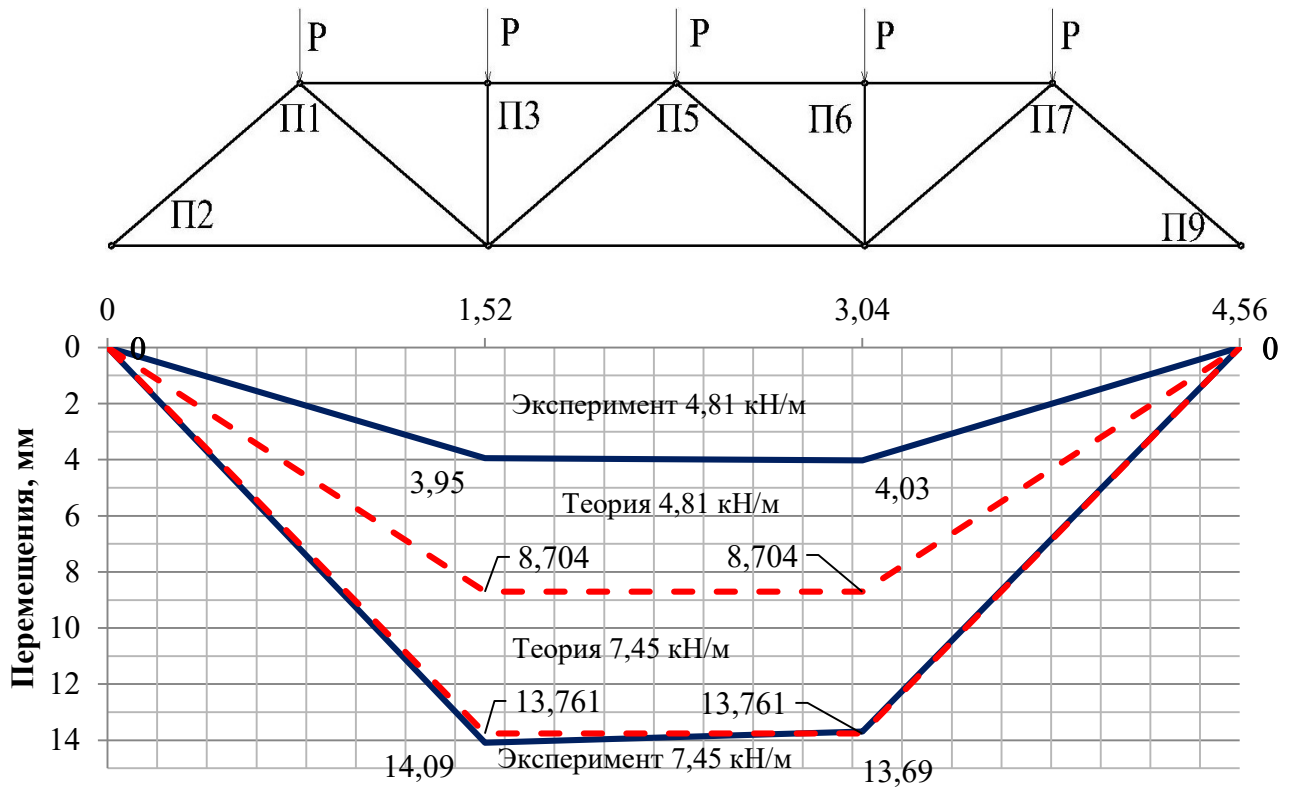


Рисунок 4.41. Экспериментальные и теоретические эпюры прогибов узлов нижнего пояса фермы.

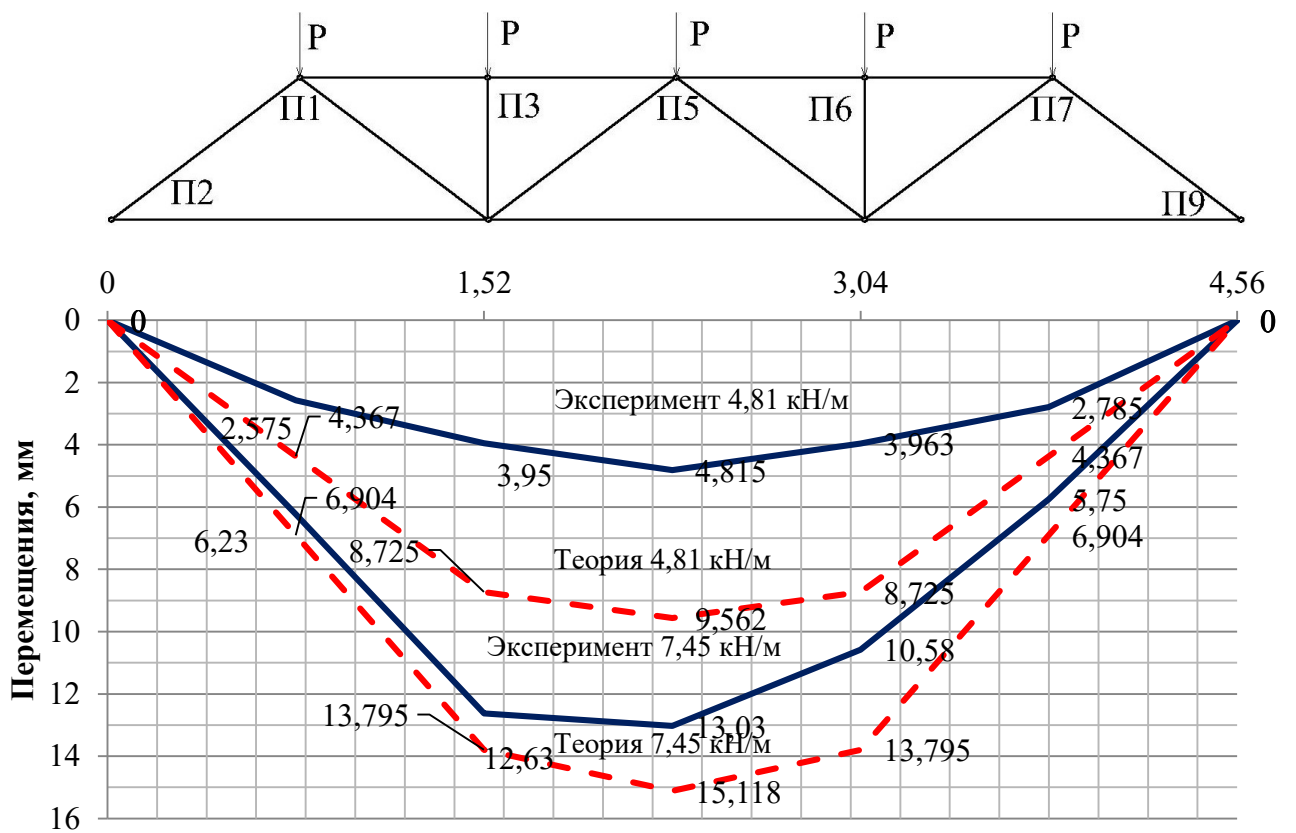


Рисунок 4.42. Экспериментальные и теоретические эпюры прогибов узлов верхнего пояса фермы.

Таким образом, в ходе экспериментальных и теоретических исследований были выявлены и сопоставлены деформации узлов конструкции фермы из клееного однонаправленного бруса с использованием когтевых шайб. Точность расчета предлагаемой методики в области действия усилий N_{I-II} является приемлемой для применения при проектировании аналогичных конструкций.

4.6 Выводы по главе

1. Определено изменение несущей способности при изменении толщин соединяемых элементов. Изменения толщины элементов *LVL* учитывается коэффициентом k_t при толщинах элементов $3h_e \leq t_{min} < 5,25h_e$.

2. Подтверждена корректность используемой зависимости прикладываемого крутящего момента и получаемых угловых смещений. Сходимость результатов расчетов и эксперимента составили 90-94%.

3. Установлено, что использование ядра мгновенного деформирования $K_0(t)$ позволяет учитывать влияние комплекса факторов и описывать характер изменения кривой ползучести соединений *LVL* с когтевыми шайбами во времени. Определена сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований при длительном нагружении соединений в 84-91%.

4. Оценена технологичность возведения конструкций ферм из *LVL* с использованием когтевых шайб. Трудоемкость изготовления конструкции фермы составила 1,167 чел.·час на 1 пог. м пролета конструкции.

5. Подтверждена высокая прочность и жесткость ферм из *LVL* с когтевыми шайбами по результатам экспериментального исследования. Разрушение испытываемой конструкции произошло от раскалывания узлов при нагрузках, в 2,317 раза превышающих расчетные, что больше необходимого коэффициента безопасности ($K_{xp} = 2,304$). При достижении расчетного усилия $\Pi_n = 6,68$ кН/м прогиб фермы составил 1/484 от пролета. Перераспределения в

элементах фермы начинают возникать при уровне нагрузок 6,68 кН/м, при перемещении узлов конструкции в среднем на 9,5 мм.

6. Определена величина длительной нагрузки по результатам испытаний соединений *LVL* с когтевыми шайбами. Длительная нагрузка выше расчетной в 1,33 раза.

7. Установлена сходимость результатов экспериментальных и теоретических исследований в 78-98%. Доказана пригодность теоретической модели для использования в инженерной практике.

8. Разработана полезная модель прессы для соединений с когтевыми шайбами (№146232), повышающая надежность соединений и увеличивающая производительность их сборки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований и результатов диссертационной работы возможно сформулировать основные итоги:

1. Разработана методика расчета деревянных конструкций с соединениями на когтевых шайбах с учетом кратковременных и длительных нагрузок, с применением уравнений наследственности. Разработана математическая модель, позволяющая вычислить НДС конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами с учетом возможных смещений в узлах во времени.

2. Уточнены прочностные свойства материалов элементов соединений. Получены уравнения наследственности при действии длительного нагружения, определяющие развитие деформативности материала во времени с учетом его влажности, найдены коэффициенты постели *LVL* от действия треугольным и цилиндрическим штампами, определены характеристики длительной прочности *LVL*.

3. Осуществлены экспериментальные и теоретические исследования соединений *LVL* с когтевыми шайбами на действие продольного, поперечного усилия и изгибающего момента, при этом расхождения теоретических и экспериментальных значений составили 6-16%. Определено НДС соединений при изменении толщин элементов *LVL* и габаритов когтей шайбы, предложен корректирующий коэффициент k_t , увеличивающий точность расчетов предложенной методики на 5%.

4. Разработана модель деревянной конструкции фермы из *LVL* с когтевыми шайбами. Произведены экспериментальные исследования жесткости и несущей способности. Коэффициент запаса конструкции составил 2.317. При достижении расчетного усилия прогиб составил 42% от допустимого значения.

5. Произведена апробация разработанной методики расчёта. Результаты натурных испытаний фермы с параллельными поясами из *LVL* с когтевыми шайбами показали сходимость с расчётными значениями НДС 88-91% элементов конструкций. Предложены практические рекомендации по проектированию деревянных конструкций из *LVL* с использованием когтевых шайб.

Рекомендации по проектированию

1. При совместном использовании конструкций ферм из *LVL* и когтевых шайб обосновано применение дощатых элементов, ввиду равнопрочного распределения усилий элементами и узлами конструкций. Так как многосрезные соединения с когтевыми шайбами имеют высокую несущую способность при использовании ферм на больших пролетах обосновано использование многоветвевых элементов.

2. Слабонагруженные элементы решетки фермы допустимо выполнять из деревянных элементов, а в слабонагруженных узлах возможно использование когтевых шайб меньших диаметров или, рекомендуется, использовать расчетное количество нагелей без когтевых шайб.

3. При сборке конструкций обосновано использование средств механизации труда для увеличения производительности производства. Многонагельные соединения конструкций с использованием когтевых шайб могут изготавливаться с использованием универсального пресса, предложенного автором данной работы (Авторское свидетельство №146232). Предлагаемый пресс позволяет повысить надежность соединения за счет обеспечения равномерной передачи усилий запрессовки и их равномерного распределения по поверхности соединяемых деревянных конструкций, что позволяет обеспечить запрессовку деревянных конструкций одновременно несколькими парами когтевых шайб. Пресс обеспечивает сохранение усилий запрессовки до завершения производства работ по сплачиванию элементов деревянных конструкций.

4. Шаг расстановки когтевых шайб в конструкциях из *LVL* рекомендуется принимать вдоль волокон $2 d_c$, поперек волокон $1,2 d_c$, до ненагруженного края $1 d_c$.

5. Соединения с когтевыми шайбами в конструкциях из *LVL* не рекомендуется использовать в химически агрессивной среде.

6. Ввиду скрытности когтевых шайб внутри тела древесины к ним не могут применяться пожарные ограничения, накладываемые к открытым металлическим соединителям.

7. Соединения с когтевыми шайбами не рекомендуются к совместному использованию с глухарями, дюбелями с постановкой с двух сторон, ввиду необходимости закрепления узла цельным соединителем и недопущения раскрытия стыка соединяемых элементов.

8. Не рекомендуется использование нарезной шпильки по DIN975 в качестве нагелей в соединениях *LVL* с когтевыми шайбами, ввиду возникновения большей податливости в соединениях, по сравнению с гладкой шпилькой по ГОСТ 22042-76*.

9. В узлах нагельных соединений *LVL* с когтевыми шайбами рекомендуется использование принципа дробности для уменьшения опасности возникновения скалывающих напряжений путем рассредоточения большего числа соединителей меньшей несущей способности.

10. При проектировании и изготовлении ферм из *LVL* с когтевыми шайбами обосновано использование строительного подъема $l/200$.

11. Для повышения экономического эффекта от использования когтевых шайб в конструкциях из *LVL* обосновано использование максимального количества когтевых шайб на 1 соединительный нагель.

12. Наиболее рациональным соотношением толщин элементов и высоты когтей шайбы является использование соотношения $t = 5,25 h_e$, при котором наиболее просто осуществляется равнопрочность сечений элементов конструкций и узла соединения.

13. Когтевые шайбы рекомендуются к использованию при усилении и реконструкции деревянных конструкций, когда есть доступ к рабочей поверхности сверху или снизу реконструируемого элемента.

14. При выполнении работ по устройству когтевых шайб в проектное положение рекомендуется оформлять акт скрытых работ.

Список сокращений и условных обозначений

НДС – напряженно-деформированное состояние.

LVL – Laminated veneer lumber (брус клееный из шпона).

Список литературы

- 1 Авдеев А. В., Миронов В. Г. Влияние влажности древесины на несущую способность соединений на металлических зубчатых пластинах / Авдеев А. В., Миронов В. Г. // Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «строительные конструкции - 2000». Часть 3. «Конструкции из дерева и пластмасс. Строительная механика». МГСУ. М., 2000, 17-23 с.
- 2 Ашкенази Е. К. Прочность анизотропных древесных и синтетических материалов./ Ашкенази Е. К.; М.: Лесная промышленность, 1966. – 166 с.
- 3 Барков М. С. Совершенствование узловых сопряжений деревянных элементов через упоры переменной жесткости для большепролетных ферм: дисс.. канд. техн. Наук:05.23.01/ Барков М. С.; Томск, 2013 г., 182 стр.
- 4 Волков И. К. Интегральные преобразования и операционное исчисление: учеб. для вузов. 2-е изд. / Волков И. К., Канатников А. Н.; М. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 228 с.
- 5 Глухих, В.Н. Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины / В.Н. Глухих, А.Г. Черных, Е.В. Данилов. // СПбГАСУ, – 2018. — С. 302.
- 6 Горшков А.Г. Теория упругости и пластичности / Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В.; ФИЗМАТЛИТ, М., 2011 - 416 стр.
- 7 ГОСТ 11701-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент.; введ. 01.01.1984. – М.: Изд-во стандартов, 1984 г., 15 с. - (Межгосударственный стандарт).
- 8 ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. введ. 01.01.1984. – М.: Изд-во стандартов, 1986 г., 29 стр. (Межгосударственный стандарт).
- 9 ГОСТ 16483.24-73*. Древесина. Метод определения модуля упругости при сжатии вдоль волокон. Взамен ГОСТ 11499-65 часть Б.; введ. 01.01.1975. – М.: Изд-во стандартов, 1999 г., 12 с. - (Межгосударственный стандарт)
- 10 ГОСТ 16483.2-70*. Древесина. Метод определения условного предела прочности при местном смятии поперек волокон. Взамен ГОСТ 11492-65 часть Г.; введ. 01.01.1971. – М.: Изд-во стандартов, 1999 г., 7 с. - (Межгосударственный стандарт).
- 11 ГОСТ 16483.7-71. Древесина. Методы определения влажности. Взамен ГОСТ 11486-65; введ. 01.01.1973. – М.: Изд-во стандартов, 2006 г., 8 с. - (Межгосударственный стандарт).
- 12 ГОСТ 16483.9-73* Древесина. Методы определения модуля упругости при статическом изгибе. Взамен ГОСТ 16483.9-72; введ. 01.07.1974. – М.: Изд-во стандартов, 1999 г., 9 с. - (Межгосударственный стандарт).
- 13 ГОСТ 168483.10-73* Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. Взамен ГОСТ 116483.10-72; введ. 01.07.1974. – М.: Изд-во стандартов, 1999 г., 7 с. - (Межгосударственный стандарт).
- 14 ГОСТ 380-94 - Сталь углеродистая обыкновенного качества. введ. 01.01.1998. – М.: Изд-во стандартов, 1997 г., 8 с. - (Межгосударственный стандарт).

- 15 Пат. 146232 Российская Федерация, МПК В27F 7/09. Устройство для запрессовки когтевых шайб / Данилов Е. В., Гимельфарб И. А., Крупин Е.В., Черных А. Г.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО СПбГАСУ - 2014123970/13 заявл. 2014.06.10
- 16 Данилов, Е. В. Исследование длительной прочности LVL при смятии цилиндрическим штампом / Данилов, Е. В. // Вестник гражданских инженеров — 2014 г., — № 4 (45). С. 38–42.
- 17 Данилов, Е. В. Исследование кратковременной прочности LVL при смятии треугольным штампом / Данилов, Е. В. // Вестник гражданских инженеров — 2014. — № 1 (42). — С. 28–33.
- 18 Данилов, Е. В. К расчету прочности соединений на когтевых пластинах. [Электронный ресурс]/ Данилов Е. В. // Режим доступа: <http://www.npadd.ru/page/3010-k-raschetu-prochnosti-soedineniy-na>, свободный. – Загл. с экрана.
- 19 Данилов, Е. В. Определение сопротивления давлению на внутреннюю поверхность отверстия и коэффициента балластной постели для цельной древесины и клееного бруса «Ultralam». / Данилов, Е. В. // Тезисы I-ой международной конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Инновационные технологии строительства». СФУ. – 2011. – С. 38-44.
- 20 Данилов, Е. В. Исследование крутильной жесткости соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из клееного бруса. / Данилов, Е. В. Пониткова Д. И., Подболоцкая А. С.// Сборник докладов «Актуальные проблемы современного строительства». СПбГАСУ, Санкт-Петербург, – 2014. - № – С. 65-71.
- 21 Данилов, Е. В. Расчет зуба когтевой шпонки как балки на упругом основании. / Данилов, Е. В. // Сборник научных трудов XVII международного симпозиума «Современные строительные конструкции из металла и древесины». Одесса. – 2013. – с. 98-104.
- 22 Данилов, Е. В. Экспериментальное исследование прочности деревянной фермы из однонаправленного клееного бруса с использованием когтевых шайб / Е. В. Данилов // Материалы 9-й Международной научно-практической конференции СПбГАСУ. «Инновации в деревянном строительстве», – 2018. — С. 37–43.
- 23 Данилов, Е. В., Черных А. Г. Методы исследования соединений деревянных конструкций на когтевых шпонках [Эл. ресурс] / Современные проблемы науки и образования// –2013 г., – № 2.
- 24 Данилов, Е.В. к вопросу об НДС нагельных соединений из LVL. /Данилов Е.В. // Сборник научных трудов, посвященный 180-летию СПбГАСУ. СПбГАСУ, Санкт-Петербург, – 2012 г. – С. 54-57.
- 25 Данилов, Е.В. Определение прочности и базовых величин для соединений на металлических пластинах типа «Bulldog» для цельной древесины и клееного бруса «Ultralam». /Данилов Е.В. // Сборник докладов «Актуальные проблемы современного строительства». СПбГАСУ, Санкт-Петербург, – 2012 . - С. 41-46.
- 26 Данилов, Е.В. Расчет зуба когтевой шпонки как балки на упругом

- основании. /Данилов Е.В. // Сборник докладов «Актуальные проблемы современного строительства». СПбГАСУ, Санкт-Петербург, – 2013. – С. 45-50.
- 27 Дмитриев П. А. Исследование длительной несущей способности соединений деревянных элементов на стальных цилиндрических нагелях. / Дмитриев П. А.; Известия вузов. Строительство и архитектура №5, 1973г. – С. 28-35.
- 28 Дмитриев П. А. Исследование прочности древесины на смятие в отверстиях поперек волокон при действии кратковременных и длительных нагрузок. / Дмитриев П. А. Стрижаков Ю. Д. // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1969, №7, С. 22-28.
- 29 Дмитриев П. А. Исследование смятия древесины в отверстии с помощью оптически чувствительных покрытий. / Дмитриев П. А., Жилкин В. А., Стрижаков Ю. Д. // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1971, №2 - С. - 18-24.
- 30 Дмитриев, П.А. Исследование деревянных элементов на дюбелях при действии кратковременных нагрузок / П.А. Дмитриев, Ю.Д. Стрижаков // Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1969. — №8. — С 41-49 .
- 31 Дмитриев, П.А. Исследование прочности древесины на смятие в отверстии поперек волокон при действии кратковременной и длительной нагрузок / П.А. Дмитриев, Ю.Д. Стрижаков // Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1967. — №7. — С 28-35.
- 32 Дмитриев, П.А. Исследование прочности древесины на смятие в отверстии при кратковременном и длительном действии нагрузки / П.А. Дмитриев // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1965. — №12. — С. 165-172.
- 33 Дмитриев, П.А. Исследование работы и расчет сопряжений деревянных элементов под углом на нагелях из круглой стали / П.А. Дмитриев // Сборник тр. Моск. инж.-строит. института. 1953. — №13. - С.47-51.
- 34 Дмитриев, П.А. Пространственные индустриальные конструкции для покрытий и зданий/ П.А. Дмитриев, В.И. Жаданов, И.С. Инжутов, Ю.Д. Стрижаков // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1989. № 2. — С. 23-27.
- 35 Дурновский А. М. Разработка и исследование соединений деревянных конструкций металлическими зубчатыми пластинами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Дурновский А. М.; М. 1982. - 22 с.
- 36 Ермолаев В. В. Влияние влажности древесины на длительную прочность и ползучесть соединений строительных конструкций на металлических зубчатых пластинах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 /Ермолаев В.В.; Казань, 2009, - 20 с.
- 37 Животов Д. А. Применение бруса, клееного из однонаправленного шпона, в плоских балочных фермах: Дисс.. канд. техн. наук. – СПб, 2009. -170 стр.
- 38 Иванов Ю. М. Вопросы прочности и изготовления деревянных конструкций. / Иванов Ю. М. // М., Госиздат по строительству и архитектуре, 1952. - 264 с.
- 39 Иванов Ю.М. Длительная несущая способность деревянных конструкций / Иванов Ю. М.; Известия вузов. Строительство и архитектура, 1972, №11, С.6 -12.
- 40 Иванов Ю.М. Длительная прочность древесины / Иванов Ю.М.; Известия

- вузов. Лесной журнал, 1972, №4, С.76-82.
- 41 Иванов Ю.М. Исследовательские работы по древесине и деревянным конструкциям в Англии / Иванов Ю.М.; М.: ЦНИИИТЭИ леспрома, 1966 — 34 с.
 - 42 Иванов Ю.М. О предельных состояниях деревянных элементов соединений и конструкций / Иванов Ю.М. // М., Стройиздат, 1947. — 99 с.
 - 43 Иванов Ю.М. Основные принципы испытания клееных деревянных конструкций /Иванов Ю. М.; Деревообрабатывающая промышленность, 1974, №2, С.10-12.
 - 44 Иванов Ю.М. Предел пластического течения древесины /Иванов Ю. М.; М.-Л., Стройиздат, 1948.
 - 45 Иванов Ю.М. Работа древесины под действием повторной статической нагрузки /Иванов Ю. М.; Исследования по деревянным конструкциям. -М., 1950, с.6-27.
 - 46 Иванов Ю.М. Современное состояние исследований длительного сопротивления древесины /Иванов Ю.М.; Исследование прочности и деформативности древесины. - М., Стройиздат, 1956, С.42-55.
 - 47 Иванов Ю.М. Исследование физических свойств древесины (эластичность, воздухопроницаемость, давление набухания). / Иванов Ю.М., Баженов В.А. // М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959. - 75с.
 - 48 Котлов В. Г. Пространственные конструкции из деревянных ферм с узловыми соединениями на МЗП : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 /Котлов В. Г.; Казань, 1992, 16 стр.
 - 49 Коченов В. М. Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций – М.: Стройиздат, 1953.-319с.
 - 50 Крицин А. В. Расчет сквозных деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах с учетом упруго-вязких и пластических деформаций: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 /Крицин А. В.; Нижний Новгород. - 2004. - 180 с.
 - 51 Лабудин Б. В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой, дис. ... д-тр. техн. наук: 05.23.01 /Лабудин Б. В.; Архангельск, 2007, - 267 с.
 - 52 Лабудин Б.В. Металлодеревянные фермы: учеб. пособие / Лабудин Б.В., Гурьев А. Ю., Каратеев Л. П., Мамедов Ш. М. // САФУ-СПбГАСУ. – СПб: Свое издательство 2015. - 206 с.
 - 53 Леннов В. Г. Индустриальные деревянные фермы на когтевых шайбах, дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01, Горький, 1941 г., 289 с.
 - 54 Лоскутова Д. В. Прочность и деформативность узловых соединений на МЗП в сквозных деревянных конструкциях: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 /Лоскутова Д. В.; Томск, 2009 г., 174 с.
 - 55 Михайлов Б. К. Длительная прочность и деформативность деревянных конструкций на нагельных соединениях /Михайлов Б. К. Шешукова Н. В.; СПб, 2006 г., 159 с.
 - 56 Михайлов Б.К. Метод определения упругих остаточных и полных деформаций элементов деревянных конструкций, проработавших длительное время в зданиях старой постройки, в связи с оценкой ресурса.

- /Михайлов Б. К.; 54-я научная конференция, Санкт – Петербург, 1997. С. 66-72.
- 57 Наумов А. К. Исследование соединений легких деревянных несущих конструкций на металлических зубчатых пластинах: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / М., 1978. – 143 с.
- 58 Никитин Г. Г. Расчет нагельных соединений с учетом деформаций, развивающихся во времени: дисс. ... канд. тен. наук: 05.23.01 – Ленинград, 1964 г. 192 с.,
- 59 Орлович Р.Б. Деформативность упругоподатливых соединений в деревянных конструкциях при длительных воздействиях / Орлович Р.Б, Лабудин Б.В. // Изд. вузов. Лесной журнал. – Архангельск, 1993. (№1). – с.78–82.
- 60 Орлович Р.Б. Деформативность упругоподатливых соединений в деревянных конструкциях при длительных воздействиях / Орлович Р.Б, Лабудин Б.В. // Изв. высш. учеб. заведений. Лесн. журн. 1993. № 1. С. 78-82.
- 61 Орлович Р.Б. Длительная прочность и деформативность конструкций из современных древесных материалов при основных эксплуатационных воздействиях: автореф. дис. ... д-тр. техн. наук: 05.23.01 -Л., ЛИСИ 1991.— 50с.
- 62 Орлович Р.Б. О напряженно-деформированном состоянии увлажненных деревянных элементов при длительном нагружении. /Орлович Р.Б. // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1984, №2, С. 15-19.
- 63 Панферов К. В. Смятие и сжатие деревянных элементов поперек волокон при длительной нагрузке. /Панферов К. В.; Вопросы применения дерева и пластических масс в строительстве. – М., 1960 г., - 216 с.
- 64 Перельмутер А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – 4-е изд., перераб. / Перельмутер А. В., Сливкер В. И. // М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.
- 65 Попов Е.В. Напряженно–деформированное состояние панелей на деревянном каркасе с различными вариантами крепления обшивки / Попов Е.В., Столыпин Д.А., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. / Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции 2016 г. № 5 ч.2 (25–2). Воронеж, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2016. – С. 133–139.
- 66 Попов Е.В. Испытание на сдвиг элементов деревянных конструкций, соединенных с применением зубчатых шайб «Bulldog» / Попов Е.В. , Лабудин Б.В., Мелехов В.И. // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Курск, 2015. С. 189–198.
- 67 Пособие по проектированию деревянных конструкций к СНиП-II-25-80. ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. М., Стройиздат, 1986 г. -261 с.
- 68 Пуртов В.В. Монтаж деревянных конструкций /Пуртов В.В.; Новосибирск, НГАСУ, Сибстрин, 2005.- 72 с.

- 69 Пуртов В.В. Расчёт в программе ANSYS деревянных конструкций с крепёжными элементами повышенной несущей способности / В.В. Пуртов, А.В. Павлик // VII Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018)»: программа и тезисы докладов (Новосибирск, 1–8 июля 2018 г.). – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2018. – С. 72.
- 70 Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. / Работнов Ю.Н. // М., "Наука", 1966.-752 с.
- 71 Рекомендации по испытанию деревянных конструкций / ЦНИИСК. М.: Стройиздат, 1976. - 28 с.
- 72 Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций / под ред. Ю.М. Иванова. ЦНИИСК им. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1981. – 40 с.
- 73 Рекомендации по проектированию и изготовлению деревянных конструкции с соединениями на пластинах с цилиндрическими нагелями / ЦНИИСК им. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1988. – 77 с.
- 74 Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. /Ржаницын А.Р.; М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
- 75 Ржаницын А.Р. Строительная механика: Учеб. пособие для вузов /Ржаницын А.Р.; М.: Высш. школа, 1982. – 400 с.
- 76 Ржаницын А.Р. Теория ползучести. /Ржаницын А.Р.; М.: Стройиздат, 1968. – 415 с.
- 77 Римшин В.И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах /Римшин В. И. [и др.] // Вестник МГСУ. 2016. № 9. С. 35–50.
- 78 РСН 32-81. Временная инструкция расчета деревянных ферм с креплением узлов на металлических зубчатых пластинах: введ. 01.07.1985. Рига, 1981. – 66 с. - (Межгосударственный стандарт).
- 79 Руководство по проектированию клеенных деревянных конструкций. ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР.М., Стройиздат, 1977г.
- 80 Самохина И.А. Исследование ползучести стеклопластиков и конструкций на их основе при некоторых условия загрузки /Самохина И.А.// — М.: 1971. - 18 с.
- 81 Серов Е. Н. Строительные нормы проектирования деревянных конструкций. Состояние, проблемы и перспективы/ Серов Е. Н. [и др.]// Вестник гражданских инженеров №2. СПб. 2012. С. 107-114.
- 82 Серов Е.Н. Prace remontowe cerkwi Przemienienia Pańskiego na wyspie Kizy / Серов Е.Н., Миронова С.И. // «Inżynier Budownictwa», Варшава, 2016, №12, С. 48-52.
- 83 Серов, Е.Н. Проектирование деревянных конструкций / Е.Н. Серов, Ю.Д. Санников, А.Е. Серов.// – М. СПб, 2011. – 536 с.
- 84 Слицкоухов, Ю.В. Исследование работы симметричных соединений элементов деревянных конструкций на нагелях из круглой стали: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. М. - 1955. 147 с.
- 85 Смирнов А.Ф. Расчет сооружений с применением вычислительных машин / Смирнов А.Ф., Александров А.В., Шапошников Н.Н., Лащеников Б.Я.// М., 1964. - 243 с.
- 86 СНиП II-25-80*. Деревянные конструкции. Нормы проектирования Взамен

- СНиП II-V.4-71; введен 01.07.1982. Госстрой СССР.-М.: Стройиздат, 1988. - 31стр.
- 87 Саргсян А. Е. Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности. Основы теории с примерами расчетов. Учебник / А.Е. Саргсян М.: изд-во АСВ, 1998. - 240 с.
- 88 СП 20.13330.2016: Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. – М.: Минрегион России, 2016.– 181 с.
- 89 СП 64.13330-2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. Стройиздат, 2011, - 89 стр.
- 90 СП 64.13330-2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. Стройиздат, 2017, - 97 стр.
- 91 СТАДД – 3.1 – 2011. Стандарт организации. Деревянные конструкции. Требования и методы испытаний. Санкт Петербург, 2011, – 44 с.
- 92 СТАДД - 3.2. – 2011 «Деревянные конструкции. Соединения деревянных элементов с использованием зубчатых пластин. СПб, 2012, - 59 стр.
- 93 СТО 36554501-021-2010. Деревянные конструкции. Многослойный клееный из шпона материал Ultralam (Ультралам). Общие технические требования. М. 2010. - 55 с.
- 94 Стрижаков Ю. Д. Исследование работы и расчет соединений деревянных элементов под углом на нагелях из стеклопластика АГ-С при действии кратковременных и длительных нагрузок: автореф. дисс.. канд. техн. наук:05.23.01. - Новосибирск, 1971. - 170 с.
- 95 Стрижакова, Л.К. Исследование работы и расчет соединений деревянных элементов на клеепластмассовых шайбах: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01, Новосибирск. 1974. – 187 с.
- 96 Сую Юнь. Определение несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке с использованием металлической зубчатой пластины. / Сую Юнь, Черных А.Г., Глухих В.Н.// Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3 (50). с. 85–91.
- 97 Турков, А.В. Взаимосвязь задач динамики и статики сплошных и составных деревянных конструкций: дис. д-р техн. наук:05.23.01 – Орел: ОГТУ, 2008. – 341 с.
- 98 Цапаев В. А. Исследование длительной прочности и деформативности соединений элементов деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.01. - М. 1982.- 24 с.
- 99 Цапаев В. А. Исследование длительной прочности и деформативности соединений элементов деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах: дисс. ... канд. тех. наук:05.23.01 – М., 1982 г. – 201 с.
- 100 Цапаев В.А. Длительная прочность и деформативность конструкционных древесно-цементных материалов и несущих элементов на их основе: дис. ... докт. техн. наук:05.23.01 - Нижний Новгород, 2001. – 480 с.
- 101 Цапаев В.А. Контроль деформативности соединений на металлических зубчатых пластинах / Цапаев В.А.; Механическая обработка древесины. Научн.-техн. реф. сб. -М.: ВНИПИЭИ леспром, 1985. Вып.2. - С.15-16.
- 102 Цапаев В.А. Контроль деформативности соединений на металлических

- зубчатых пластинах. / Цепаев В.А.; Механическая обработка древесины. 1985, №2, С.15-16.
- 103 Цепаев В.А. Оценка модуля упругости древесины конструкций /Цепаев В.А.; Жилищное строительство, 2003, №2. С.11-13.
- 104 Цепаев В.А. Оценка несущей способности и деформативности соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах / Цепаев В.А.; Инженерно-теоретические основы строительства. Экспресс-информ. ВНИИИС Госстроя СССР, сер. 10. 1987.- Вып.3. - С.6-9.
- 105 Цепаев В.А. Оценка прочности древесины при реконструкции эксплуатируемых зданий / Цепаев В.А.; Жилищное строительство, 2001, №3. С.11-13.
- 106 Цепаев В.А. Прогнозирование деформативности соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах для заданного срока службы конструкций / Цепаев В.А.; Известия вузов. Строительство и архитектура, 1985, №6, С. 18-21.
- 107 Цепаев В.А. Расчет соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах по деформациям с учетом фактора времени / Цепаев В. А.; Инженерно-теоретические основы строительства. Экспресс-информ. ВНИИИС Госстроя СССР, сер. 10. 1984. - Вып.8. - С.9-31.
- 108 Цепаев В.А. Учет температурно-влажностного состояния древесины в поверочных расчетах эксплуатируемых конструкций покрытия неотапливаемых чердачных помещений / Цепаев В.А.; Промышленное и гражданское строительство, 2001, № 12,с.30-31.
- 109 Черных А.Г. Краткий курс лекций «Международная нормативная база проектирования (Еврокоды)»: Учебное пособие/А.Г. Черных, В.Е. Бызов // – М.: Издательство АСВ, 2015. – 74 с.
- 110 Черных, А. Г. К вопросу определения несущей способности нагельных соединений в конструкциях из бруса, клееного из однонаправленного шпона (LVL). [Эл. ресурс] / Черных А.Г. [и др.] // Современные проблемы науки и образования – 2012 г., – № 4.
- 111 Шешукова Н.В. Несущая способность и деформативность нагельных соединений деревянных конструкций при циклическом нагружении: дисс. ... канд. наук: 05.23.01, СПб. 2001. - 156 с.
- 112 Шмидт А.Б. Атлас строительных конструкций из клееной древесины и водостойкой фанеры», Учебное пособие./ Шмидт А.Б., Дмитриев П.А.// М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2002,-292-с., ил. (Гриф Мин. Образ. РФ. ISBN 5274004199)
- 113 Пат. 30419. СССР, МПК E04B 1/48. Кольцевая шпонка для соединения конструктивных деревянных частей / Янушкевич А.Н.; заявитель и патентообладатель Янушкевич А.Н. заявл. 15.08.1932.
- 114 Allen, Edward and Joseph Iano. Fundamentals of Building Construction: Fourth Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. pg. 91
- 115 Blass, H. J.; Aune, P.; Choo, B. S.; Gortlacher, R.; Griffiths, D. R.; Hilson, B. O.; Racher, P. and Steck, G. Timber Engineering. Netherlands: Centrum Hout, 1995.
- 116 Blass, H.J. and Schlager, M. Trial calculations for determination of the load-carrying capacity of joints with Bulldog connectors. CEN/TC 124/WG4 N23,

April 1993

- 117 Blass, J. H.; Ehlbeck, J. and Schlager, M. Characteristic strength of toothed-plate connector joints. *Holz als Roh und Werkstoff*, 51, 1993, p. 395-399.
- 118 Byzov V.E., Melekhov V.I. Structural sawn timber: resource enhancement //Magazin of Civil Engineering, 2016. № 5. Pp. 67-76
- 119 Design of Wood Structures-ASD/LRFD. McGraw-Hill Education 2007.
- 120 Detail. Review of Architecture + Construction Details. Vol. 5/1977, 62 p.
- 121 Detail. Review of Architecture + Construction Details. Vol.2.,1975, 57p.
- 122 EN 10139:1997 Cold rolled uncoated mild steel narrow strip for cold forming.
- 123 EN 10268:2006 Cold rolled steel flat products with high yield strength for cold forming.
- 124 EN 912, Timber fasteners - Specifications for connectors for timbers; German version EN 912:2011
- 125 Eurocode 5. Design of timber structures. Part: General rules and rules for buildings. ENV 1995-1-1. Brussels: CEN, 1993. 133 p.
- 126 Eurocode 5. Structural timber design. Willey-Blackwell, ISBN9781118597286, 2007. 264 p.
- 127 Frech, P. and Kolb, H. Test of Bulldog-type connectors. Test results H 30471 (Prufung von Bulldog-Holzverbindern PrUfzeugnis H 30471). Otto-Graf Institute of Stuttgart University, 1971 (in German)
- 128 Hoodigton P., Strength of connector joints. Sepa seminar, Tallinn 1991, 16 p.
- 129 H. J. Larsen, Industrial Processes. Building and civil engineering. Timber structures. Luxemburg.1989, 350 стр.
- 130 H. Z. Zhou, E. C. Zhu, S. W. Wang, Creep of LVL and Its Effect on the Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin, China.
- 131 Hirashima, Y. (1990). Lateral resistance of timber connector joints parallel to grain direction. In: Proceedings of the International Engineering Conference, Vol 1: 254-261, Tokyo.
- 132 Holzbau. Construction Details. Vol. 4/1973, 84 p.
- 133 http://www.expamet.co.uk/webfm_send/189
- 134 Hugh Morris, Pierre Quenneville, Moment deformation of multi-nailed joints in LVL - development of a long term test procedure, WCTE 2010
- 135 Johansen K.W. (1949) Theory of timber connections. International association for bridge and structural engineering (IABSE) Publication, Bern, vol. 9. pp. 249–262.
- 136 Kangas J. Anchorage capacity of nail plate joints. "Stiffness of the nail plate trusses", Sepa seminar, Tallinn, 1991, p.27-35.
- 137 Kangas, J., 1992, Latest proposals and drafts for Eurocode 5 in designing and testing of nail plate joint, Conference on design and construction of timber structures assembled with metal connector plate and/or driven fasteners in Kirov p. 11
- 138 Keskkula T. Durability of nail plate trusses in agricultural buildings. "Stiffness of the nail plate trusses", Sepa seminar, Tallinn, 1991, p.58-64.
- 139 Kevarimaki A. Capacity of support areas reinforced with nail plates in trussed rafters. "Stiffness of the nail plate trusses", Sepa seminar, Tallinn, 1991, p.43-53.
- 140 Kuipers, J. and Kurstjens, P. B. J.: Creep and damage research on timber joints. Part one. Rapport 4-86-15-HD- 23. Stevin-Laboratorium. Delft University of

Technology, Netherlands, 1986.

- 141 Kurstjens, P. B. J. and Stolle, P. Creep and damage research on timber joints. Part four. Rapport 25.4-91-06/ C HD-28, Stevin-Laboratorium, Delft University of Technology, Netherlands, 1991.
- 142 Kurstjens, P. B. J. Creep and damage research on timber joints. Part three. Rapport 25.4-90-12 C HD-26, Stevin- Laboratorium, Delft University of Technology, Netherlands.
- 143 Kurstjens, P. B. J. Creep and damage research on timber joints. Part two. Rapport 25.4-89-15 C HD-24, Stevin- Laboratorium, Delft University of Technology, Netherlands.
- 144 Leivo M. On the stiffness changes in nail plate trusses. "Stiffness of the nail plate trusses", Sepa seminar, Tallinn, 1991, p.2-24.
- 145 Matthew D., Fragiaco M. Long-term behaviour of laminated veneer lumber members prestressed with unbonded tendons. / Matthew D., Fragiaco M. // NZ Timber design journal, volume 16 issue, P. 13-19.
- 146 Mettem C. J. Validatory tests and proposed design formulae for the load-carrying capacity of toothed-plate connected joints. / Mettem C. J., Page A. V., Davis G. // International council for building research studies and documentation working commission W18 - timber structures. TRADA Technology Limited United Kingdom. 1993. - P. 162.
- 147 Myriam Chaplain, Modelling relative humidity effect on load duration of timber beams / M. Chaplain, G. Valentin, A. Chateaufneuf // University of Bordeaux Bordeaux, France. 1992. – P. 251.
- 148 Pedersen M.U. Dowel Type Timber Connections. Strength modelling. Department of Civil Engineering. 2002. – P. 31–32.
- 149 Rimantas C. Slip of "Bulldog"-type toothed-plate connectors in steel-timber joints of open-web girders. / Rimantas C. // Journal of civil engineering and management. Vilnius, 2004. P. 44-53.
- 150 Van de Kuilen, J-W.G. Duration of load effects in timber joints, Dissertation Delft University of Technology / Van de Kuilen, J-W.G.// Creep of timber joints Delft University of Technology, The Netherlands. 1999. - 342 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчетный алгоритм «Узел» позволяет определить возникающие усилия и перемещения в узле.

Начало

Определение усилий в соединителях с выбранной геометрией узла

Определение усилий, действующих на когтевые шайбы:

$$S_{\text{ЭКВ.1}} = \frac{S_1}{n n_{\text{Ш}}}; \quad S_{\text{ЭКВ.2}} = \frac{S_2}{n n_{\text{Ш}}}; \quad S_3 = \frac{S_{\text{ЭКВ.В,МАКС}}}{r_{\text{МАКС}} n_{\text{Ш}} \sum_{i=1}^n r_i^2};$$

$$S_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{(S_{\text{ЭКВ.2}} + S_{\text{ЭКВ.3,МАКС}} [\cos\beta]^2 + (S_{\text{ЭКВ.1}} + S_{\text{ЭКВ.3,МАКС}} [\sin\beta])^2}.$$

Когтевые
шайбы

Определение усилий, действующих на i -ый коготь шайбы:

$$S_{\text{ЭКВ.1}}^i = \frac{S_{\text{ЭКВ.1}}}{n_{\text{К}}}; \quad S_{\text{ЭКВ.2}}^i = \frac{S_{\text{ЭКВ.2}}}{n_{\text{К}}}; \quad S_{\text{ЭКВ.3}}^i = \frac{S_{\text{ЭКВ.В}}}{r};$$

$$S_{\text{ЭКВ.}}^i = \sqrt{S_{\text{ЭКВ.1}}^i + S_{\text{ЭКВ.3}}^i [\cos\varphi]^2 + S_{\text{ЭКВ.2}}^i + S_{\text{ЭКВ.3}}^i [\sin\varphi]^2}.$$

Нагель

Определение усилий внутри соединителей:

$$S_{\text{ЭКВ.1}} = \frac{S_1}{n n_{\text{Н}}}; \quad S_{\text{ЭКВ.2}} = \frac{S_2}{n n_{\text{Н}}}; \quad S_3 = \frac{S_{\text{ЭКВ.В,МАКС}}}{r_{\text{МАКС}} n_{\text{Н}} \sum_{i=1}^n r_i^2};$$

$$S_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{(S_{\text{ЭКВ.2}} + S_{\text{ЭКВ.3,МАКС}} [\cos\beta]^2 + (S_{\text{ЭКВ.1}} + S_{\text{ЭКВ.3,МАКС}} [\sin\beta])^2}.$$

Определение усилий, действующих на i -ый нагель:

$$S_{\text{ЭКВ.1}}^i = \frac{S_{\text{ЭКВ.1}}}{n_{\text{К}}}; \quad S_{\text{ЭКВ.2}}^i = \frac{S_{\text{ЭКВ.2}}}{n_{\text{К}}}; \quad S_{\text{ЭКВ.3}}^i = \frac{S_{\text{ЭКВ.В}}}{r};$$

$$S_{\text{ЭКВ.}}^i = \sqrt{S_{\text{ЭКВ.1}}^i + S_{\text{ЭКВ.3}}^i [\cos\varphi]^2 + S_{\text{ЭКВ.2}}^i + S_{\text{ЭКВ.3}}^i [\sin\varphi]^2}.$$

Алгоритм
«Когтевая
шайба»

Алгоритм
«Нагель»

Алгоритм
«Когтевая
шайба»

Алгоритм
«Нагель»

Определение суммарной жесткости узла на
один условный «срез»

$$K_1 = \sum K_{\text{наг1}} + \sum K_{\text{к.ш.1}} ;$$

$$K_2 = \sum K_{\text{наг2}} + \sum K_{\text{к.ш.2}} ;$$

$$K_3 = \sum K_{\text{наг3}} + \sum K_{\text{к.ш.3}} .$$

Определение суммарной жесткости узла

$$K_{\text{tot,1}} = K_1 \cdot n_{\text{ш}} ;$$

$$K_{\text{tot,2}} = K_2 \cdot n_{\text{ш}} ;$$

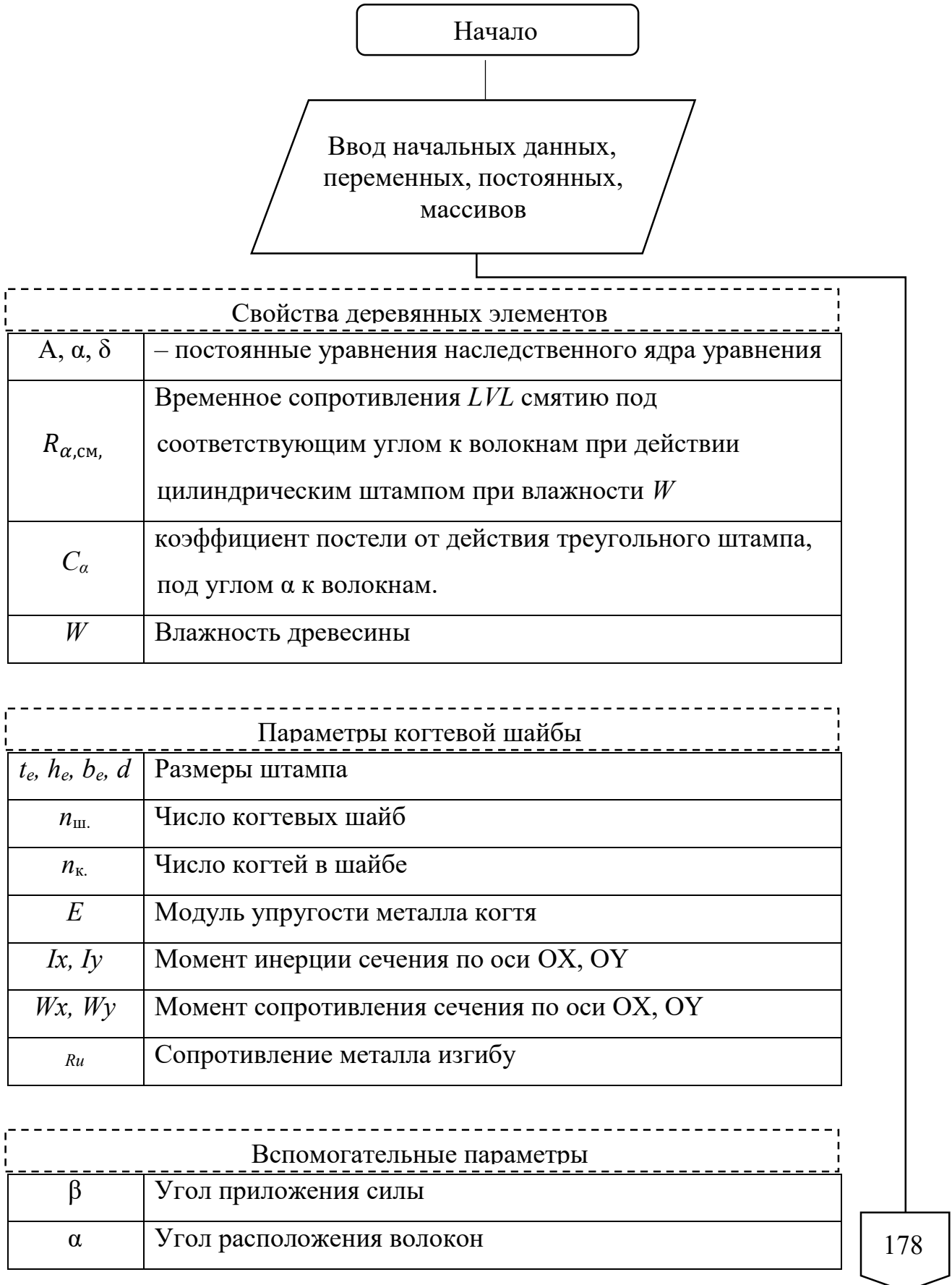
$$K_{\text{tot,3}} = K_3 \cdot n_{\text{ш}} .$$

Определение фактических перемещений:

$$\Delta_1 = \frac{S_1}{K_{\text{tot,1}}} ; \quad \Delta_2 = \frac{S_2}{K_{\text{tot,2}}} ; \quad \theta = \frac{S_3}{K_{\text{tot,3}}} .$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчетный алгоритм «Когтевая шайба» позволяет определить максимальное значение нагрузки, воспринимаемое когтевой шайбой и её жесткости



φ	Угол расположения когтя к силе
$\Delta x, \Delta y$	Шаг участков по оси OX, OY
n	Количество участков разбиения по оси OX, OY
t_n	Количество участков оси времени
t	Время нагружения
$\delta_{\text{пред}}$	предельно допустимое смещение в узле, равное 2 мм, нормируемое сводом правил
$m; \lambda$	Коэффициенты определения балочной функции
φ_m	Изменение угла поворота в основании когтя при образовании пластического шарнира

177

Определения расчетной схемы

x_i, y_i	Координаты расположения соединителей относительно центра вращения
l_1, l_2, l_3	Толщины соединяемых элементов
$T1_n, T2_n, T3_n$	Единичные усилия

Алгоритм
«Узел»

$$k_t = 0,068 \frac{t}{h_e} + 0,51$$

Ввод единичных (дополнительных) усилий:
 $T1_n, T2_n, T3_n$

180*

179

178

Определение граничных условий при $x = 0$:
 $\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = 0; \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = 0;$
 при $x = h$:
 $\frac{dy}{dx} = \varphi = 0; \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = -\frac{N}{EI}$

Изменение граничных условий при $x = 0$:
 $\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = 0; \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = 0;$
 при $x = h$:
 $\frac{dy}{dx} = \varphi \neq 0; \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = -\frac{N}{EI}$

нет
 $0 < \varphi < 90$

нет
 $\varphi = 0$

нет
 $\varphi = 90$

да

да

$$I(x)\{2y'''(x,t) + xy^{IV}(x,t)\} + C_{\alpha}y(x,t) + \int_{t_0}^t EI(x)\{2y'''(x,t) + xy^{IV}(x,t)\}K_0(t-\tau)d\tau = 0$$

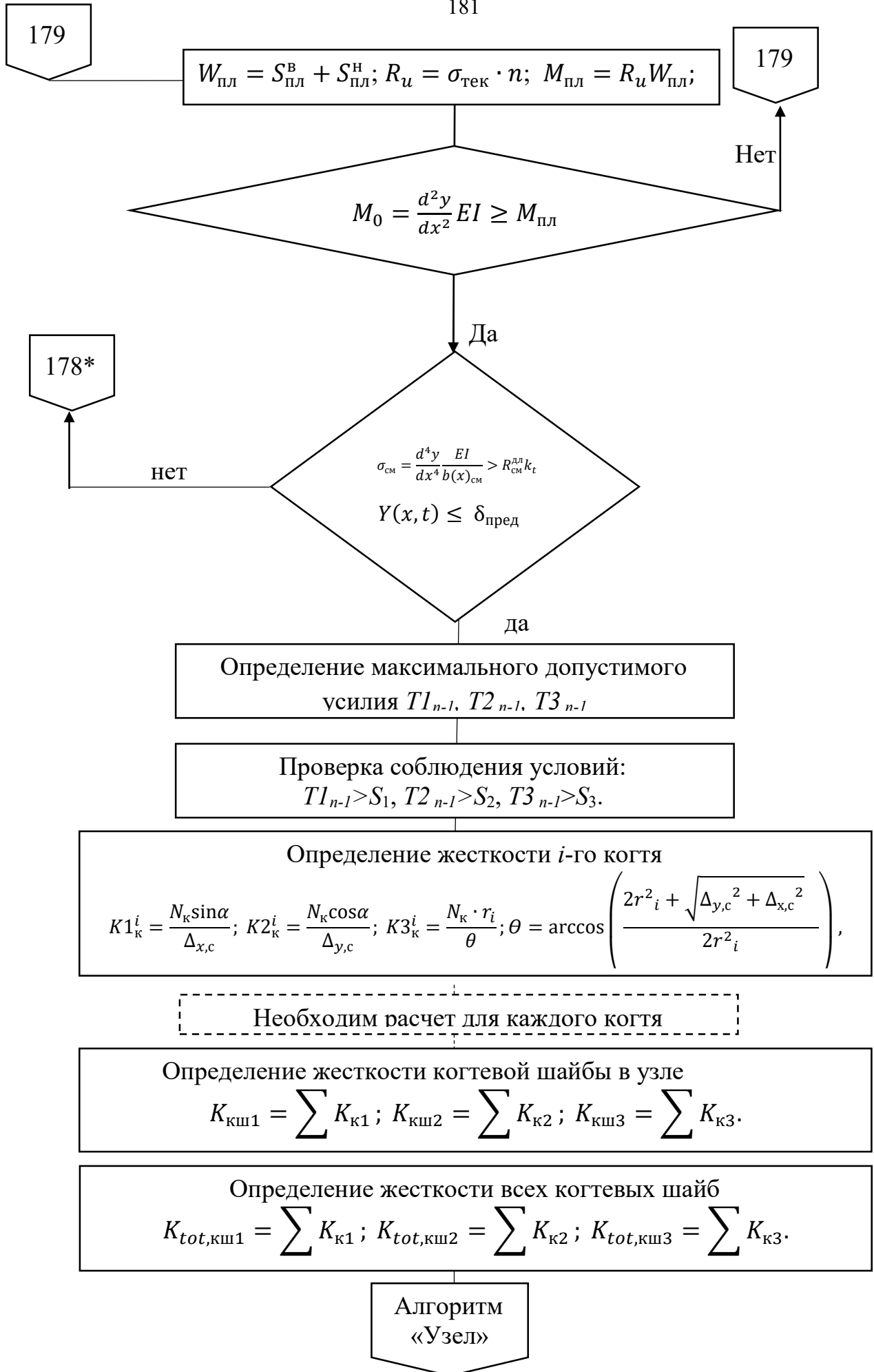
$$C_{\alpha+90} \cdot z(x,t) + EI(x)\{z'''x^3 + 6z'''x^2 + 6z''x\} + \int_0^t EI(x)\{z'''x^3 + 6z'''x^2 + 6z''x\}K_0(t-\tau)d\tau = 0$$

$$\begin{cases} I(x)\{2y'''(x,t) + xy^{IV}(x,t)\} + C_{\alpha}y(x,t) + \int_{t_0}^t EI(x)\{2y'''(x,t) + xy^{IV}(x,t)\}K_0(t-\tau)d\tau = 0 \\ C_{\alpha+90} \cdot z(x,t) + EI(x)\{z'''x^3 + 6z'''x^2 + 6z''x\} + \int_0^t EI(x)\{z'''x^3 + 6z'''x^2 + 6z''x\}K_0(t-\tau)d\tau = 0 \end{cases}$$

Определение $y(x,t), z(x,t), \varphi(x,t), M(x,t), Q(x,t), q(x,t)$ для коття шайбы.

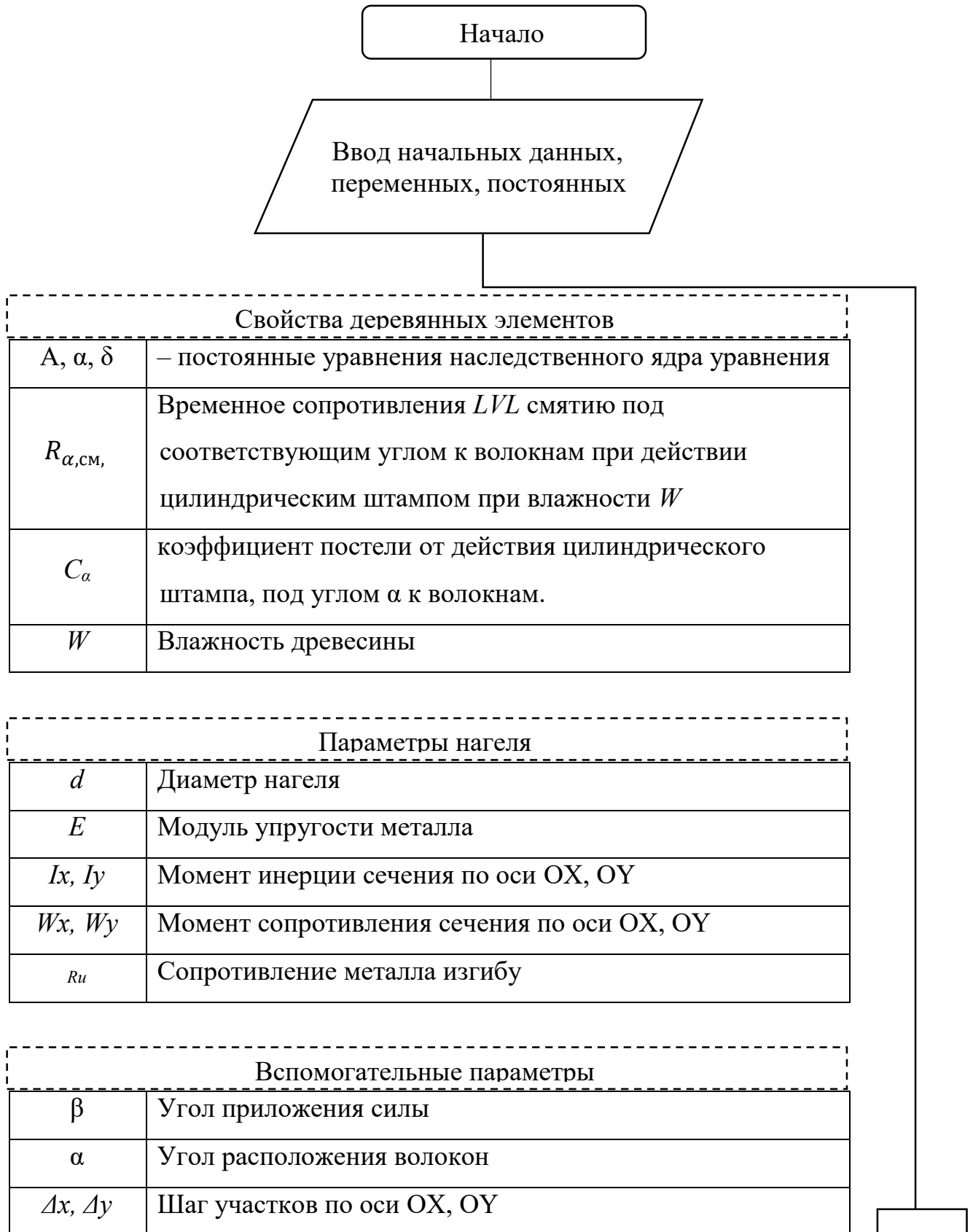
180

180



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Расчетный алгоритм «Нагель» позволяет определить максимальное допустимое усилие, воспринимаемое нагелем, а также жесткость нагеля

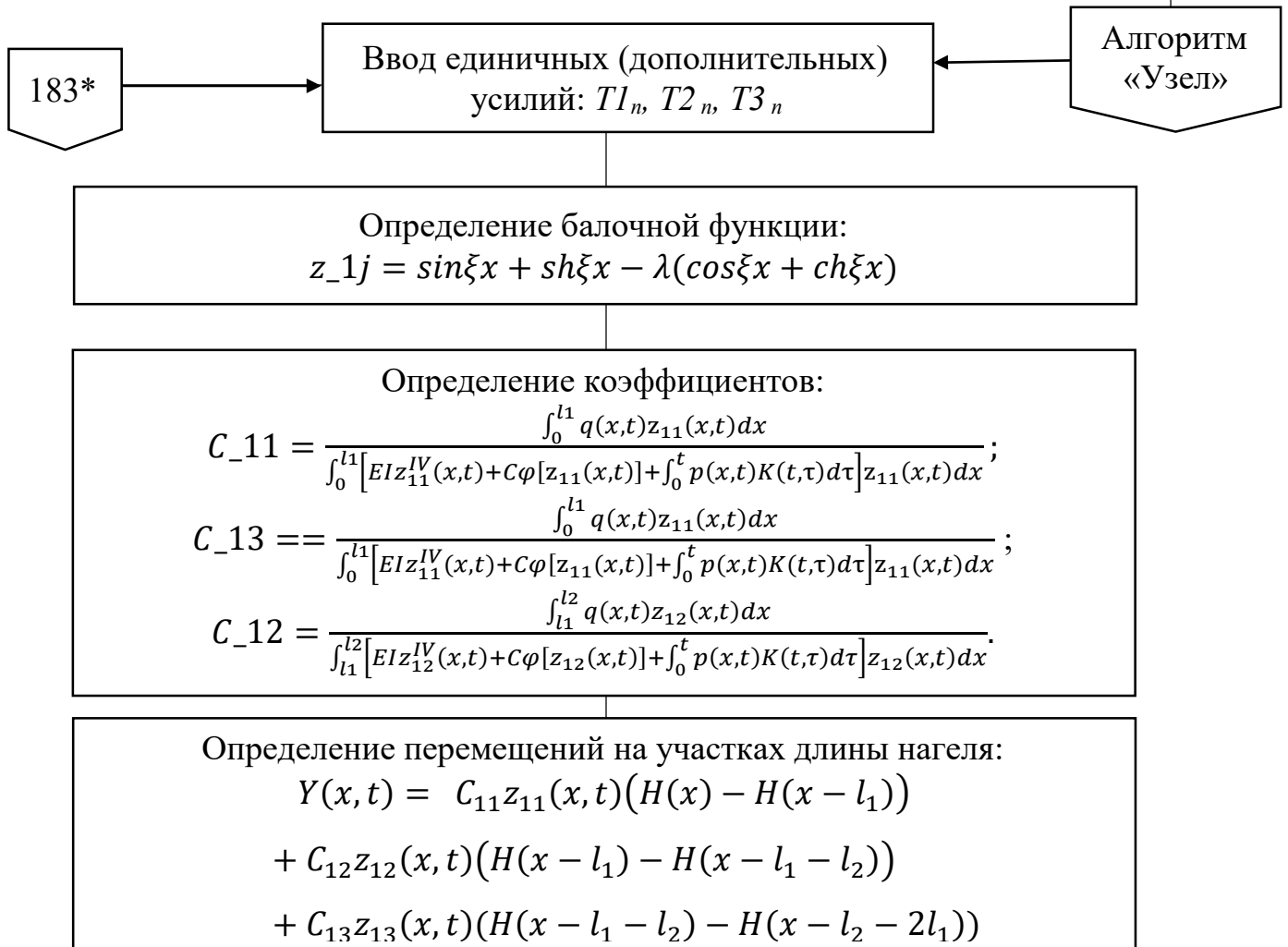


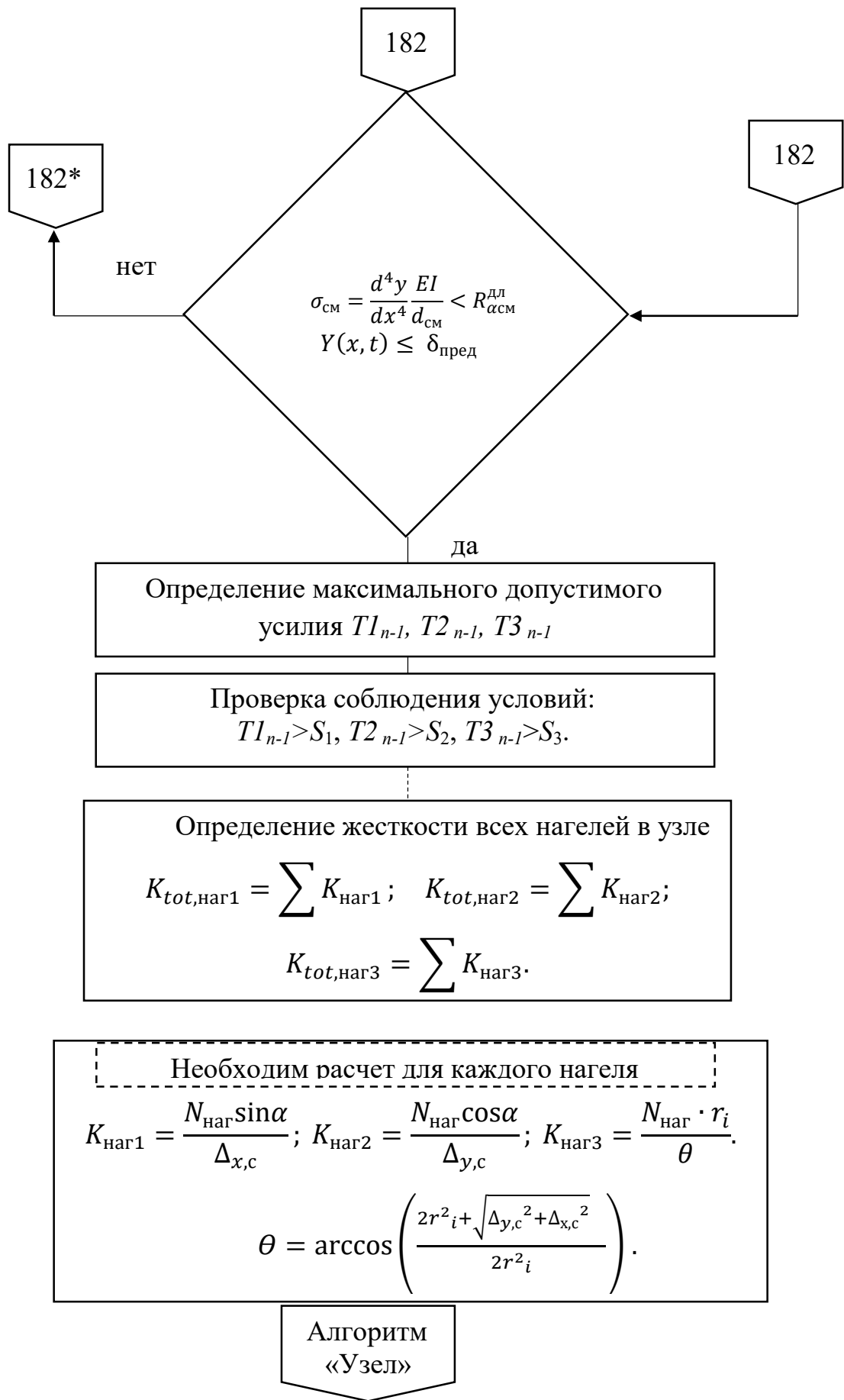
n	Количество участков разбиения по оси ОХ, ОУ
t_n	Количество участков оси времени
t	Время нагружения
$\delta_{\text{пред}}$	предельно допустимое смещение в узле, равное 2 мм, нормируемое сводом правил
$m; \lambda$	Коэффициенты определения балочной функции

181

Определения расчетной схемы

$x_i, y_i,$	Координаты расположения соединителей относительно центра вращения
l_1, l_2, l_3	Толщины соединяемых элементов
$T1, T2, T3$	Единичные усилия





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 146232

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЗАПРЕССОВКИ КОГТЕВЫХ ШАЙБ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014123970

Приоритет полезной модели 10 июня 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 03 сентября 2014 г.

Срок действия патента истекает 10 июня 2024 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий





ООО «ГРИНСАЙД»
198206, Санкт-Петербург, Петергофское шоссе 73
тел./факс: (812) 327-91-11
www.greenside.ru, inform@greenside.ru

СПРАВКА

О внедрении результатов научно-исследовательской работы аспиранта
Кафедры конструкций из дерева и пластмасс СПбГАСУ
Данилова Егора Владимировича

Результаты исследований Данилова Е. В., посвященные проблемам соединений деревянных конструкций с использованием когтевых шайб, использовались при проектировании каркаса здания гольф-клуба, расположенного в пос. Гостилицы Ленинградской области. Проект здания гольф-клуба был выполнен Даниловым Е. В. в составе авторского коллектива компании. В настоящее время строительно-монтажные работы по возведению каркаса здания с использованием когтевых шайб закончены.

Должность



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР

м.п. (подпись) Ю. ПОЛЯКОВ Ф.И.О.

Дата: 11.06.14