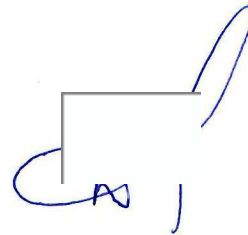


На правах рукописи



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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург-2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ЧЕРНЫХ Александр Григорьевич.

Официальные оппоненты: **ТУРКОВ Андрей Викторович,**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Орловский Государственный Университет имени И.С. Тургенева», кафедра строительных конструкций и материалов, заведующий;

КОТЛОВ Виталий Геннадьевич,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Поволжский государственный технологический университет" (г. Йошкар-Ола), Институт строительства и архитектуры, директор.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск).

Защита состоится 18 июня 2019 года в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д **212.223.03** ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний (ауд. 219 главного корпуса).

Факс: 8 (812) 316-58-72, Email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/danilov-egor-vladimirovich>.

Автореферат разослан «15» мая 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Лидия Никитовна Кондратьева

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ограничения, свойственные для древесины, затрудняют ее использование в строительных конструкциях конкурентно-способных с другими строительными материалами. Однако, прочностные характеристики 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., Rimantas С 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 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.

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:

1) 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;

2) 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;

3) разработана новая методика расчета соединений с когтевыми шайбами по прочности и деформациям с учетом длительности воздействия нагрузок;

4) 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 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-я 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 2012 г., 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-я 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-я 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-я 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, заключения рекомендаций по проектированию. 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, воздействующим 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.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Результаты теоретических исследований зависимости между действующим на соединение усилием и смещением его элементов во времени

Для выполнения расчетов используются допущения о том, что:

- ось нагеля принимается прямолинейной до момента образования в нем пластического шарнира;
- деформации нагеля (когтя шайбы) и LVL совместны;
- при действии срезающих сил в соединении каждый крепежный элемент принимает равную долю силы;
- все крепления в соединении будут иметь линейное смещение при изменении нагрузки.
- расстояние до крепежного элемента принимается из условия, что не произойдет преждевременного расщепления или смятия.

Расчет нагельных соединений в конструкциях из LVL выполняется как для балки на упруго-вязком основании. Деформации возникают с самого начала нагружения и изменяются от уровня и длительности нагрузки, объясняется это ползучестью древесины. Изогнутая ось нагеля описывается уравнением, где нелинейность зависимостей факторов учитывается за счет формы кривой мгновенного деформирования:

$$EIy^{IV}(x,t) + Cy(x,t) + \int_0^t p(x,t)K(t,\tau)d\tau = q(x,t); \quad (1)$$

где $q(x,t)$ – внешняя нагрузка; C – коэффициент постели, $p(x,t)$ – реакция гнезда нагеля; $K(t,\tau)$ – наследственное ядро уравнения.

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

$$K_0(t) = A \frac{e^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}}; \quad (2)$$

где A, α, β – постоянные уравнения (2); t – время нагружения.

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

$$\left. \begin{array}{l} \text{При } x=0; \\ \\ \end{array} \right\| \begin{array}{l} EIy''(0,t)=0; \\ y'''(0,t)=0; \\ M_0=Q_0=0; \end{array} \left\| \begin{array}{l} \text{При } x=l; \\ \\ \end{array} \right\| \begin{array}{l} EIy''(l,t)=0; \\ y'''(l,t)=0; \\ M_l=Q_l=0; \end{array}$$

Решение уравнения (1) производилось разложением в ряд и использованием метода Бубнова-Галеркина. После определения C_{11}, C_{12}, C_{13} методом интегрирования собираются все составляющие уравнения:

$$y(x,t) = \sum C_{1j} z_{1j}; \quad (3)$$

где z_{ij} – представляет собой балочную функцию.

Для отображения сложной формы кривой изгиба оси нагеля в одном выражении предложено воспользоваться функциями Хэвисайда. Выражение (3) является уравнением деформации нагеля и его можно переписать в следующем виде для двухсрезного соединения:

$$Y(x,t) = C_{11} z_{11}(x,t)(H(x) - H(x - l_1)) + C_{12} z_{12}(x,t)(H(x - l_1) - H(x - l_1 - l_2)) + C_{13} z_{13}(x,t)(H(x - l_1 - l_2) - H(x - l_1 - 2l_2)); \quad (4)$$

При нахождении решения уравнения (4) необходимо, чтобы удовлетворялись условия:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{q_{\text{см}}}{d_{\text{см}}} = \frac{d^4 y}{dx^4} \frac{EI}{d_{\text{см}}} < R_{\text{см}}^{\text{дл}}; \quad Y(x,t) \leq \delta_{\text{пред}}; \quad (5-6)$$

где $R_{\text{см}}^{\text{дл}}$ – величины временного и длительного сопротивления LVL смятию под соответствующим углом к волокнам при действии цилиндрическим штампом; $\delta_{\text{пред}}$ – предельно допустимое смещение в узле, равное 2 мм.

Для когтя шайбы с учетом его расположения по отношению к главным направлениям усилия, длительности загрузки воспользуемся уравнением, предложенным Работновым Н. Ю. Для случаев расположения когтя по отношению к направлению действия нагрузки кроме 0° и 90° необходимо рассматривать систему из двух уравнений. Усилие N раскладывается на составляющие, прикладываемые параллельно и перпендикулярно когтю:

$$\left\{ \begin{array}{l} EI(x) \{ 2y'''(x,t) + xy^{IV}(x,t) \} + C_{\alpha} y(x,t) + \\ + \int_0^t EI(x) \{ 2y'''(x,t) + xy^{IV}(x,t) \} K_0(t - \tau) d\tau = 0; \\ C_{\alpha+90} \cdot z(x,t) + EI(x) \{ z'''x^3 + 6z''x^2 + 6z'x \} + \\ + \int_0^t EI(x) \{ z'''x^3 + 6z''x^2 + 6z'x \} K_0(t - \tau) d\tau = 0. \end{array} \right. \quad (7)$$

Ядро $K(t, \tau)$ в выражении (7) принимается по результатам обработки экспериментальных кривых ползучести LVL при действии треугольным штампом. Расчет системы уравнений (7) до образования пластического шарнира должен проводиться при граничных условиях из таблицы 1.

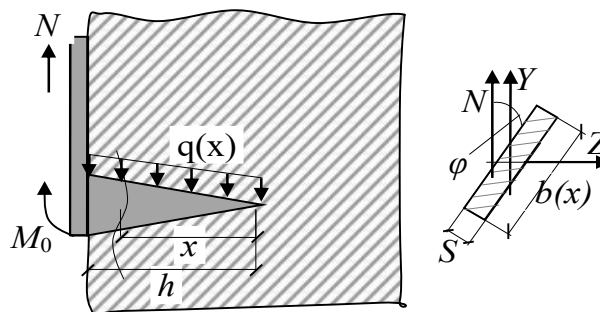


Рисунок 1 – Схема к расчету когтя шайбы под углом φ к направлению приложения усилия N

Таблица 1 – Граничные условия

	при $x = 0$	при $x = h$
До образования пластического шарнира	$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = 0; \frac{d^3 y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = 0;$	$\frac{dy}{dx} = \varphi = 0; \frac{d^3 y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = -\frac{N}{EI};$
После образования пластического шарнира	$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = 0; \frac{d^3 y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = 0.$	$\frac{dy}{dx} = \varphi \neq 0; \frac{d^3 y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = -\frac{N}{EI}.$

Несущая способность когтевой шайбы может быть найдена, как сумма несущих способностей всех когтей, а суммарная несущая способность одного соединителя на один срез определяется, как сумма несущих способностей нагеля и когтевой шайбы.

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

$$S_{\text{экр.1}} = \frac{S_1}{n n_{\text{ш}}}; S_{\text{экр.2}} = \frac{S_2}{n n_{\text{ш}}}; S_{\text{экр.3},i} = \frac{S_3 r_i}{n_{\text{ш}} \sum_{i=1}^n r_i^2}; \Delta_i = \frac{r_i}{r_{\text{max}}} \Delta_{\text{max}}. \quad (8-11)$$

Для определения перемещений в узле по осям x, y и повороту на угол Θ необходимо задаться тремя значениями жесткостей K_1, K_2, K_3 соответственно, которые находятся, путем сложения всех жесткостей соединителей на каждом срезе:

$$K_1 = \sum K_{\text{наг1}} + \sum K_{\text{к.ш.1}}; K_2 = \sum K_{\text{наг2}} + \sum K_{\text{к.ш.2}}; K_3 = \sum K_{\text{наг3}} + \sum K_{\text{к.ш.3}}. \quad (12-14)$$

Фактические смещения определяются из выражений:

$$\Delta_1 = \frac{S_1}{K_1}; \quad \Delta_2 = \frac{S_2}{K_2}; \quad \theta = \frac{S_3}{K_3}. \quad (15-17)$$

Таким образом может быть определено НДС узлов нагельных соединений в LVL с когтевыми шайбами.

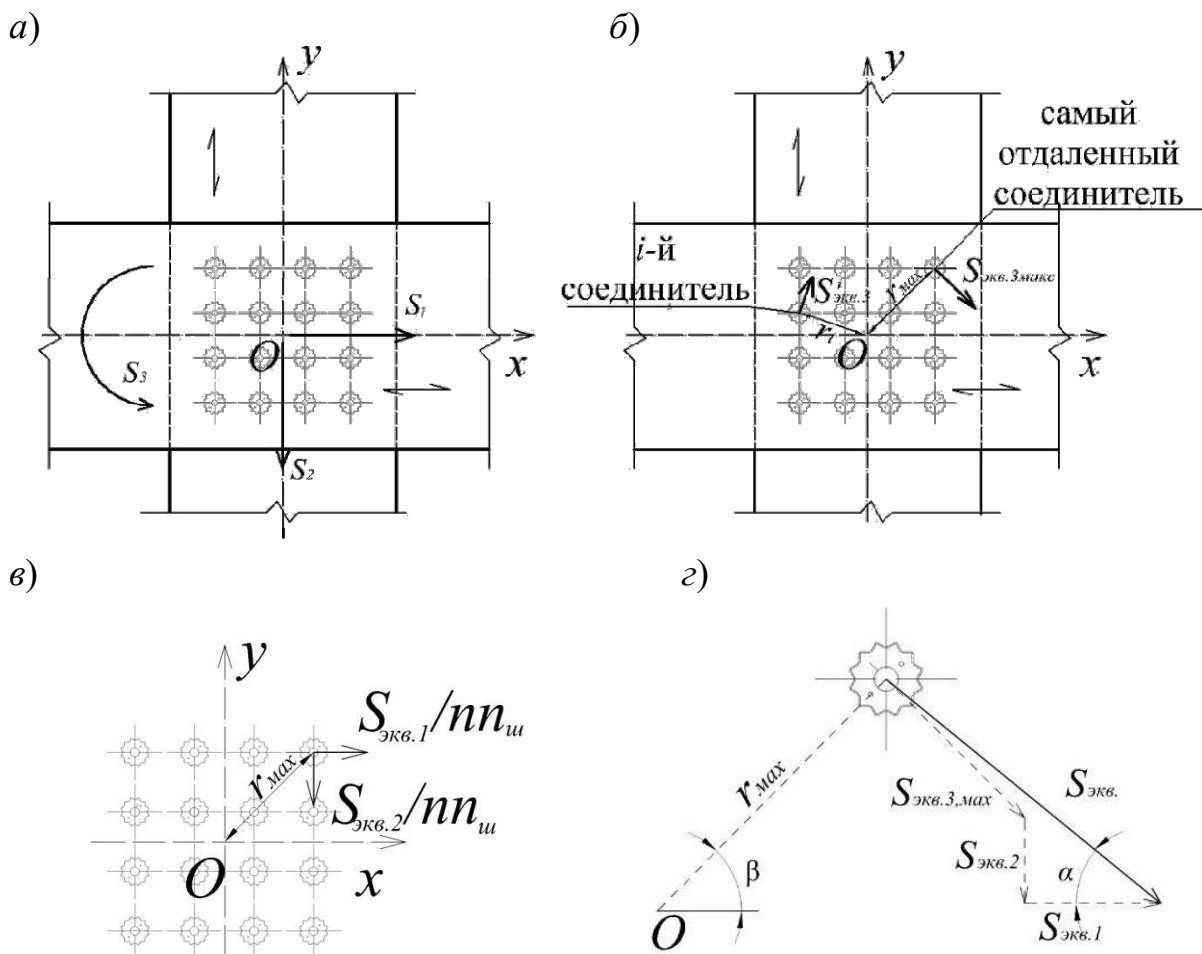


Рисунок 2 – Схема для расчета соединений: а) общий вид соединения, б) возникновение усилий в различных соединительных элементах от действия S_3 , в) возникновение усилий от действия усилий S_1 и S_2 , г) определение $S_{экв}$ и его составляющих

2. Результаты прочностных, жесткостных параметров материала LVL при смятии треугольными и цилиндрическими штампами, полученными в ходе экспериментальных исследований.

Для нахождения и уточнения требуемых параметров, используемых в методике расчёта, был поставлен ряд экспериментальных исследований.

Определялось сопротивление LVL на сжатие и были получены коэффициенты постели при смятии треугольными и цилиндрическими штампами различных размеров. Осуществлялось вдавливание их в деревянные образцы из LVL с фиксацией прикладываемой нагрузки и соответствующих смещений. Значения временного сопротивления LVL и коэффициентов постели при действии нагрузок вдоль и поперек волокон треугольным и цилиндрическим штампами приведены в таблице 2.

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

$$R_{дл,\alpha} = R_{вр,\alpha} (1 - 2,33\nu)m_{дл}; \quad C_{\alpha}^H = C_{вр,\alpha} (1 - 1,65\nu); \quad m_{дл} = 0,59t^{-0,055}. \quad (18-20)$$

где ν – коэффициент вариации сопротивления древесины при местном смятии; $m_{дл}$ – коэффициент учета длительности нагружения.

Таблица 2 – Средние временные сопротивления LVL и коэффициентов постели при различных углах приложения нагрузки и форм штампов при влажности 12 %

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

где $R_{сж}^{BP,0}$ – среднее значение временных сопротивлений LVL сжатию вдоль волокон; $R_{сж}^{BP,90}$ – среднее значение временных сопротивлений LVL сжатию поперек волокон при влажности 12%; α – угол по отношению к нормали сминающей стороны когтя и направление волокон, градус; h – высота когтя шайбы, мм; d – диаметр нагеля, мм.

Для исследования длительной прочности LVL при действии цилиндрическим и треугольным штампами был реализован эксперимент в течение 100 суток. Производилось вдавливание штампов различных размеров цилиндрических и треугольных форм в образцы (бруски сечением 50×45 мм и длиной вдоль и поперек волокон 120 мм из LVL) с фиксацией прикладываемой нагрузки и соответствующих смещений (рисунок 3).

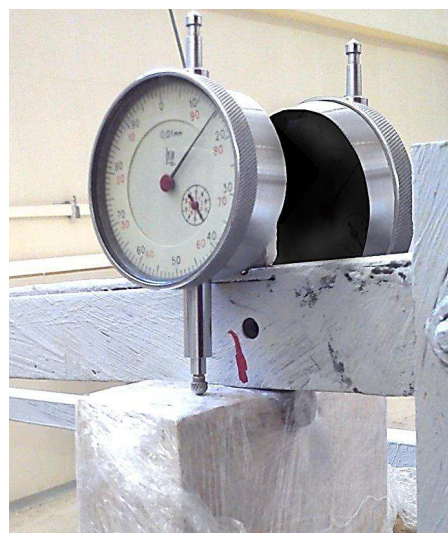


Рисунок 3 – Проведение испытаний для определения сопротивления LVL длительному действию нагрузки треугольным и цилиндрическим штампом

Для смятия штампами различных форм и размеров под разным углом к волокнам были получены зависимости:

Для треугольного штампа:

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

$$A = 2,32 \cdot 10^{-6} \text{ W}^{-1}, 88 \cdot 10^{-6}$$

Для цилиндрического штампа:

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

$$A = 1,21 \cdot 10^{-6} \text{ W}^{-1}, 076 \cdot 10^{-5}$$

Для нахождения предела текучести и модуля упругости сталей были проведены испытания на растяжение по ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 11701–84. Для когтевой шайбы образцы были вырезаны из тела когтевой шайбы Ø140 мм. Для нагелей образцы были изготовлены из стали, которая используется при испытаниях соединений. Опыты проводилась на испытательных машинах *Instron 5969* и *Instron 5989*.

По результатам испытаний для металла когтевой шайбы расчетное сопротивление изгибу принимается $R_u = \sigma_t \cdot n = 390 \cdot 1,258 = 490,62$ МПа, модуль упругости принимается $E = 203000$ МПа. Для металла нагеля расчетное сопротивление изгибу принимается $R_u = 280$ МПа, модуль упругости принимается $E = 208000$ МПа.

Таким образом были найдены и уточнены прочностные и жесткостные характеристики выбранных материалов узловых соединений, для использования по разработанной автором методике расчета конструкций с когтевыми шайбами.

3. Результаты исследований прочности и жесткости нагельных соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из LVL

Для апробации предлагаемой методики расчета, были проведены экспериментальные исследования нагельных соединений с когтевыми шайбами на действие статической нагрузки с учетом геометрических характеристик соединений.

Было произведено несколько серий испытаний двусрезных соединений на действие продольного усилия. Для изготовления образцов использовался материал LVL Ultralam-R толщиной 45 мм с когтевыми шайбами типа «Bulldog» С1, диаметрами 50, 95 и 117 мм и нагелями в виде гладких шпилек с резьбой по краям с диаметрами 12, 16 и 20 мм по ГОСТ 9066–75 с гайками и усиленными шайбами. Испытывались две серии образцов с приложением нагрузок для среднего элемента вдоль и поперек волокон (рисунок 6).

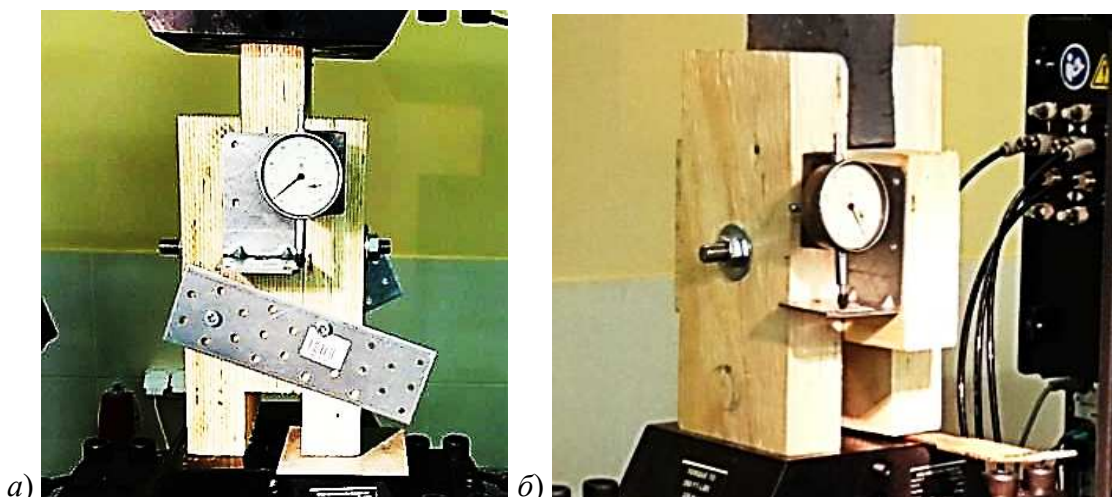


Рисунок 6 – Испытание образцов на сжатие для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов а) $\alpha = 0^\circ$, б) $\alpha = 90^\circ$.

По результатам испытаний построены кривые зависимости смещения от прикладываемой нагрузки, представленные на рисунке 7. Методика расчета, предлагаемая в данной работе, подразумевает ограничение нагрузки, исходя из условий недостижения предельных деформаций и напряжений в элементах соединения. Из графиков (рисунок 7) видно, что линия «Теоретические значения» повторяет траекторию изменения экспериментальных кривых деформирования, что обосновывает рассмотрение результатов расчетов с использованием всех ограничительных условий.

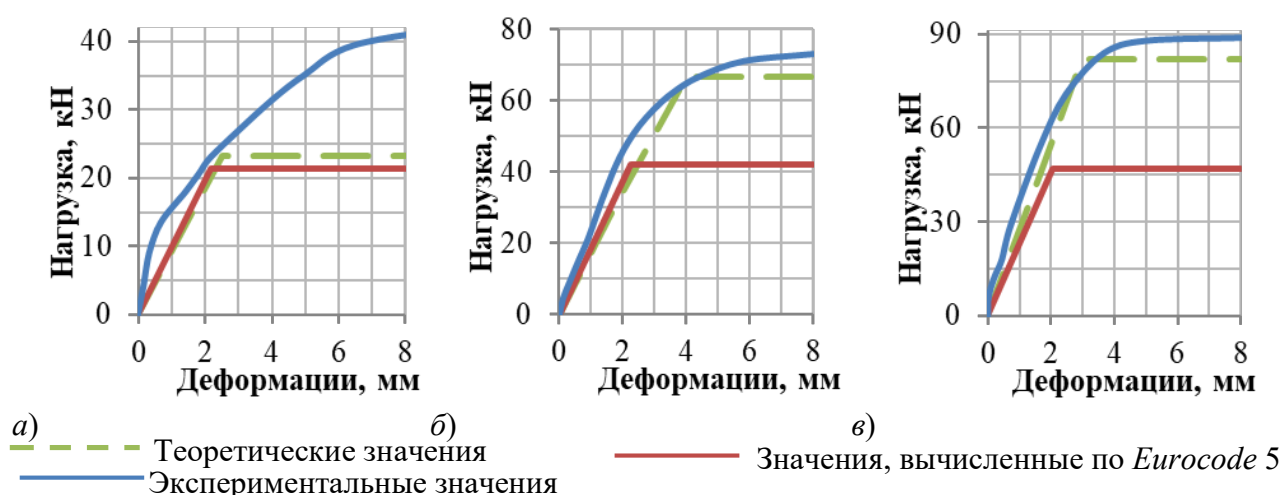


Рисунок 7 – теоретические и экспериментальные диаграммы деформирования для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 0^\circ$, при диаметре когтевой шайбы $d_{к.ш.}$ и диаметре нагеля d_n : а) $d_{к.ш.} = 50$ мм, $d_n = 12$ мм, б) $d_{к.ш.} = 95$ мм, $d_n = 16$ мм, в) $d_{к.ш.} = 117$ мм, $d_n = 20$ мм.

Результаты определения максимальных $N_{разруш.}$ приведены в таблице 4. Средняя разница в результатах составила 14%.

Таблица 4 – Результаты исследований на сжатие 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%

Для определения влияния изгибающего момента на работу соединения с когтевыми шайбами в конструкциях из LVL были произведены испытания 6 образцов. Изготавливались балки пролетом 4 м с двусрезным соединением. Для изготовления деревянных элементов использовался LVL Ultralam-R сече-

нием 300×45 мм (1 серия) и 400×45 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 $d = 50$ мм (1 серия) и $d = 62$ мм (2 серия). Для уменьшения трудоемкости изготовления образцов было использовано универсальное устройство для запрессовки когтевых шайб, разработанное автором (Патент на полезную модель №146232) (рисунок 8). Для измерения смещений прикреплялись прогибомеры ПАО-6. Отслеживались смещения для вычисления значения углов поворота конструкции под действием изгибающего момента. В ходе работы были определены зависимости угла поворота конструкции и действующего изгибающего момента. Значения теоретических расчетов и эксперимента сходятся на 91–94 % в уровне максимальных нагрузок.

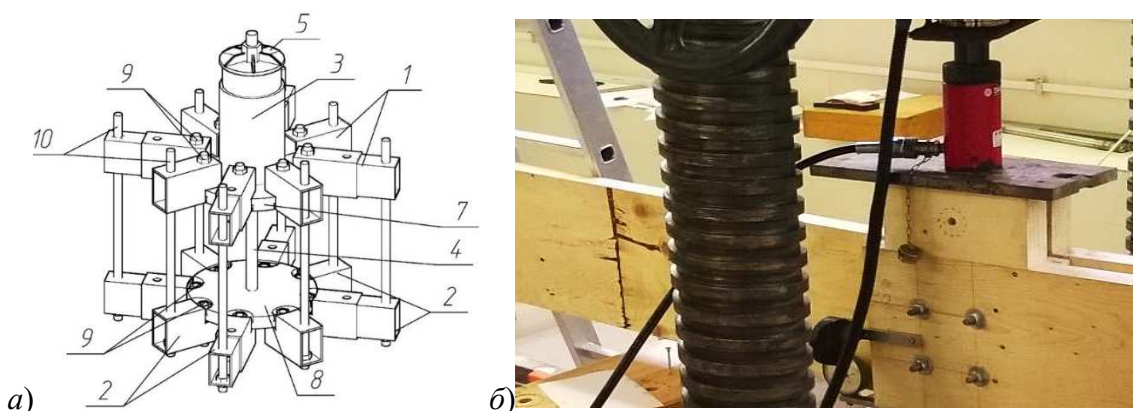


Рисунок 8 – Исследования зависимости изгибаемого момента на угол поворота соединения:
 а) полезная модель прессы для когтевых шайб: 1, 2 – опорные элементы, 3 – механизм для нагнетания нагрузки, 4 – центральный стержень, 5, 6 – гайка-крышка, 7, 8 – втулка, 9 – стяжные элементы, 10 – цилиндрические стержни; б) процесс испытаний.

Для учета влияния фактора толщины на исследуемые параметры прочности и жесткости соединений с когтевыми шайбами предложено использовать корректирующий коэффициент k_t , выведенный по результатам экспериментальных исследований:

$$k_t = N_{I-II \text{ эксп.}} / N_{I-II \text{ теор.}} \quad (36)$$

где k_t – расчетный коэффициент, учитывающий изменение толщин элементов LVL в соединении, $N_{I-II \text{ эксп.}}$ – экспериментальное значение несущей способности в упругой зоне работы соединения, $N_{I-II \text{ теор.}}$ – теоретическое значение несущей способности в упругой зоне работы соединения.

В ходе работы выявлено, 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 высокой достоверностью, а при толщинах лежащих в интервале $3 h_e \leq t_{\min} < 5,25 h_e$ точность вычислений достигается с использованием коэффициента k_t . Определения коэффициента k_t производится по формуле:

$$k_t = 0,068 \frac{t}{h_e} + 0,51. \quad (37)$$

Для изучения влияния на нагельное соединение с когтевыми шайбами в конструкциях из LVL действия длительного осевого усилия, исследования характера развития деформаций во времени и апробации предлагаемой методики расчета были проведены длительные испытания для 4-х образцов. Были экспериментально исследованы двусрезные образцы с углом между осью действия нагрузки и направлением волокон для элементов $\alpha = 0^\circ$.

В качестве элементов соединения применялся материал LVL Ultralam-R с толщиной 45 мм. В качестве когтевых шайб применялись двусторонние когтевые шайбы типа «Bulldog» С1, диаметрами 50 мм и 95 мм. В качестве нагелей использовались гладкие стальные шпильки с резьбой на концах и диаметрами 12, 16 мм. Схема проведения длительных испытаний представлена на рисунке 10.

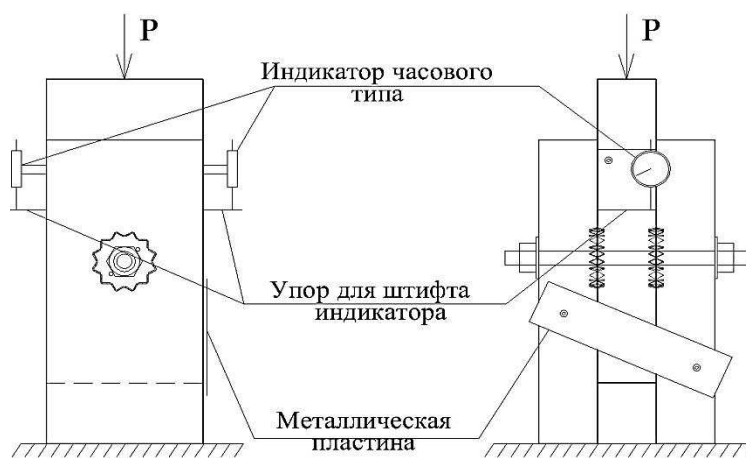


Рисунок 10 – Схема проведения длительных испытаний соединений на сжатие

Перед установкой измерительного оборудования образцы были обмотаны герметичной стрэтч-пленкой, для неизменности влажности на период испытаний. Эксперимент произведен в пружинных прессах с передачей нагрузки равной $0,3P_{\max}$: для 1 серии $P = 9,525$ кН, для 2 серии $P = 20,4$ кН. Всего было проведено 4 испытания (2 серии по 2 опыта в каждой). Испытания проводились в течение 100 суток каждая.

Используя предлагаемый алгоритм расчета соединений были получены теоретические значения изменений деформаций во времени, при этом относительная ползучесть на 100 суток составила для 1 серии 0,641 и для 2 серии 0,704, расхождения расчетных теоретических и экспериментальных значений оказались равными 9,5 % и 16,05 % соответственно. Диаграммы прироста деформаций полученных аналитически и экспериментально представлены на рисунке 11.

В ходе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований соединений были определены значения линейной жесткости K для узлов с разными значениями диаметра нагеля и когтевой шайбы и фиксированной толщине элементов LVL (45 мм) и приведены в таблице 5. Данные значения определялись в зоне упругих деформаций и используются методикой для определения перемещений элементов узлов.

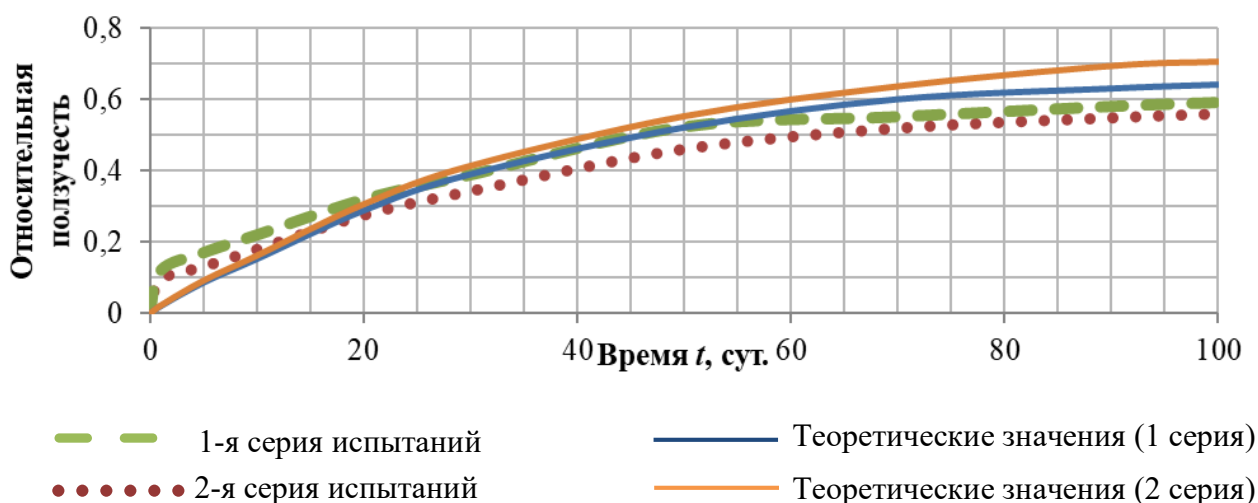


Рисунок 11 – Экспериментальные и теоретические зависимости относительной ползучести соединения от времени для уровня нагрузки в $0,3 P_{max}$

Таблица 5 – Результаты экспериментальных исследований определения линейной жесткости

Угол приложения нагрузки к волокнам α , град.	Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш.}$, мм	Диаметр нагеля, $d_{наг.}$, мм.	Факт. жесткость K , кН/мм	Теор. жесткость K , кН/мм	$\left(\frac{K_{факт}}{K_{теор}} - 1\right) \cdot 100\%$
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%

Теоретические и экспериментальные значения прочности и жесткости нагельных соединений с когтевыми шайбами в LVL близки друг к другу (средняя разница значений составляет 12%), что характеризует предлагаемую методику, как корректную для рассматриваемого диапазона значений.

Предлагаемая 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 используются для расчета 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.

4. Результаты экспериментальных исследований конструкции фермы из LVL с когтевыми шайбами при действии статической нагрузки

Для изучения работы соединений из LVL с использованием когтевых шайб в конструкции были проведены экспериментальные исследования фермы с параллельными поясами пролетом 4,6 м. Определялось НДС фермы с параллель-

ными поясами при действии статической нагрузки, приложенной в узлах верхнего пояса.

В качестве материалов элементов использовался материал LVL Ultralam-R сечением 100×45 мм, гладкие шпильки из стали С255 $d=16$ мм с резьбой на концах с усиленными шайбами и гайками, когтевые шайбы типа «Bulldog» С1 диаметром 62 и 75 мм. Ферма была запроектирована для уровня разрушающей нагрузки $P_{\text{п}} = 6,68$ кН/м.

Испытания проводились на гидравлическом прессе Amsler. Закрепление фермы в опорной зоне выполнялось путем опирания конструкции на распределительную плиту, которая, передает нагрузки на цилиндрические опоры, жестко связанные с конструкцией пресса. Измерения перемещений выполнялось с использованием прогибомеров Аистова ПАО-6 с ценой деления 0,01 мм. Всего было установлено 9 прогибомеров, расположение которых приведено на рисунках 12 и 13. Деформации и напряжения в элементах фермы определялись с использованием тензометрических преобразователей Куова. Перед основным испытанием проводились пробные испытания конструкции под нагрузкой $0,2P_{\text{max}}$ и $0,4P_{\text{max}}$ для проверки работоспособности измерительной аппаратуры.

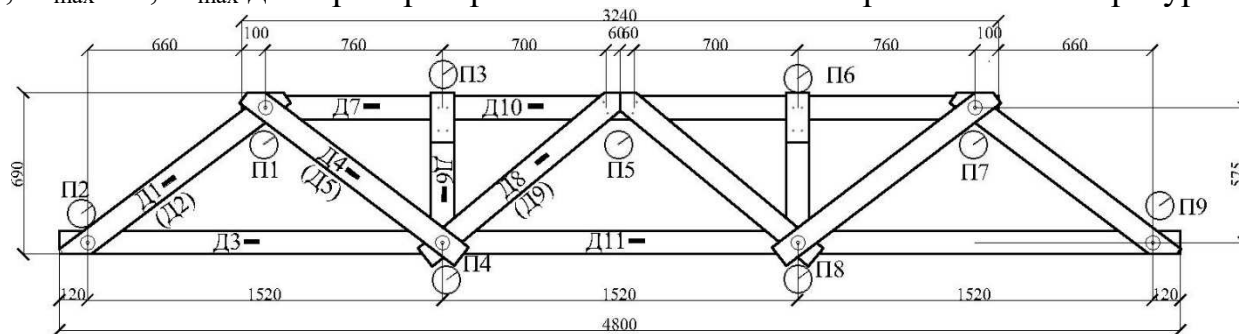


Рисунок 12 – Габариты испытуемой фермы, расположение тензодатчиков (Д1-Д11), расположение прогибомеров (П1-П9)

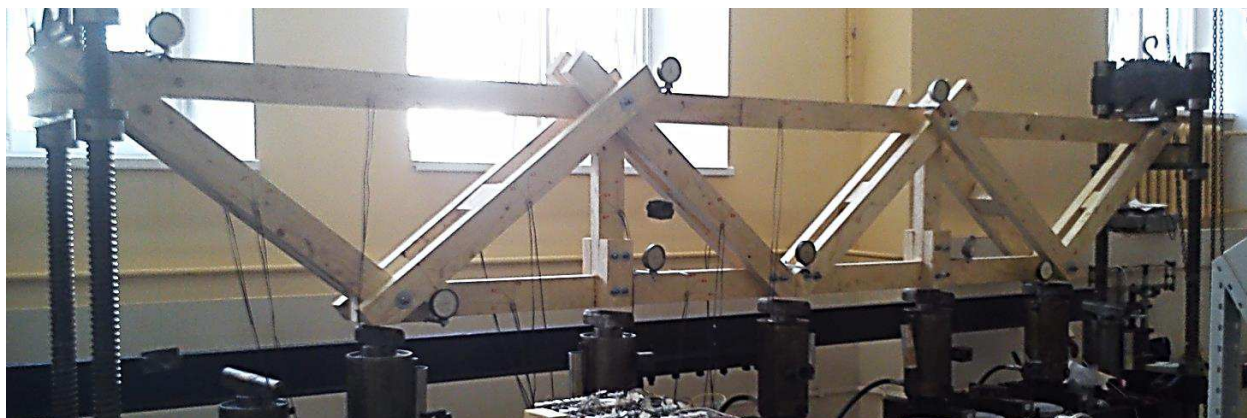


Рисунок 13 – Проведение испытаний конструкции фермы

В ходе проведения эксперимента фиксировались смещения узлов элементов фермы и напряжения в элементах при передаче нагрузки в интервале от 0,2 кН/м до 8,19 кН/м с шагом загрузки 0,74 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.

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 сравнительно пропорциональным изменением смещения от уровня нагрузки. При достижении расчетного усилия $P_{\text{р}} = 6,68$ кН/м прогиб фермы составил 1/484 от пролета, при допустимом прогибе 1/300. Характерное пластическое разрушение замечается при загрузке на 12,68 кН/м. При увеличении нагрузки до 15,48 кН/м произошло разрушение соединения, после чего нагрузки перераспределились и растянутый пояс фермы был разрушен от воздействия изгибающего момента в узле (рисунок 14).



Рисунок 14 – Узлы разрушенной конструкции фермы: а) растянутый пояс б) сжатый пояс

Разрушение узлов характерно для хрупкого типа разрушения. Время приведенного действия $t=1158$ сек, коэффициент безопасности для хрупкого разрушения $K_{\text{хр}} = 2,302$, отношение уровня разрушающей нагрузки к расчетной $I_r/P_{\text{р}} = 2,317$. Длительная несущая способность для расчетного срока эксплуатации 50 лет $I_r=8,94$ кН/м. Величина длительной нагрузки выше расчетной в 1,33 раза.

Для сравнения с экспериментальными данными был произведен расчет конструкции фермы по методике, предложенной автором. Эпюры прогиба для экспериментальных и расчетных значений приведены на рисунке 15.

Разница между 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.

Результаты эксперимента подтвердили достаточную надёжность конструкций из LVL с использованием когтевых шайб, а методика расчета соединения конструкций из LVL с использованием когтевых шайб, предложенная автором, позволяет получить результаты расчета, удовлетворительно согласующиеся с выполненными экспериментальными исследованиями.

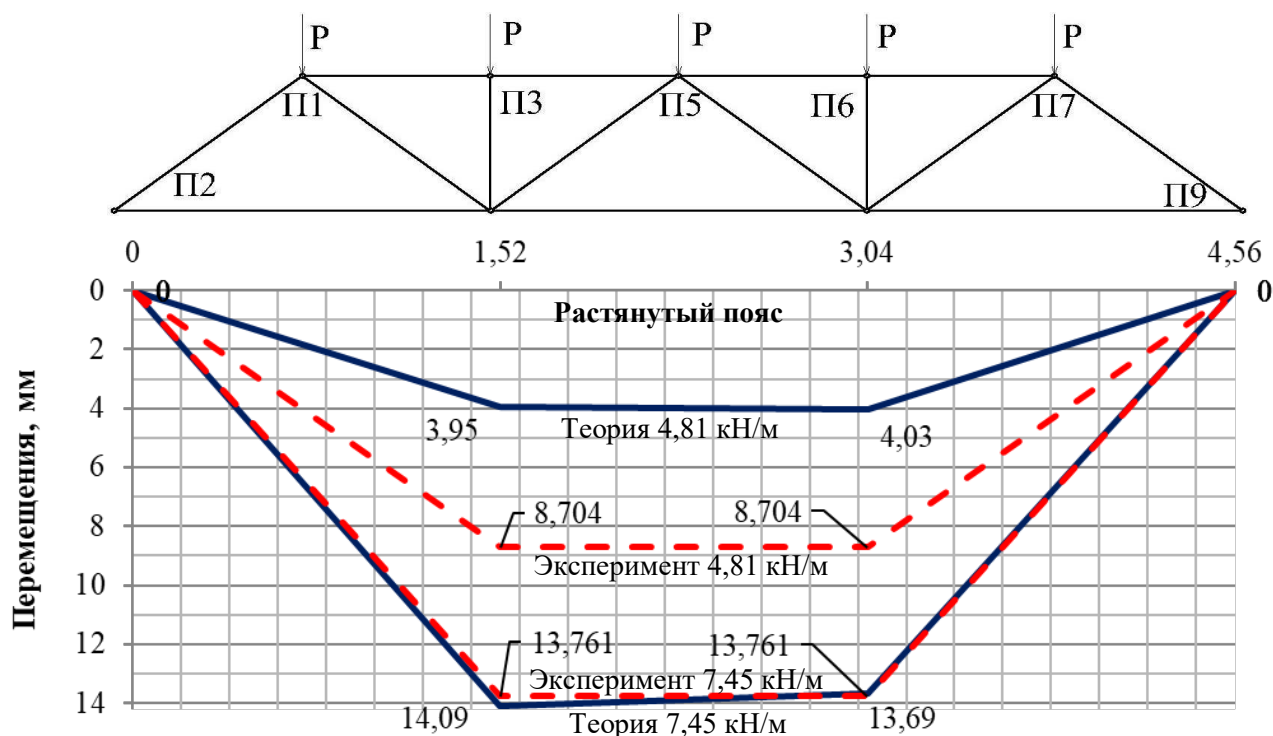


Рисунок 15 – Экспериментальные и теоретические эпюры прогибов узлов растянутого пояса фермы

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По итогам работы над диссертацией были получены следующие результаты:

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 к практическому применению:

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в инженерной практике при проектировании новых конструкций из *LVL* с использованием когтевых шайб, а также для определения и прогнозирования НДС уже существующих конструкций.

Дальнейшая разработка темы предусматривает расширение знаний о новых материалах на основе древесины, из которых могут быть выполнены конструкции, а также формах и материалах когтевых шайб, не рассмотренных в настоящей диссертации.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:

1. **Данилов Е. В.**, Определение линейной жесткости нагельных соединений с когтевыми шайбами в бруске *LVL*. [Текст] / Вестник гражданских инженеров //– 2017. – № 2 (61). – С. 81–85. (0,29 п. л.)

2. **Данилов, Е. В.** Исследование кратковременной прочности *LVL* при смятии треугольным штампом [Текст] / Вестник гражданских инженеров //– 2014. – № 1 (42). – С. 28–33. (0,7 п. л.)

3. **Данилов, Е. В.** Исследование длительной прочности *LVL* при смятии цилиндрическим штампом [Текст] / Вестник гражданских инженеров //– 2014 г., – № 4 (45). С. 38–42. (0,58 п. л.)

4. **Данилов, Е. В., Черных А. Г.** Методы исследования соединений деревянных конструкций на когтевых шпонках [Эл. ресурс] / Современные проблемы науки и образования// –2013 г., – № 2. (0,93 п. л. / 0,47 п. л.)

5. **Черных, А. Г., Данилов, Е. В., Григорьев, К. С., Коваль, П. С., Бакрышева В. В., Кашапов И. Т.** К вопросу определения несущей способности нагельных соединений в конструкциях из бруса, клееного из однонаправленного шпона (*LVL*). [Эл. ресурс]/ Современные проблемы науки и образования// – 2012 г., – № 4. (0,93 п. л. / 0,16 п. л.)

Статьи в других изданиях

6. **Данилов, Е. В.** Определение сопротивления давлению на внутреннюю поверхность отверстия и коэффициента балластной постели для цельной древесины и клееного бруса «Ultralam». Тезисы I-ой международной конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Инновационные технологии строительства». СФУ, Красноярск. – 2011 г.

7. **Данилов, Е.В.** Определение прочности и базовых величин для соединений на металлических пластинах типа «Bulldog» для цельной древесины и клееного бруса «Ultralam». Сборник докладов «Актуальные проблемы современного строительства». СПбГАСУ., Санкт-Петербург, – 2012 г.

8. **Данилов, Е.В.** К вопросу об НДС нагельных соединений из LVL. Сборник научных трудов посвященный 180-летию СПбГАСУ. СПбГАСУ, Санкт-Петербург, – 2012 г.

9. **Данилов, Е. В.** Расчет зуба когтевой шпонки как балки на упругом основании. Сборник научных трудов XVII международного симпозиума «Современные строительные конструкции из металла и древесины». – Одесса. – 2013 г.

10. **Данилов, Е.В.** Расчет зуба когтевой шпонки как балки на упругом основании. Сборник докладов «Актуальные проблемы современного строительства». СПбГАСУ., Санкт-Петербург, – 2013 г.

11. **Данилов, Е. В.** Пониткова Д. И., Подболоцкая А. С., Исследование крутильной жесткости соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из клееного бруса. Сборник докладов «Актуальные проблемы современного строительства». СПбГАСУ., Санкт-Петербург, – 2014 г.

12. **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. (0,465 п. л.)

Монографии

13. Глухих, В.Н., Черных, А.Г., **Данилов, Е.В.** Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины / В.Н. Глухих, А.Г. Черных, Е.В. Данилов. // СПбГАСУ, – 2018. – С. 302. (17,27 п. л./ 11,51 п. л.).

Патенты

14. **Данилов, Е.В.**, Черных, А.Г., Гимельфарб, И.А., Крупин, Е.В. Устройство для запрессовки когтевых шайб. / Е.В. Данилов, А.Г. Черных, И.А. Гимельфарб, Е.В. Крупин // Патент на полезную модель № 146232, заявка № 2014123970, приоритет полезной модели 10 июня 2014 г.

Компьютерная верстка С. Н. Яблокова

Подписано к печати 15.04.2019. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 43.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

