

*На правах рукописи*



**ЧАН Куок Фонг**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА  
УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЛВЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
САМОНАРЕЗАЮЩИХ НАГЕЛЕЙ**

Специальность: **05.23.01** – Строительные конструкции,  
здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

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, профессор;

**РУДНЕВ Игорь Владимирович,**  
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», кафедра строительных конструкций, доцент;

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова».

Защита диссертации состоится «23» июня 2021 года в 13:30 часов на заседании диссертационного Совета Д **212.223.03** ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, (аудитория 220 главного корпуса).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: 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/chan-kuok-fong>

Автореферат разослан «04» мая 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета



Попов Владимир Мирович

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время с развитием технологий производства комбинированных многофункциональных металлических нагелей, сочетание металлических соединителей и деревянных конструкций становится более разнообразным в общественных и жилых зданиях. Особенно можно отметить, применение скрытых нагельных соединений в проектах каркасных конструкций, рамах и фермах. Дизайн соединений элементов деревянных конструкций приобретает первостепенное значение. Узловые соединения деревянных элементов из быстрособираемого крепежа становятся все более востребованными при проектировании оригинальных умных конструкций по стандартам зеленого строительства.

Технология клееных деревянных конструкций, с применением скрытого металлического крепежа, позволяет осуществлять эффективное и конкурентоспособное проектирование и исполнение самых сложных задач в строительстве. Область использования таких систем достаточно широка: от соединения деревянных элементов в конструкции, до соединения конструкций с другими материалами – как сталь или бетон. Деревянные конструкции различного функционального назначения могут быть изготовлены с применением быстрособираемого крепежа: для общественных и жилых зданий, спортивных сооружений, навесов-автостоянок, ограждений и лестничных пролетов. Широкий ассортимент крепежных изделий позволяет подобрать для каждой поставленной задачи индивидуальное, надежное и рациональное техническое решение. Высокая степень предварительной сборки и быстрый монтаж соединительных элементов, гарантированно сэкономят средства при обеспечении требуемой надежности зданий, сооружений и повысят архитектурную привлекательность строительных объектов.

Однако нормативные документы до настоящего времени не содержат единой методики расчета несущей способности деревянных конструкций и рекомендаций по выбору быстрособираемых оптимальных соединителей. Исследование и совершенствование узловых соединений пространственного деревянного каркаса зданий необходимо для достижения наилучшей несущей способности несущих деревянных конструкций и уменьшения локальных хрупких разрушений.

**Степень разработанности темы исследования.** Основы теории расчета и результаты испытаний деревянных конструкций с использованием цилиндрических нагелей появились в начале XX века. Предметом исследования являются, как правило, соединения «дерево-дерево» и классические соединения «сталь-дерево». Зарубежный опыт исследования узловых соединений с использованием нагелей представлен в работах: A. Mischler, Andreasson E., Kroon M., Kevarinmäki, Quenneville P., Zarnani P., Muhammed, Pedersen M. U., Hanhijärvi A., Persson Jutemar E., Petersson V., Persson L., Dorn M., Olsson P. A. T., Rossi S., Crocetti R., Honfi D., Frühwald Hansson E, K. W. Johansen, Soltis L. A., Wilkinson T. L., Jan-Willem van de Kuilen, Misconel A.; Ballerini, Dorn M., de Borst K., J. Yurrita M.,

Cabrero J. M. В России – исследования известных российских учёных: Б. Л. Николаи, В. Ф. Иванова, А. Я. Найчука, В. В. Большакова, П. А. Дмитриева, Г. Г. Никитина, Шмидта А. Б., В. А. Кононова, С. М. Чернявского, Ю. В. Пискунова, А. Г. Черных и других. Вопросам исследования соединений деревянных конструкций, посвящены работы ученых: Т. Н. Базенкова, В. Н. Шапоникина, В. А. Кононова, Б. К. Михайлова, Н. В. Шешуковой, В. В. Пуртова, А. В. Туркова, С. А. Исупова, Е. В. Данилова, А. В. Павлика, П. Н. Смирнова, Г. Г. Никитина, М. М. Гаппоева, Е. В. Булова, и др.

На основе результатов исследований были разработаны методики расчета и принципы проектирования узловых нагельных соединений деревянных конструкций, благодаря этому применение и производство такого типа соединений получило широкое распространение. Европейский опыт применения соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с использованием самонарезающих нагелей показал большую эффективность, по сравнению с применением классических соединений, за счет сокращения сроков монтажа и увеличения размеров конструкций по мере необходимости, в соответствии с масштабом проекта, при обеспечении достаточной жесткости соединений.

В специализированных литературных источниках опубликованы в основном результаты исследований нагельных соединений со стальными пластинами в конструкциях из ЛВЛ для больших диаметров цилиндрических нагелей, при этом сведения для малых диаметров самонарезающих нагелей ограничены, и последовательность расчетов все еще не систематизирована. Отсутствует информация об оптимальной несущей способности соединений с применением самонарезающих нагелей (СНН) в конструкциях из ЛВЛ, ограничены сведения о правилах расчета и разработке оптимальной структуры соединений деревянных конструкциях из ЛВЛ.

**Цель исследования.** Развитие методов расчета соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с применением стальных пластин и самонарезающих нагелей, с учетом наступления одновременного пластического разрушения компонентов системы при растяжении.

Для достижения заданной цели исследования необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Анализ состояния вопроса по теории и практике применения самонарезающих нагельных соединителей для деревянных конструкций из ЛВЛ.
2. Провести анализ и предложить математические модели напряженно-деформированного состояния (НДС) деревянных конструкций из ЛВЛ, с применением самонарезающих нагельных элементов соединения.
3. Исследовать влияние величины допустимого отклонения в отверстиях ЛВЛ и металлической пластине на работу нагельного соединения.
4. Разработать оригинальную экспериментальную оснастку и провести лабораторные исследования напряженно-деформированного состояния соединений «сталь-дерево».

5. Выполнить численное моделирование, с использованием программы Ansys 18.2 и сравнить с результатами экспериментальных исследований.

6. Обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований, определить алгоритм расчета соединений «Сталь – ЛВЛ».

7. Предложить рекомендации по проектированию деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагельных соединителей.

**Объект исследования** – соединения элементов деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей и нескольких стальных пластин.

**Предмет исследования** – пластический и хрупкий механизмы разрушения и несущая способность соединений элементов конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей и стальных пластин.

**Область исследования** соответствует паспорту специальности ВАК 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения в части 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 исследования:**

1. Получены новые сведения о режимах разрушения нагельных соединений деревянных конструкций из ЛВЛ со стальными пластинами, установлена зависимость несущей способности от количества пластических шарниров нагеля.

2. Разработана оригинальная методика экспериментальных исследований соединений конструкций из ЛВЛ с использованием металлических пластин и самонарезающих нагелей при сжатии и растяжении. Получены новые данные по влиянию параметров нагельных соединений на несущую способность деревянных конструкций.

3. Подтверждена, с помощью численного моделирования, зависимость напряженно-деформированного состояния нагельного соединения от диаметра и допуска между диаметром нагеля и отверстиями в стальных пластинах.

4. Обоснована методика расчета нагельных соединений элементов деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей, с учетом наступления одновременного пластического разрушения компонентов системы при растяжении.

**Теоретическая значимость работы** заключается в определении несущей способности деревянных конструкций из ЛВЛ с применением стальных пластин и самонарезающих нагелей с учетом напряженно-деформированного состояния на основе анализа механизма хрупкого и пластичного разрушения элементов соединений «сталь-дерево».

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

– в определении влияния параметров элементов нагельных соединений (диаметра нагеля, допусков в соединении нагель-пластина) на несущую способность и распределение напряжений в поперечных сечениях конструкции;

– в предложенной методике экспериментальных исследований по определению несущей способности цилиндрических нагельных соединений, с учетом количества и размеров стальных пластин;

– в разработке методики проведения экспериментальных исследований по определению несущей способности самонарезающих нагельных соединений, с учетом количества и размеров стальных пластин;

– в разработке алгоритма расчета соединения с несколькими стальными пластинами на основе сравнения экспериментальных данных с расчетными значениями, полученными разными методами.

**Методология и методы диссертационного исследования** основываются на применение методики конечных элементов и теоретическом исследовании моделей напряженно-деформированного состояния соединений на основе анализа механизмов хрупкого и пластического разрушения, использование экспериментальной методики с несколькими вариантами схем соединений элементов деревянных конструкций из ЛВЛ, применение различных расчетных схем соединений, сравнение полученных аналитических, численных и экспериментальных результатов исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость напряженно-деформированного состояния соединений от диаметра и допуска между диаметром нагеля и отверстиями в элементах нагельного соединения.

2. Математические модели по определению несущей способности элементов деревянных конструкций из ЛВЛ с самонарезающими нагельными соединителями на основе анализа хрупкого и пластического механизма разрушения соединений.

3. Результаты экспериментальных исследований по определению фактической несущей способности для различных схем узловых нагельных соединений конструкций из ЛВЛ на растяжение.

4. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и численного моделирования соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с самонарезающими нагельями.

5. Методика вычисления узловых соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей.

**Степень достоверности результатов** обеспечивается применением общепринятых понятий, гипотез и допущений механики твердого деформируемого тела, современных подходов в анализе напряженно-деформированного состояния конструкций из дерева, использованием поверенного аттестованного измерительного оборудования; подтверждена удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований и результатов численного моделирования.

**Апробация результатов.** Основное содержание диссертационной работы доложено на всероссийских и международных конференциях:

– IX Международная научно-практическая конференция «Инновации в деревянном строительстве», СПб, СПбГАСУ, 2018 г.;

– 72-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», СПб, СПбГАСУ, 2019 г.;

– 75-я Научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета «Актуальные проблемы современного строительства», СПб, СПбГАСУ, 2019 г.;

– 73-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», СПб, СПбГАСУ, 2020 г.;

– МРСРЕ-2020 Международная конференция по физике материалов, строительных конструкций и технологий в строительстве, промышленности и производстве, Владимир, ВлГУ, 2020 г.;

– XII Международная конференция «Актуальные проблемы архитектуры и строительства», СПб, СПбГАСУ, 2020 г.

**Публикации.** По содержанию диссертации опубликованы 8 работ, в том числе: 3 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК; 2 работы в журналах, входящих в перечень SCOPUS.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа включает введение, 4 главы, основные результаты и выводы, заключение, список литературы и приложения. Объем диссертационного исследования составляет 164 страницы машинописного текста, в данный объем входят 129 страницы основного текста, содержащего 78 рисунков и 24 таблицы. Список литературы состоит из 120 источников, в том числе 56 источников – на иностранных языках.

**Во введении** обоснована актуальность темы, представлена степень разработанности исследования, определены цели и задачи исследований, указана научная новизна, представлена методология научных исследований, теоретическая и практическая значимость диссертации.

**В первой главе** «Состояние вопроса по проблеме соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей» представлены современные тенденции в развитии соединений деревянных конструкций, примеры деревянных конструкций с оригинальными решениями узловых соединений в рамах и фермах с самонарезающими нагельями. Сравнение соединений с самонарезающими нагельями и стальными пластинами с традиционными инженерными нагельными соединениями. Российский и зарубежный опыт расчета узловых соединений с использованием самонарезающих нагелей. Выявлена проблематика по данной теме, сформулированы цель и задачи исследований.

**Во второй главе** «Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) соединений элементов деревянных конструкций из ЛВЛ» рассмотрены теоретические аспекты расчета соединений с использованием самонарезающих нагелей и нескольких стальных пластин на основе методов расчета, с учетом моделей хрупкого и пластического разрушения соедине-

ний. Для проверки математических формул выполнены практические расчёты. Представлен алгоритм выполнения процесса расчета и оптимизации типа нагельного соединения.

**В третьей главе** «*Экспериментальное определение фактической несущей способности соединений*» представлены результаты экспериментальных исследований прочностных и жесткостных параметров соединений конструкций из ЛВЛ под воздействием кратковременных нагрузок, определены механические характеристики самонарезающих нагелей и стальных пластин. Выполнены эксперименты по определению несущей способности нагельного соединения с цилиндрическими нагельями (гвоздь) и самонарезающими (гладкий нагель с твердосплавной вставкой) с несколькими стальными пластинами при сжатии и растяжении. Представлена обработка и анализ полученных результатов.

**В четвертой главе** «*Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) соединения с применением самонарезающих нагелей по методу конечных элементов (МКЭ)*» изложена методика и результаты численного анализа с различными схемами нагельных соединений. Представлено сравнение результатов численного анализа и экспериментальных исследований.

**В заключении** представлены основные выводы по результатам диссертационной работы, даны рекомендации по проектированию соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с использованием самонарезающих нагелей.

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

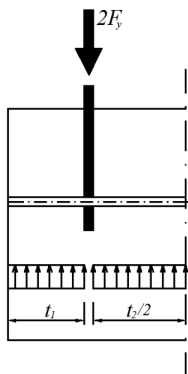
### **1. Зависимость напряженно-деформированного состояния от допуска между диаметром нагеля и отверстиями в элементах нагельного соединения.**

Нагель в соединении «сталь-дерево» действует как балка с распределенной нагрузкой от давления заделки (балка на упругом основании). Если нагель имеет сравнительно большой диаметр, он не будет изгибаться. При меньшем диаметре нагель будет деформироваться при изгибе, в конечном итоге создавая один или несколько пластичных шарниров в нагеле. После деформации сдвиговое воздействие может быть дополнено растягивающим действием в нагеле. Значение момента текучести  $M_{y,Rk}$  элемента нагельного типа зависит от диаметра  $d$  (мм) и материала нагеля, представленного  $f_u$  предельной прочностью стали (Н/мм<sup>2</sup>).

На рисунке 1 представлены теоретически возможные механизмы действия нагелей под нагрузкой в деревянных конструкциях, перечислены виды изгиба нагеля с формулами расчета по определению предела текучести и момент текучести.

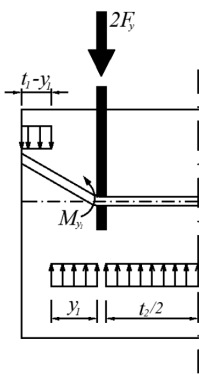
Механизмы изгиба нагеля и значения для каждого вида изгиба зависят от его физико-механических свойств, геометрических параметров нагеля и деревянных конструкций в соединении. Это определяет формирование пластических шарниров нагеля и разрушающие механизмы соединений.





Модель текучести I

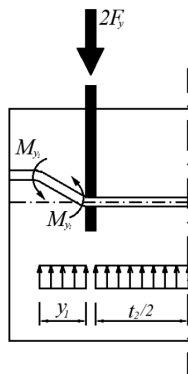
$$2F_y = \left( t_1 + \frac{t_2}{2} \right) \cdot f_e \cdot d$$



Модель текучести II

$$2F_y = \left( 2y_1 - t_1 + \frac{t_2}{2} \right) \cdot f_e \cdot d$$

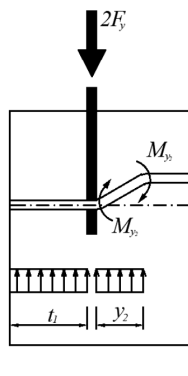
$$M_{y_1} = \left( y_1^2 - \frac{t_1^2}{2} \right) \cdot f_e \cdot d$$



Модель текучести III

$$2F_y = (t_1 + y_2) \cdot f_e \cdot d$$

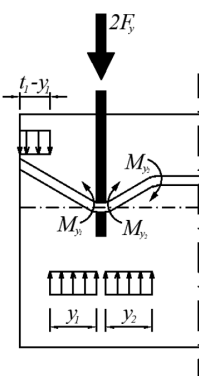
$$M_{y_2} = \frac{y_2^2 \cdot f_e \cdot d}{4}$$



Модель текучести IV

$$2F_y = \left( y_1 + \frac{t_2}{2} \right) \cdot f_e \cdot d$$

$$M_{y_1} = \frac{y_1^2 \cdot f_e \cdot d}{4}$$

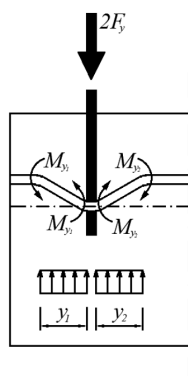


Модель текучести V

$$2F_y = (2y_1 - t_1 + y_2) \cdot f_e \cdot d$$

$$M_{y_1} = \left( y_1^2 - \frac{t_1^2}{2} \right) \cdot f_e \cdot d$$

$$M_{y_2} = \frac{y_2^2 \cdot f_e \cdot d}{4}$$



Модель текучести VI

$$2F_y = (y_1 + y_2) \cdot f_e \cdot d$$

$$M_{y_1} = \frac{y_1^2 \cdot f_e \cdot d}{4}$$

$$M_{y_2} = \frac{y_2^2 \cdot f_e \cdot d}{4}$$

Рисунок 1. Условия текучести деревянной конструкции и нагеля при соединении со стальными пластинами.  $F_y$  – предел текучести нагельного соединения;  $f_e$  – прочность заделки древесины;  $d$  – диаметр нагеля;

$M_{y_1}$ ,  $M_{y_2}$  – момент текучести нагеля.

Анализ соотношения нагрузки и перемещения в соединении с цилиндрическими нагелями показывает, что соединения деревянных конструкций в зданиях и сооружениях выполняются, как правило, с помощью креплений болтами, шурупами или нагелями диаметром от 5 до 24 мм, в редких случаях – до 30 мм. Использование таких соединений требует предварительного просверливания отверстий диаметром чуть большим, чем диаметр нагеля. Этот допуск, как правило, влечет за собой неравномерное распределение нагрузки на элементы соединения. Кривая зависимости скольжения и нагрузки соединительного элемента приобретает вид, представленный на рисунке 2а.

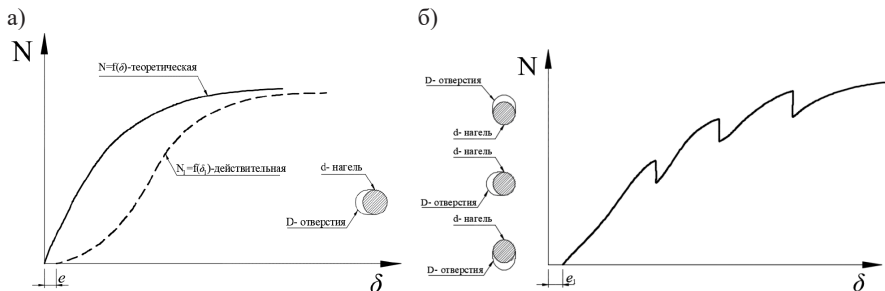


Рисунок 2. Действительная и теоретическая зависимость нагрузка-перемещение:

а) для одного нагеля в узле; б) для нескольких нагелей в узле

Для всего соединения, состоящего из трёх или четырёх соединительных элементов, зависимость  $N = f(\delta)$  всего узла представлена на рисунке 2б. Элемент соединения, с наименьшим первоначальным допуском, должен воспринимать наибольшую нагрузку, что ведет к его постоянным деформациям, вследствие прижима к древесине или срыва узла. В результате сильное скольжение узла крепления ведет к постоянным перемещениям и образованию трещин в соединении.

Влияние допустимого отклонения между предварительно просверленным отверстием в деревянных конструкциях и нагелем было исследовано с помощью численного анализа при различных вариантах величины допусков в соединении. Схемы и результаты анализа полей напряжений представлены на рисунке 3.

Результат анализа напряжений, деформаций и зависимость нагрузки и максимальных перемещений в соединении представлен на рисунке 4.

На основании анализа результатов расчета различных схем соединений с различными значениями допусков, возникла необходимость по разработке методик расчета узловых соединений деревянных конструкций с применением нагелей, учитывающих изменение механических свойств древесины в зоне контакта с нагелем и влияние допуска между предварительно просверленным отверстием и нагелем. Это является исходной предпосылкой для разработки соединения с применением самонарезающих нагелей, в которых допуски во всех элементах почти нулевые.

Допуски при изготовлении отверстий влияют на напряженно-деформированное состояние соединений. Для нагелей диаметром до 7 мм эффект нерав-

номерного распределения нагрузки между нагелями, возникающий из-за допусков, может быть уравновешен за счет пластических деформаций нагеля при изгибе. Соединения, изготовленные с высокой точностью, имеют более равномерное распределение нагрузки между нагелями и по поверхности деревянных конструкций.

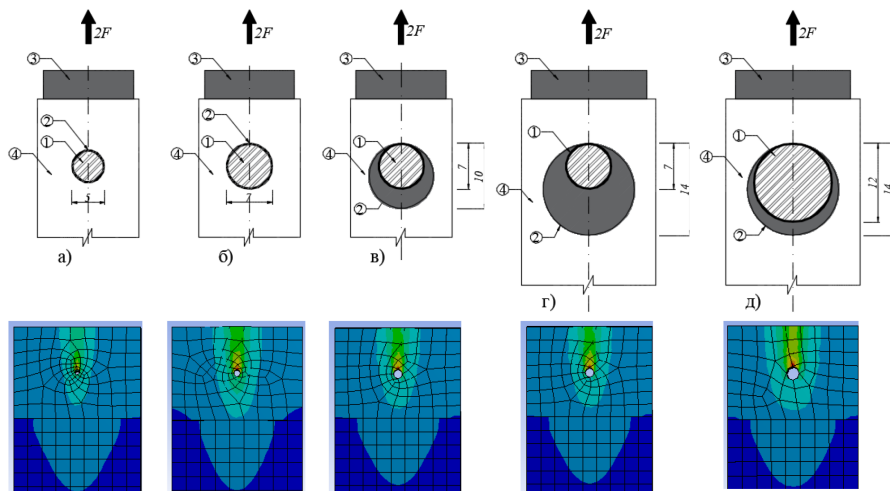


Рисунок 3. Результаты анализа поля напряжений и схемы расчета вариантов соединения с различными значениями допусков; 1 – нагель с диаметром  $d$  от 5 мм до 12 мм; 2 – предварительно просверленные отверстия; 3 – стальная пластина  $t = 10$  (мм); 4 – деревянная конструкция из ЛВЛ

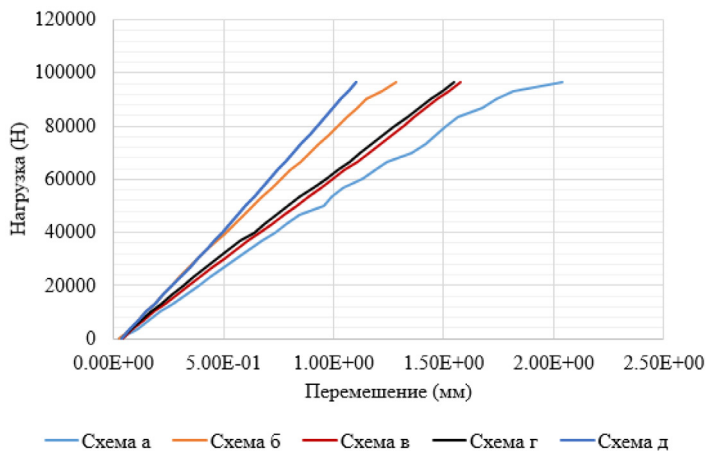


Рисунок 4. Зависимость «нагрузка-перемещение». Максимальные перемещения в соединении

## 2. Математические модели по определению несущей способности элементов деревянных конструкций из ЛВЛ с самонарезающимися нагельными соединителями на основе анализа хрупкого и пластического механизма разрушения соединения.

Основные параметры, влияющие на несущую способность соединений с самонарезающимися нагельными – это изгибающая способность нагелей; прочность деревянных конструкций, несущая способность нагелей на срез. Для повышения прочности и уменьшения смещения в общей конструкции элементы узловых соединений должны работать совместно. Необходимо достигать наилучшего напряженно-деформированного состояния соединения, важно оптимизировать количество нагелей, расположение стальных пластин и геометрические параметры связующих элементов. В данном исследовании была проанализирована модель нагельных соединений «сталь-дерево», по результатам предыдущих исследований с учетом влияния параметров и размеров нагелей и металлических пластин.

Ниже приводится анализ механизма работы одного нагеля в плоскости среза, для определения условий пластичности деревянной конструкции и нагеля при соединении со стальными пластинами, в зависимости от коэффициента гибкости  $\lambda_{ef} = t / d$ .

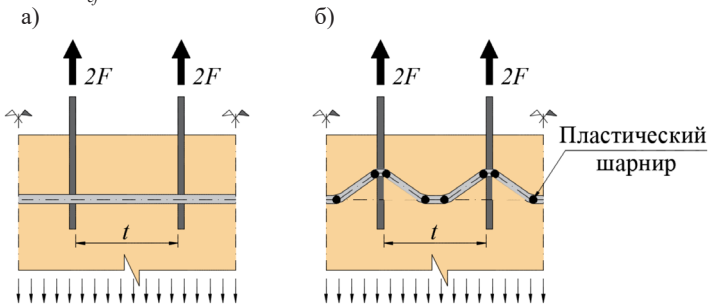


Рисунок 5. Влияние условий опоры нагеля и коэффициента гибкости нагеля  
а) небольшая деформация нагеля, б) большая деформация нагеля

Определение коэффициента предела гибкости нагеля для соединений с несколькими стальными пластинами по формуле

$$\lambda_y = 4 \cdot \sqrt{\frac{M_u}{f_h \cdot d^3}}. \quad (1)$$

$\lambda_{ef} < \lambda_y \rightarrow F = 0,5 f_h \cdot t \cdot d$  Небольшая деформация нагеля, вызывает смещение деревянной конструкции за счет смятия, представлена на рисунке 5а.

$\lambda_{ef} > \lambda_y \rightarrow F = 2\sqrt{M_u \cdot f_h \cdot t}$  При большей деформации нагель работает на изгиб, пластические шарниры соединения появляются по длине нагеля, рисунок 5б.

Где:  $M_u$  – предел текучести нагеля;  $F$  – несущая способность для одного нагеля по одной плоскости сдвига.

В данной работе использовался метод расчета несущей способности нагелей в нескольких поперечных сечениях, который основан на анализе механизмов отказа соединений «сталь-дерево», в режиме пластичного разрушения (ЕУМ европейская модель текучести). Метод предложен Педерсенем, который модифицировал уравнения для случая соединения с четырьмя плоскостями среза по формулам (2).

$$F_y = \min \begin{cases} \frac{1}{4}(2t_1 + t_2) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 01)} \\ \left( -\frac{1}{2}t_1 + \frac{t_2}{4} + \sqrt{\frac{1}{2}t_1^2 + \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} \right) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 02)} \\ \sqrt{4M_y \cdot d \cdot f_{h,0}} & \text{(Модель 03)} \\ \left( \frac{1}{2}t_1 + \frac{1}{2}\sqrt{t_1^2 + \frac{2M_y}{d \cdot f_{h,0}}} \right) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 04)} \\ \left( \sqrt{\frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} + \frac{1}{2}t_1 \right) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 05)} \\ \left( \sqrt{\frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} + \frac{1}{4}t_2 \right) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 06)} \\ \left( -\frac{1}{2}t_1 + \frac{1}{2}\sqrt{t_1^2 + \frac{2M_y}{d \cdot f_{h,0}}} + \sqrt{\frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} \right) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 07)} \end{cases} \quad (2)$$

Sawata et al. разработали аналогичный метод, основанный на ЕУМ. Этот метод расчета основан на определении эффективной рабочей длины нагеля при изгибе, зависящей от режима разрушения соединения.

$$t_{ef} = \min \begin{cases} 2t_1 + (n_s - 1)t_2 & \text{(Модель 01)} \\ 2t_1 \left( \sqrt{2 + \frac{2}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}} \left( \frac{d}{t_1} \right)^2} - 1 \right) + (n_s - 1)t_2 & \text{(Модель 02)} \\ n_s \cdot d \cdot \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} & \text{(Модель 03)} \\ 2t_1 + (n_s - 1) \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} & \text{(Модель 04)} \end{cases} \quad (3)$$

$$t_{ef} = \min \begin{cases} d \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}} + (n_s - 1)t_2} & \text{(Модель 05)} \\ 2t_1 \left( \sqrt{2 + \frac{2}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}} \left( \frac{d}{t_1} \right)^2} - 1 \right) + (n_s - 1)d \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} & \text{(Модель 06)} \end{cases} \quad (3)$$

Общая пластическая способность соединения  $F_D$  определяется как:

$$FD = t_{ef} f_{h,0} dn_c n_r \quad (4)$$

Хрупкость соединений является недостатком, обычно вызывающим разрушение конструкции. В настоящее время не существует метода, обеспечивающего расчетную методику хрупкого разрушения соединений с несколькими плоскостями сдвига.

Несущая способность нагелей в соединениях с моделями хрупкого разрушения рассчитывается по таблице 1.

Таблица 1. Несущая способность нагелей в соединениях с моделями хрупкого разрушения

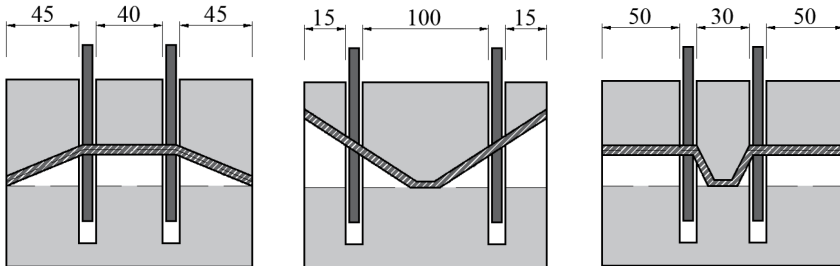
Модели разрушения	Скальвание и расщепление рядов	Скальвание блока	Растягивающие напряжения
Еврокод 5	$n_{ef} = \min \begin{cases} n_c \\ n_c^{0,9} \sqrt{\frac{a_1}{13d}} \end{cases} \quad (5)$	$F_{B,block} = \max \begin{cases} 1,5 A_{net,t} f_{t,0,k} \\ 0,7 A_{net,v} f_{v,k} \end{cases} \quad (6)$	$\sigma_{t,0,d} = f_{t,0,d} \quad (7)$
Quenneville et al.	$F_{B,row} = R_v n_r$ $R_v = 0,75 f_{v,k} K_{LS} n_c 2a_{cr,t} \quad (8)$	$F_{B,block} = R_v + 1,25 f_{t,0,k} A_{net,t} \quad (9)$	$F_{B,net} = f_{t,0,k} A_{net} \quad (10)$

Окончание табл 1.

Модели разрушения	Скалывание и расщепление рядов	Скалывание блока	Растягивающие напряжения
Hanhijärvi & Kevarinmäki	Предлагается комплексная расчетная модель, интегрирующая все возможные режимы хрупкого разрушения для соединений с нагелями		
	$F_B = \min \begin{cases} F_{b,1} \left(2 + \frac{t_2}{t_1}\right) & \text{Отказ внешнего элемента} \\ F_{b,1} \left(1 + 2 \frac{t_1}{t_2}\right) & \text{Отказ внутреннего элемента} \end{cases} \quad (11)$		

На основе проанализированной теории и формул, проведен анализ теоретических моделей расчета нагеля, учитывающий влияние количества нагелей и размеров стальных пластин в соединении, жесткостных и прочностных характеристик исходных материалов. Определены модели расчета несущей способности соединения, базирующиеся на физической сущности механизмов хрупкого и пластического разрушения. Предложен алгоритм расчета деревянных конструкций с самонарезающими соединениями, с учетом наступления одновременного пластического разрушения всех компонентов системы при растяжении.

В данном исследовании за основу принята методика расчета Еврокода 5, результаты сравнивались с другими расчетными методиками Pedersen, Sawata et al. и СП 64.13330.2017 Соединение оптимально, когда несущая способность соединения является наибольшей. При расчете получаем:  $F_{\text{нагель}} = 17,61 \text{ кН}$ , что соответствует значениям  $t_1 = 45 \text{ мм}$ ;  $t_2 = 40 \text{ мм}$ , и максимальная несущая способность соединения достигается в модели пластического разрушения (модель 02). На рисунке 6 показаны результаты расчетов.



Модель 02;  $F_{\text{нагель}} = 17,61 \text{ кН}$  (по Еврокоду 5)

Модель 07;  $F_d = F_{\text{нагель}} = 13,52 \text{ кН}$  (по Pedersen)

Модель 05;  $F_d = F_{\text{нагель}} = 6,38 \text{ кН}$  (по Sawata et al.)

Рисунок 6. Несущая способность соединения и геометрия соединения, полученные из результатов расчета. а)  $t_1 = 45 \text{ мм}$ ;  $t_2 = 40 \text{ мм}$ ;  $t_1 = 45 \text{ мм}$ ; б)  $t_1 = 15 \text{ мм}$ ;  $t_2 = 100 \text{ мм}$ ;  $t_1 = 15 \text{ мм}$ ; в)  $t_1 = 50 \text{ мм}$ ;  $t_2 = 30 \text{ мм}$ ;  $t_1 = 50 \text{ мм}$

При расчете нагеля в соединении с несколькими пластинами по СП 64.13330.2017 не учитываются разные модели изгиба нагеля, поэтому прове-

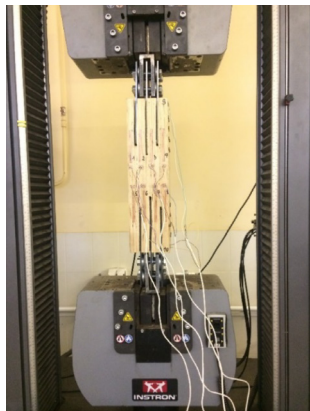
дено сравнение несущей способности соединения по СП 64.13330.2017 с экспериментальными результатами в разделе 3.

### 3. Результаты экспериментальных исследований по определению фактической несущей способности для различных схем узловых соединений конструкций из ЛВЛ на растяжение, с учетом влияния количества и схем установки пластин на несущую способность соединения «сталь-дерево» с самонарезающими нагелями.

Для подтверждения выводов и предположений, сделанных в теоретической части диссертации, сравнения расчетных значений несущей способности с фактическими, был проведен комплекс испытаний моделей узловых нагельных соединений деревянных конструкций из ЛВЛ со стальными пластинами.

На первом этапе эксперимента было принято решение провести исследование несущей способности деревянных конструкций с различными конструктивными схемами соединений с металлическими пластинами и цилиндрическими нагелями (гвозди) (Рисунок 7). Выбрано три схемы соединения с различными стальными пластинами: С-01 ( $^{140}140^{140}$ ); С-02 ( $^{140}175^{140}$ ); С-03 ( $^{175}140^{175}$ ). Числа в скобках ( $^{140}140^{140}$ ) – глубина заделки стальных пластин в деревянную деталь.

а)



б)



Рисунок 7. Образец перед испытанием. а) экспериментальная машина INSTRON 5989; б) измерительно-вычислительный комплекс с тензорезисторными датчиками (ИБК) Tokyo Sokki Kenkyujo Co.

Результаты экспериментальных исследований соединений при растяжении с различными схемами испытаний (Рисунок 8).

Значения расчетной несущей способности нагельных соединений, полученных по российским нормативам ( $T_{сн}$ ), Европейским нормам ( $F_w$ ), Метод Педерсена ( $F_w$ ), и экспериментальные данные ( $F_{1,2}$ ) приведены ниже. Графическая интерпретация полученных значений фактической и расчетной несущей способности для разных схем соединений при растяжении представлено на рисунке 9.



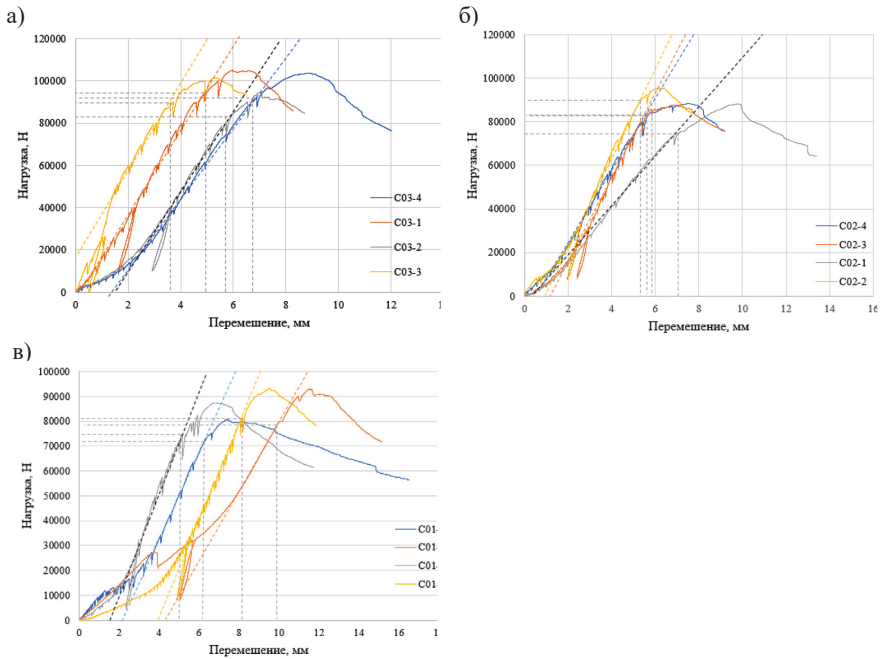


Рисунок 8. Графики зависимости «нагрузка-перемещение» при растяжении соединений а) С-01, б) С-02, в) С-03.

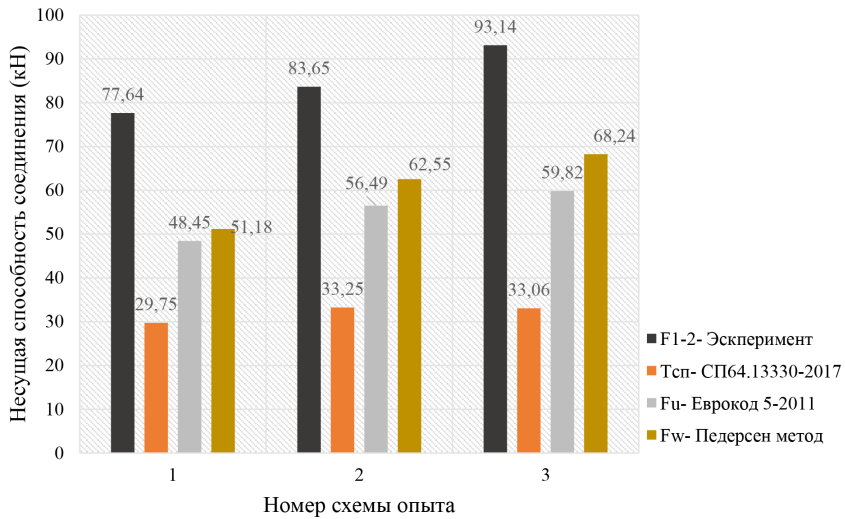


Рисунок 9. Фактические и расчетные значения несущей способности соединений «сталь-дерево» при растяжении.

Из рисунка 9 прослеживается расхождение между теоретическими и фактическим значениями несущих способностей в зависимости от параметров соединения. В результате наибольшее соотношение между фактической и теоретической несущей способностью получено при расчете по СП 64.13330.2017. Следовательно, в данном случае можно сделать вывод о завышенном запасе несущей способности, что требует уточнения расчетных формул для нагельных соединений с использованием трех стальных пластин (соединения «сталь-дерево»).

Были проведены испытания (Рисунок 10) на растяжение нагельных соединений при разных конструктивных схемах, а также изучены механизмы разрушения соединений и режимов работы самонарезающих нагелей, и сравнение результатов с предыдущими теоретическими и экспериментальными исследованиями. Установлено влияние количества и схем расстановки пластин на несущую способность соединения «сталь-дерево» с самонарезающими нагельными.

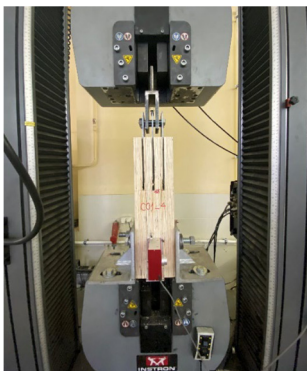


Рисунок 10. Фактическая экспериментальная схема испытания соединений

Зависимость смещений стальных пластинах относительно деревянных конструкций ЛВЛ (вдоль волокон) от нагрузки для схемы с тремя стальным пластинами представлена на рисунке 11.

Зависимость смещений стальных пластин относительно деревянных конструкций ЛВЛ (вдоль волокон) от нагрузки для схемы с различным количеством стальных пластин представлена на рисунке 12.

Во всех соединениях с использованием самонарезающих нагелей (С01–С05), определение максимальной нагрузки ( $F_{\text{деф-2мм}}$ ) фиксировалось при достижении предельного смещения равного 2 мм, которое фиксировалось с помощью датчиков перемещения, а значение нагрузки записывалось с монитора разрывной машины. Анализ данных экспериментальных исследований (Рис. 11 и 12) показывает, что соотношение несущей способности одной и двух стальных пластин в соединении больше, чем соотношение несущих способностей двух и трех стальных пластин.

Данные экспериментальных исследований показывают нелинейную зависимость величины несущей способности от количества стальных пластин в сое-

динении. В соединениях, где пластические шарниры появляются в зоне контакта между ЛВЛ и нагелями (C03), несущая способность соединения больше, чем в соединениях, в которых пластические шарниры не появляются или пластические шарниры появляются только в местах вставки нагелей в стальные пластины (C01; C02).

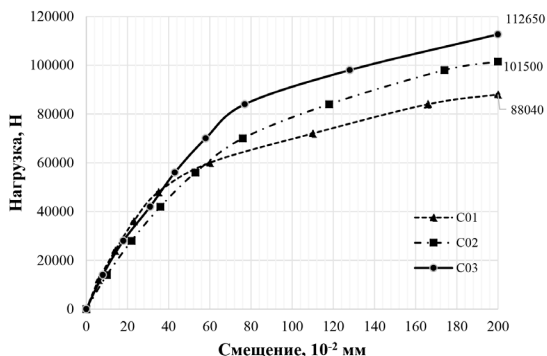


Рисунок 11. Зависимость «нагрузка – смещение» стальных пластин относительно деревянных конструкций ЛВЛ (вдоль волокон)

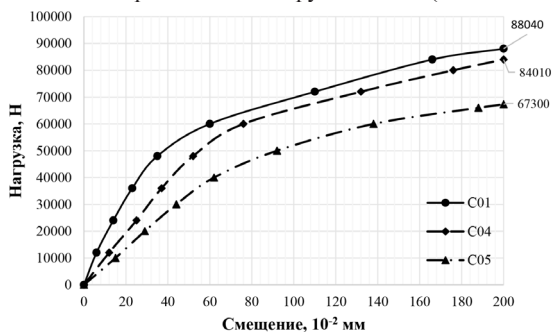


Рисунок 12. Зависимость «нагрузка-смещение» стальных пластин относительно деревянных конструкций ЛВЛ (вдоль волокон)

Экспериментальные наблюдения разрушения соединения соответствуют пластическим и хрупким механизмам разрушения, представленным в теоретической части работы. Кроме того, из анализа экспериментальных результатов видно, что положение стальных пластин в соединении оказывает влияние на механизм изгиба нагелей и разрушения деревянных конструкций из ЛВЛ. Как показано на рисунке 13, характер разрушения – изгиб нагеля преимущественно наблюдается на внешней части деревянной конструкции ЛВЛ. В месте контакта отверстия в деревянной конструкции ЛВЛ с цилиндрическими нагелями распределяемая нагрузка от нагелей приводит к разрушению ЛВЛ при смятии. При увеличении напряжения наблюдается реализация модели скалывания с разрушением рядов.

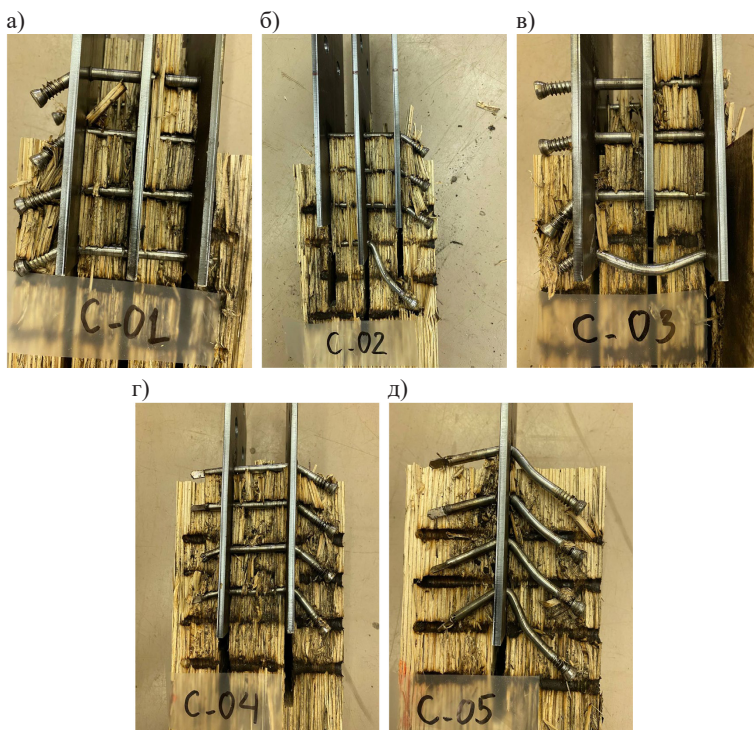


Рисунок 13. Виды разрушения соединений деревянных конструкций из ЛВЛ в различных схемах соединения

а) схема С01; б) схема С02; в) схема С03; г) схема С04; д) схема С05

#### 4. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и численного моделирования соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с самонарезающими нагелями.

Ниже показаны результаты исследований с помощью МКЭ – влияния диаметра нагеля на распределение напряжений в нагельном соединении при растяжении. Для этого на концах (А, Б) соединения «сталь-дерево» были установлены нагели с различными размерами диаметров нагелей (10 мм и 7 мм).

В таблице 2 представлены относительные деформации древесины в области отверстий для нагелей различных диаметров. Деревянные элементы в области А имеют большие по величине относительные деформации, чем в области Б. Максимальное значение деформаций всегда находится в области А в процессе увеличения нагрузки. Следовательно, в этой области произойдет хрупкое разрушение.

Конечно-элементные модели в программе Ansys Workbench 18.2 выполнены в соответствии с формой и размерами образцов, использованных в экспериментальных исследованиях.

Таблица 2. Изополя относительных деформаций в отверстиях конструкций из ЛВЛ

Нагрузка	0,2 МПа	0,4 МПа	0,6 МПа	0,8 МПа	1,0 МПа
Относительные деформации в области А, d = 10 мм					
Относительные деформации в области Б, d = 7 мм					
$\epsilon_{\max}$ , мм/мм	8,3224e-002	8,3367e-002	8,3548e-002	9,417e-002	0,10402

Изополя распределения перемещений в деревянных конструкциях из ЛВЛ и в нагелях приведены для каждой схемы на рисунке 14.

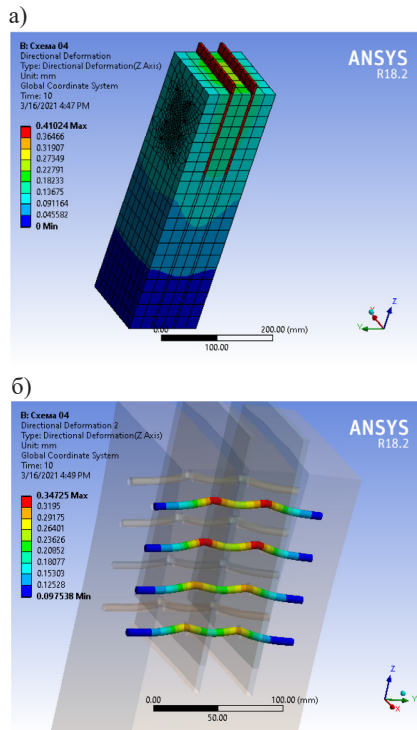


Рисунок 14. Изополя распределения перемещений плиты соединения:  
а) для ЛВЛ; б) для нагелей

Проведен анализ напряженно-деформированного состояния элементов в соединении, определены значения относительных деформаций на поверхности внутренней и внешней частей деревянной конструкции из ЛВЛ. Результаты зависимости «нагрузка – относительная деформация» при растяжении соединений «сталь-дерево» по результатам экспериментов и численного моделирования представлены на рисунке 15.

Определены изополя распределения деформаций в деревянных конструкциях из ЛВЛ и нагелях для каждой схемы, что позволяет прогнозировать появление пластических шарниров на нагеле, при увеличении нагрузки, а также значение нагрузки, соответствующее допустимому пределу смещения между стальными пластинами и деревянными конструкциями из ЛВЛ в соответствии со стандартами СП 64.13330.2017.

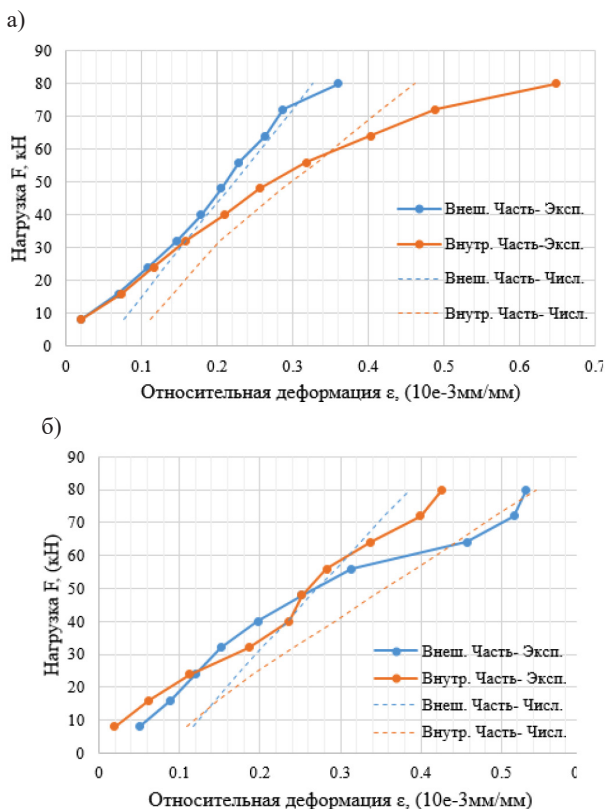


Рисунок 15, начало. Зависимость «нагрузка – относительная деформация» для растяжения соединений «сталь-дерево» по результатам эксперимента и численного метода: а) схема C01; б) схема C02; в) схема C03

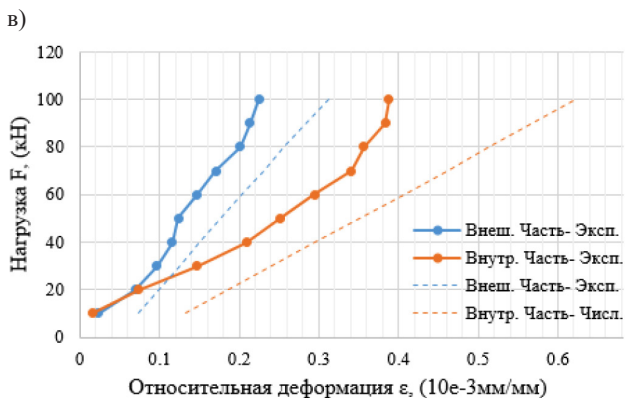


Рисунок 15, окончание

На графике (рисунок 15) видны расхождения значений относительной деформации на внутренних и внешних элементах конструкции ЛВЛ при испытании нагельных соединений на растяжение. Сравнительный анализ данных, полученных численным анализом и экспериментальным путем, показал хорошую сходимость результатов, что подтверждает возможность использования МКЭ для проверки достоверности расчетных и экспериментальных результатов.

### 5. Методика расчета узловых соединений из деревянных конструкций (ЛВЛ) с применением самонарезающих нагелей при растяжении

На основе анализа и сравнения экспериментальных и расчетных данных, полученных по различным математическим моделям, разработана методика расчета соединений деревянных конструкций с использованием самонарезающих нагелей в следующей последовательности:

- расчет несущей способности деревянных конструкций из ЛВЛ при растяжении;
- расчет несущей способности деревянных конструкций из ЛВЛ при смятии;
- расчет несущей способности самонарезающих нагелей при изгибе;
- определение количества поперечных срезов по длине нагелей в соединении (зависит от количества стальных пластин и размера стальных пластин в соединении);
- выполняется сравнение значений несущей способности элементов из древесины при смятии и растяжении со значениями несущей способности нагелей при изгибе.

В данной методике по определению несущей способности деревянных элементов конструкций из ЛВЛ при растяжении и смятии рассчитываются в соответствии с СП 64.13330.2017, с последующим сравнением значений с несущей способностью нагелей (расчет по Еврокод 5 с учетом механизма пластиче-



ского разрушения). Для расчета оптимальной несущей способности соединения сталь-дерево, предлагается совместное использование СП64.13330.2017 и Еврокод 5.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам работы над диссертацией получены следующие результаты:

1. Установлено, что применение соединения «дерево-сталь» в каркасных конструкциях, фермах способствует повышению несущей способности. Это эффективное решение при разработке крупногабаритных конструкций, позволяющее легко соединять деревянные конструкции с другими материалами в здании с помощью стальных пластин.

2. Впервые исследованы нагельные соединения с использованием различных стальных пластин в структуре соединения с конструкциями из ЛВЛ. Определена несущая способность данного типа соединения, проведено экспериментальное исследование и численное моделирование напряженно-деформированного состояния узловых соединений.

3. Определено и подтверждено влияние диаметра нагеля на распределение напряжений в соединении. Численное и экспериментальное моделирование свидетельствуют, что уменьшение диаметра нагелей способствует распределению локальных напряжений в деревянных конструкциях, тем самым значительно уменьшая вероятность хрупкого разрушения соединения.

4. Рассмотрен широкий спектр моделей напряженно-деформированного состояния соединений на основе анализа механизмов хрупкого и пластического разрушения с учетом наступления одновременного пластического шарнира для всех компонентов системы при растяжении. Установлено, что увеличение количества пластических шарниров нагеля снижает напряжение в деревянной конструкции из ЛВЛ и увеличивает несущую способность соединения.

5. Выполнен сравнительный расчет несущей способности для типа соединения «сталь-дерево», на примере применения двух стандартов СП64.13330.2017 и Еврокод 5, с использованием коэффициентов пересчета при выполнении совместного расчета.

6. Разработана методика расчета несущей способности соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей, в зависимости от количества срезов по длине нагеля (количество стальных пластин в соединении), с учетом режима разрушения элементов в соединении, позволяющая вычислить несущую способность соединения с несколькими стальными пластинами. Данные экспериментальных исследований показывают нелинейную зависимость величины несущей способности от количества стальных пластин в соединении.



7. Предложена новая структура соединения «сталь-дерево» с различными размерами стальных пластин в соединении. В соединениях, где пластические шарниры появляются в области контакта между деревом ЛВЛ и нагелями, получилась несущая способность соединения больше, чем в соединениях, в которых пластические шарниры не появляются или пластические шарниры появляются только в местах вставки стальных пластин.

8. Установлены расхождения в 12–16% между результатами теоретических и экспериментальных исследований соединений ЛВЛ с цилиндрическими и самонарезающими нагелями при испытании на растяжение, что подтверждает теоретические предпосылки о влиянии допустимого отклонения просверленных отверстий в древесине ЛВЛ и диаметра нагелей на несущую способность соединения.

9. Определена зависимость напряженно-деформированного состояния элементов в соединении с помощью программы Ansys 18.2, с учётом влияния количества и размеров стальных пластин в соединении с применением самонарезающих нагелей. На основе зависимости деформации от напряжения объясняются виды пластического разрушения нагелей и показана достоверность и сходимость с результатами эксперимента. Таким образом, данный подход может быть использован для прогнозирования появления и расположения пластических шарниров на нагелях при воздействии нагрузки.

10. Разработан алгоритм расчета соединений деревянных конструкций из ЛВЛ «сталь-дерево», который апробирован на практике и может быть использован при корректировке нормативных документов.

#### **IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

##### **Статьи, опубликованные в рекомендованных ВАК изданиях:**

1. Черных А. Г., **Чан Куок Фонг**. Анализ несущей способности соединения с применением самонарезающих нагелей в различных моделях пластического разрушения // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 89–99.

2. **Чан Куок Фонг**. Анализ различных моделей разрушения соединений «сталь – дерево» с самонарезающими нагелями // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 72–81.

3. **Чан Куок Фонг**. Определение несущей способности соединений «сталь-дерево» конструкций из ЛВЛ при растяжении // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 1 (84). С. 61–69.

**Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых  
международной системой цитирования Scopus:**

4. **Tran Quoc Phong.** Analysis and optimization of the bearing capacity of connecting wooden structures with application of dowel type self-drilling // 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 896 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012037>.

5. A. G. Chernykh, **T. Q. Phong**, D. V. Nizhegorodtsev. Allowance effect between the pre-drilled hole and the dowel on the bearing capacity of the connection // Contemporary Problems of Architecture and Construction: Proceedings of the 12th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction (ICCPAC 2020), 25–26 November 2020, Saint Petersburg, Russia (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003176428>.

**Статьи, опубликованные в прочих изданиях:**

6. **Чан Куок Фонг.** Разработка конструкций деревянных домов – решение строительства для умного города // Материалы 9-й Международной научно-практической конференции СПбГАСУ. «Инновации в деревянном строительстве», – 2018. – с. 10–17.

7. **Чан Куок Фонг.** Расчет несущей способности клееных деревянных соединений при сжатии с применением самонарезающих нагелей // В Сборник докладов «Актуальные проблемы современного строительства». – СПбГАСУ – СПб, – 2019 г. – С. 111–117.

8. **Чан Куок Фонг.** Анализирование и оптимизация несущей способности соединения с применением самонарезающих нагелей в пластичном разрушение // Сборник статей магистрантов и аспирантов СФ 2020. – СПбГАСУ–СПб, – 2020 г. – С. 90–107.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 21.04.2021. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 32.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

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

