

На правах рукописи



Смирнов Павел Николаевич

**ТОРЦЕВЫЕ НАГЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ
«Строительство»

Научный руководитель: кандидат технических наук
Погорельцев Александр Алексеевич

Официальные оппоненты: Лабудин Борис Васильевич
доктор технических наук,
ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический)
федеральный университет им. М.В.
Ломоносова», профессор кафедры
инженерных конструкций и архитектуры

Крицин Алексей Владимирович
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВПО «Нижегородский
государственный архитектурно-строительный
университет», доцент кафедры
железобетонных, каменных и деревянных
конструкций

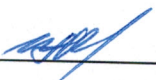
Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Владимирский
государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая
Григорьевича Столетовых».

Защита состоится «16» февраля 2016 г. в 15:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство» по адресу: г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 (Рязанский проспект д. 61).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НИЦ «Строительство» и на сайте www.cstroy.ru

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Саврасов Иван Петрович

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящая работа направлена на исследование соединений с применением нагелей, установленных в торец деревянных элементов, на развитие и совершенствование методов расчета нагельных соединений.

Актуальность темы диссертации. Торцевые нагельные соединения являются востребованными в практике применения деревянных конструкций, при этом отсутствие данных для расчета таких соединений ограничивает их применение.

Использование нагелей для торцевых соединений деревянных конструкций может быть эффективным решением, в сравнении с аналогичными (традиционными) решениями, и позволяет снизить расход металла, обеспечить его достаточную огнестойкость без специальной обработки, так как стальные нагели располагаются внутри деревянной конструкции.

Разработка и исследование торцевых нагельных соединений является актуальной задачей, так как позволяет обосновать возможность их практического применения и способствует развитию новых способов соединения элементов деревянных конструкций.

Степень разработанности проблемы. В нашей стране имеется значительный накопленный опыт в области исследований нагельных соединений, весомый вклад в который внесли работы Б. Л. Николаи, В. Ф. Иванова, Г. Г. Никитина, А. В. Леняшина, Ю. В. Слицкоухова, В. М. Коченова, Ю. М. Иванова, П. А. Дмитриева и других авторов. В результате анализа состояния вопроса установлено, что работа торцевых нагельных соединений не достаточно изучалась. Считалось, что такого рода соединения обладают относительно низкими несущей способностью и эксплуатационной безопасностью.

Было определено, что предложенные в отечественных нормах проектирования расчетные зависимости для нагельных соединений со стальными накладками и прокладками не позволяют оценить их несущую способность при “защемлении” нагеля в стальной пластине. В результате не используется возможность значительного увеличения их несущей способности. Кроме того, в нормах не учитывается эффект от применения нагелей из высокопрочной стали.

В результате анализа методов оценки несущей способности нагельных соединений, установлено, что исследования в нашей стране проводились на образцах соединений деревянных конструкций.

В зарубежном опыте для расчета и исследований нагельных соединений разработана методика, основанная на определении физико-механических характеристик применяемых материалов. Считается, что проводить исследования на основании испытаний образцов соединений крайне сложно из-за большого количества возможных на практике типов нагельных соединений. Испытания образцов соединений выполняются, как правило, только для подтверждения результатов исследований. Также установлено, что подходы в нашей стране и в зарубежных странах к допускаемым на материалы нагрузкам имеют значительные отличия, поэтому, имеющиеся в Европе и Северной Америке методики определения прочностных характеристик материалов не могут быть перенесены на отечественные исследования.

Известны зарубежные исследования торцевых нагельных соединений. Н. Riberholt и J. Ehlbeck определили рабочие параметры стержня с резьбой по всей длине, установленного на клею и работающего в торце деревянного элемента на сдвиг. С целью разработки узловых соединений для цельнодеревянных панелей типа CLT или X-lam T. Uibel и H. J. Blass провели испытания нагелей, работающих в торце деревянного элемента. Несмотря на имеющийся европейский опыт исследований торцевых нагельных соединений, его результаты не отражены в Европейских нормах проектирования из-за недостаточного объема проведенных исследований. Например, остался открытым вопрос о прочности торцевых нагельных соединений в деревянных конструкциях из условия раскалывания.

В североамериканских нормах расчет торцевых нагельных соединений предлагается выполнять как соединений с нагелями, работающими поперек волокон древесины, с последующим понижением прочности на эмпирический коэффициент. При этом, отсутствуют рекомендации по расстановке нагелей на торцевой поверхности и их расчету из условия раскалывания.

Цель исследования: Разработка торцевых нагельных соединений деревянных конструкций и методики их расчета.

Задачи исследований:

1. Разработка методики расчета нагельных соединений, основанной на определении механических характеристик материалов соединения и учитывающей отечественный подход к допускаемым нагрузкам на материалы.
2. Определение механических характеристик материалов, требуемых для расчета нагельного соединения.

3. Экспериментальное исследование кратковременной и длительной прочности нагеля, установленного в торце, с анализом напряженно-деформированного состояния и проверка торцевых нагельных соединений деревянных конструкций.
4. Определение параметров расстановки нагелей в торце деревянного элемента.
5. Определение прочности торцевых соединений из условия раскалывания.
6. Экспериментально-теоретическое обоснование эффективности использования стальных накладок и нагелей из высокопрочной стали для нагельных соединений, в том числе торцевых.
7. Разработка рекомендаций по применению, расчету и обеспечению эксплуатационной безопасности торцевых нагельных соединений.

Объект исследования: Соединение деревянных конструкций на нагелях, установленных в торец.

Предмет исследования: Несущая способность и деформативность торцевых нагельных соединений деревянных конструкций.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Предложена и обоснована методика расчета нагельных соединений, основанная на определении свойств материалов соединения;
2. Экспериментально установлена зависимость прочности древесины нагельного гнезда на смятие от диаметра нагеля и плотности древесины;
3. Определена зависимость для расчета прочности нагеля при изгибе от его диаметра и временного сопротивления стали;
4. Установлена зависимость требуемого диаметра отверстия в стальной пластине от диаметра нагеля, толщины пластины и прочности стали для обеспечения условия “защемления” нагеля;
5. Определены параметры расстановки нагелей;
6. Установлены зависимости для расчета торцевых нагельных соединений из условия раскалывания, учитывающие размеры поперечного сечения деревянного элемента и параметры расстановки нагелей;
7. Предложено и экспериментально проверено новое техническое решение торцевого соединения деревянных балочных конструкций с использованием нагелей.

На защиту выносятся:

1. Методика расчета торцевых и других нагельных соединений, основанная на определении свойств используемых в соединении материалов.

2. Способы повышения несущей способности нагельных соединений за счет жесткого крепления нагелей в стальных пластинах и применения высокопрочных нагелей.
3. Экспериментальные данные кратковременных и длительных испытаний нагельных соединений.
4. Методика расчета торцевых нагельных соединений из условия раскалывания.
5. Методы повышения несущей способности торцевых нагельных соединений из условия раскалывания деревянного элемента.
6. Разработанное новое техническое решение торцевого нагельного соединения балочных элементов.
7. Расчет узловых торцевых нагельных соединений и рекомендации по их применению и обеспечению эксплуатационной безопасности.

Методологической основой диссертационного исследования явилось использование методов математического анализа, строительной механики, теории упругости, пластичности и разработанной экспериментальной методики.

Личный вклад соискателя заключается в следующем:

- в выборе и обосновании актуальности темы исследования, а также в постановке задач для реализации поставленной в работе цели;
- в сравнительном анализе отечественной и зарубежных методик оценки несущей способности нагельных соединений;
- в разработке, обосновании и экспериментальной проверке предложенной методики расчета, основанной на определении свойств используемых в нагельном соединении материалов;
- в разработке и проверке торцевых нагельных соединений;
- в разработке рекомендаций по расчету торцевых нагельных соединений, их усилению от раскалывания и обеспечению эксплуатационной надежности.

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.23.01 - Строительные конструкции, здания и сооружения, п.3 "Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействия на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности".

Достоверность результатов исследований подтверждается:

1. Общепринятыми гипотезами и допущениями в области строительной механики, теории упругости и пластичности;
2. Адекватностью физической и математической моделей материала нагеля и древесины;
3. Сходимостью теоретических результатов исследований с данными экспериментов;
4. Новизна предложенного технического решения торцевого соединения балочных элементов подтверждается авторским свидетельством на изобретение №2471930.

Практическое значение диссертационной работы заключается в том, что были разработаны методики экспериментального исследования и расчета нагельных соединений, основанные на определении свойств материалов. Автором были определены способы повышения несущей способности и разработаны рекомендации по применению и обеспечению безопасности торцевых нагельных соединений. Результаты исследований позволили определить расчетные зависимости для несущей способности торцевых нагельных соединений, вошедшие в СП 64.13330.2011 - Деревянные конструкции (актуализированная редакция СНиП II-25-80).

Результаты диссертационной работы применены более чем в 10 объектах несущих большепролетных конструкций покрытий зданий, в том числе в складах минеральных удобрений пролетом 84м, расположенных в районе Гремячинского месторождения в Волгоградской области, в складе апатитовой руды пролетом 36м в г. Кингисепп Ленинградской области и других.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлены и доложены:

1. Научно-техническая конференция "Новые исследования в области деревянных конструкций" посвященная 110-ю со дня рождения Г.Г.Карлсена, Москва, РААСН, 2004г.;
2. X, XI, XII, XV, XVI, XVII Международный симпозиум "Современные строительные конструкции из металла и древесины", Одесса (2005г., 2006г., 2007г., 2010г., 2011г., 2013г.);
3. Семинар при Международной выставке дерева в строительстве и архитектуре "WOOD Build-2005", Москва РАДеКК, 2005г.;
4. Семинар "Комплексный подход к проектированию зданий и сооружений", Москва, МВЦ "Крокус-Экспо", 2005г.;

5. Семинар "Малоэтажное строительство для Подмосковья", Москва, МВЦ "Крокус-Экспо", 2006г.;
6. Международная научно-техническая конференция "Промышленное и гражданское строительство в современных условиях", Москва 2011г.;
7. Научно-техническая конференция с международным участием "Деревянные конструкции: разработка, исследования, применение", Москва 2015г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных статей, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и получено авторское свидетельство на изобретение.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего 173 наименования, в том числе 77 на иностранном языке, и трех приложений. Работа изложена на 220 листах машинописного текста, содержит 90 рисунков, 29 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследований, приводятся основные положения диссертации, которые выносятся на защиту, обосновывается их научная новизна.

В первой главе приводится анализ развития отечественной и зарубежной методики расчета нагельных соединений на основании исследований, приведенных в работах В.Ф. Иванова, Г.Г. Никитина, А.В. Лентяшина, Ю.В. Слицкоухова, В.М. Коченова, Ю.М. Иванова, П.А. Дмитриева, Ю.В. Пискунова, K.W.Johansen, H.Riberholt, J.Ehlbeck, B.O.Hilson, H.J.Blass, G.W.Trayer, P.Aune, M. Patton-Mallory, T.L.Wilkinson и др.

В результате установлено, что в нашей стране работа нагеля в торце деревянного элемента не достаточно исследовалась. В Европе исследования торцевых нагельных соединений проводились, но их результаты не отражены в европейских нормах проектирования из-за недостаточного объема проведенных исследований. В Северной Америке имеется методика расчета торцевых нагельных соединений, но они не рекомендуются для ответственных узловых соединений без специальных способов повышения их надежности.

В ходе исследования определены способы повышения несущей способности торцевых нагельных соединений за счет применения нагелей из высокопрочной стали и использования в соединениях стальных накладок с "жестким" креплением к ним нагелей. Имеющиеся в отечественных нормах

расчетные зависимости не учитывают указанные способы повышения несущей способности соединений, поэтому разработка методики расчета, основанной на отечественном опыте исследований с учетом действительных физико-механических свойств используемых материалов, является актуальной задачей.

Во второй главе проведен анализ существующих отечественных и зарубежных методов оценки несущей способности нагельных соединений с целью выбора и дальнейшего усовершенствования методики их испытаний и расчета. Рассмотрен экспериментальный метод определения несущей способности нагельных соединений, предложенный Ю.М.Ивановым, а также экспериментально-теоретический метод, разработанный В.М.Коченовым и получивший развитие в работе П.А.Дмитриева. Рассмотрены аналогичные методики, используемые в Европе и Северной Америке, основанные на исследованиях L.R.J.Whalen, I.Smith, J.Ehlbeck, H.Werner, A.Leijten, T. Uibel, H.J. Blass, A.Jorissen, T.L.Wilkinson, N.Harding, A.H.R. Fowkes и др.

В результате определено, что учет особенностей поведения стали при работе на изгиб позволяет повышать прочностные характеристики стального нагеля при расчете соединений, работающих в упругопластической стадии. Рассмотрены особенности образования одного и двух пластических шарниров в нагеле. Установлено, что в случае образования двух пластических шарниров имеет место эффект перераспределения изгибающих моментов, который повышает прочностные характеристики стали примерно на 20%.

По результатам сравнительного анализа методов оценки несущей способности нагельных соединений, были сделаны следующие выводы:

1. В отечественном опыте исследований нагельных соединений используется в основном экспериментальный метод, а в зарубежных странах широкое применение получил экспериментально-теоретический метод, который позволяет сократить время исследований. Испытание образцов соединений выполняется только в контрольных целях.
2. В Европе и в Северной Америке для оценки несущей способности нагельных соединений в нормах проектирования приведены уравнения для определения прочности нагельного основания и предельно допустимого изгибающего момента в нагеле, а также разработаны стандарты для их экспериментального определения.
3. Величина изгибающего момента позволяет более точно оценить действительную работу нагеля при изгибе, чем величина сопротивления нагеля изгибу, традиционно используемая в отечественном опыте исследований. Определение сопротивления нагеля изгибу связано со

сложностью установления величины момента сопротивления для сечения нагеля в упругопластической стадии работы.

4. Использование зависимости изгибающего момента от предела прочности стали является более предпочтительным, по сравнению с пределом текучести, так как в этом случае учитывается способность строительных сталей к самоупрочнению.
5. Замена в уравнениях предельного равновесия расчетного сопротивления нагеля изгибу величиной изгибающего момента позволяет более точно оценить несущую способность соединений со стальными пластинами при условии образования двух пластических шарниров за счет учета эффекта перераспределения моментов.

Далее, во второй главе рассмотрен экспериментально-теоретический метод определения рабочих параметров нагельных соединений, основанный на известных уравнениях предельного равновесия, в которых для описания процесса работы материалов под нагрузкой используется концепция жесткопластического тела. С учетом неограниченной длины заделки нагеля в торце деревянного элемента условно определены шесть плоских моделей торцевых нагельных соединений (рис.1), и установлены соответствующие им уравнения для расчета по прочности:

для модели №1а:
$$T_n^{мин} = \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{M_n R_{см,\alpha} d_n}, (H) \quad (1)$$

для модели №1б:
$$T_n = \frac{R_{см,\alpha} \cdot d_n \cdot a}{2+\beta} \left(\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_n}{R_{см,\alpha} \cdot d_n \cdot a^2}} - \beta \right), (H) \quad (2)$$

для модели №2:
$$T_n = \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_n R_{см,\alpha} d_n}, (H) \quad (3)$$

для модели №3:
$$T_n = R_{см90/0} d_n l_n \left(\sqrt{2 + \frac{4M_n}{R_{см90/0} d_n l_n^2}} - 1 \right), (H) \quad (4)$$

для модели №4:
$$T_n = 1,4 \sqrt{2M_n R_{см90/0} d_n}, (H) \quad (5)$$

для модели №5:
$$T_n = \sqrt{2M_n R_{см90/0} d_n}, (H) \quad (6)$$

где $\beta = \frac{R_{см,90/0}}{R_{см,\alpha}}$; $R_{см,90/0}$ - прочность на смятие в торцевом элементе, МПа; $R_{см,\alpha}$ -

прочность на смятие под углом к волокнам, МПа; M_n - момент пластического деформирования нагеля, Н*мм; a - ширина деревянного элемента с направлением волокон α_0 - α_{90} , мм; d_n - диаметр нагеля, мм.

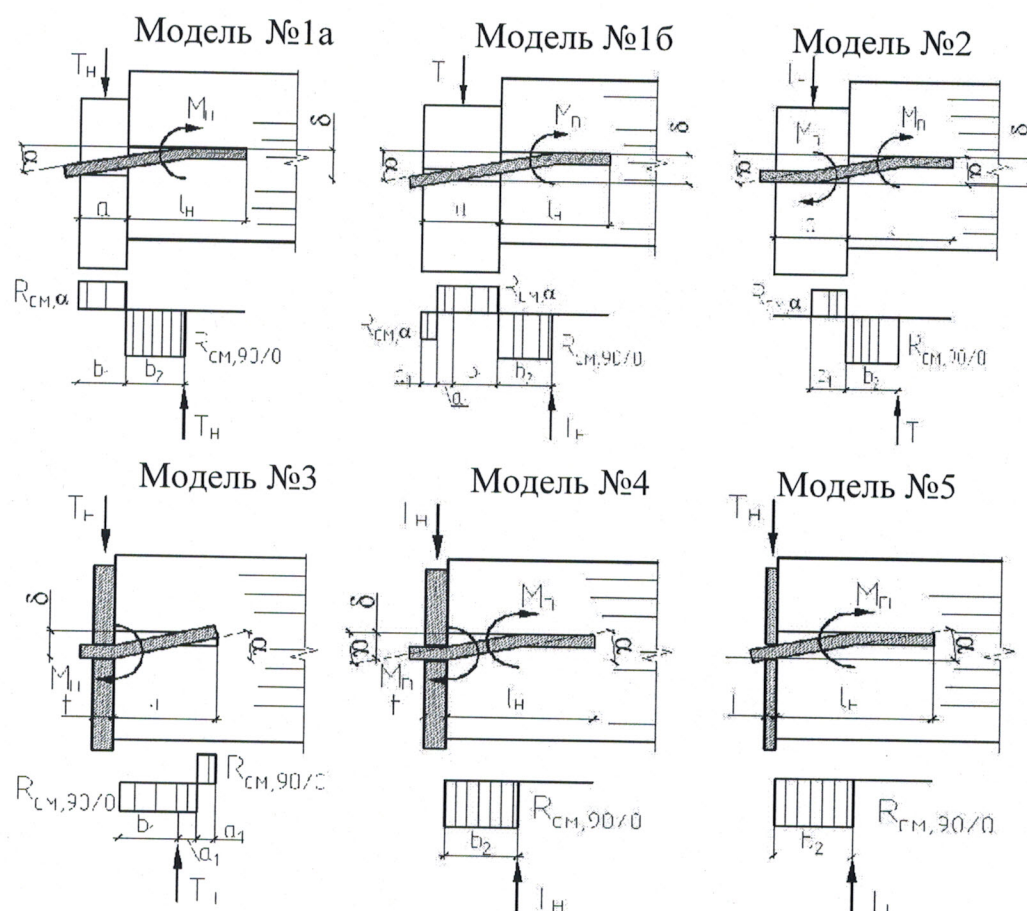


Рис.1. Модели торцевых нагельных соединений

Для расчета деформаций нагельных соединений при кратковременных нагрузках разработан новый метод, учитывающий рабочую модель соединения, диаметр нагелей и прочностные характеристики стали.

Для определения деформаций предложена следующая зависимость:

$$\delta^{I-II} = b \cdot \operatorname{tg} \alpha^{yup}, \text{ (мм)} \quad (7)$$

где δ^{I-II} – величина деформаций, соответствующая границе упругой работы соединения, b – расстояние до точки изгиба нагеля в деревянном элементе, мм; α^{yup} – угол кривизны нагеля, соответствующий области упругой работы соединения, принимается равным пределу упругой работы нагеля при изгибе, град.

Для модели №1: $b = (b_1 + a_1) + b_2$,

где $a_1 = \frac{a-b_1}{2}$, b_1 и b_2 – расстояния от плоскости сдвига до точек приложения

усилия к соединению:

$$b_1 = \frac{a}{2+\beta} \left(\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M^{пред}}{R_{см,\alpha} \cdot d_n \cdot a^2}} - \beta \right), (\text{мм}) \quad - \text{ для элемента, в котором}$$

нагель работает под углом к волокнам

$$b_2 = \frac{b_1}{\sqrt{\beta}}, (\text{мм}) \quad - \text{ для торцевого элемента}$$

Для модели №2: $b = b_1 + b_2$

$$\text{где } b_1 = \sqrt{\frac{2M^{пред}}{R_{см,\alpha} \cdot d_n}} \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}}, (\text{мм}) \quad - \text{ для элемента, в котором нагель работает}$$

под углом к волокнам;

$$b_2 = \sqrt{\frac{2M^{пред}}{R_{см,90/0} \cdot d_n}} \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}}, (\text{мм}) \quad - \text{ в торцевом элементе.}$$

$$\text{для модели №3: } b = b_1 = l_n \left(\sqrt{2 + \frac{4M_n}{R_{см90/0} d_n l_n^2}} - 1 \right), (\text{мм})$$

$$\text{Для модели №4: } b = b_1 = 2 \sqrt{\frac{M_n}{R_{см90/0} d_n}}, (\text{мм})$$

$$\text{Для модели №5: } b = b_1 = \sqrt{\frac{2M_n}{R_{см90/0} d_n}}, (\text{мм})$$

Экспериментально определены зависимости предела прочности на сжатие от плотности и модуля упругости древесины:

- при сжатии вдоль волокон:

$$\sigma_{с,0} = 1,48 \rho_{12\%}^{0,55}, \text{ МПа} \quad (8)$$

$$\sigma_{с,0} = 35 + 0,0006 E_{0,12\%}, \text{ МПа} \quad (9)$$

- при сжатии поперек волокон:

$$\sigma_{с,90} = 0,0009 \rho_{12\%}^{1,35}, \text{ МПа} \quad (10)$$

$$\sigma_{с,90} = 0,0006 E_{90,12\%}^{0,29}, \text{ МПа} \quad (11)$$

где $\sigma_{с,0}$ и $\sigma_{с,90}$ – пределы прочности древесины на сжатие вдоль и поперек волокон; $\rho_{12\%}$ – плотность древесины, при влажности 12%; и $E_{0,12\%}$, $E_{90,12\%}$, – модули упругости древесины вдоль и поперек волокон, при влажности 12%

В результате испытаний малых образцов (рис.2) и с учетом уравнения (8) установлены зависимости для механических характеристик древесины нагельного основания при работе нагеля в торце деревянного

элемента от диаметра нагеля и предела прочности древесины на сжатие вдоль волокон:

- для сопротивления смятию при границе упругой работы (Отечественная методика):

$$R_{см,90/0}^{I-II} = 0,35(0,12 + d_n^{-0,55})\sigma_{с,0} = 0,52(0,12 + d_n^{-0,55})\rho_{12\%}^{0,55}, \text{ МПа} \quad (12)$$

- для сопротивления смятию при условном пределе текучести (Североамериканская методика, ASTM D5764):

$$R_{см,90/0}^T = 0,12(1 + d_n^{-0,55})\sigma_{с,90/0} = 0,18(1 + d_n^{-0,55})\rho_{12\%}^{0,55}, \text{ МПа} \quad (13)$$

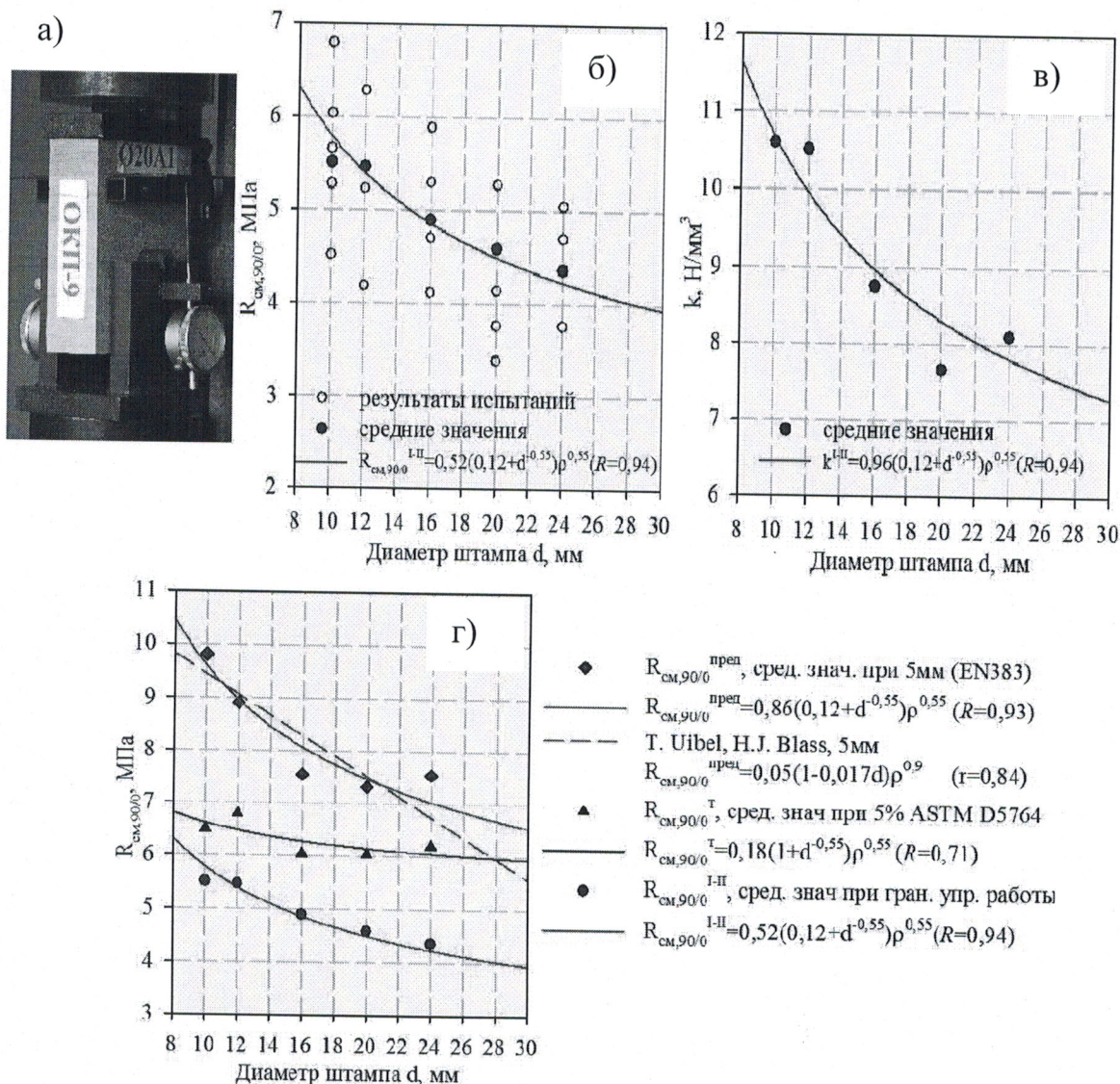


Рис.2. Механические характеристики древесины основания нагеля, работающего в торце деревянного элемента: а – испытательный стенд; б, в и г – установленные зависимости прочностных и деформационных характеристик древесины нагельного основания от диаметра нагеля (влаж.12%, $\rho_{сред}=420\text{кг/м}^3$)

- для сопротивления смятию при разрушении (Европейская методика, EN383):

$$R_{см,90/0}^{пред} = 0,58(0,12 + d_n^{-0,55})\sigma_{с,90/0} = 0,86(0,12 + d_n^{-0,55})\rho_{12\%}^{0,55}, \quad (14)$$

МПа

- для коэффициента жесткости основания при границе упругой работы:

$$k_{90/0}^{I-II} = 0,65(0,12 + d_n^{-0,55})\sigma_{с,90/0} = 0,96(0,12 + d_n^{-0,55})\rho_{12\%}^{0,55}, \text{ Н/мм}^3 \quad (15)$$

На основании экспериментальных данных, полученных П.А.Дмитриевым, были определены аналогичные зависимости для нагеля, работающего под углом к волокнам:

- для сопротивления смятию древесины вдоль волокон: (16)

$$R_{см,0}^{I-II} = 0,74(1 - 0,005d_n)\sigma_{с,0} = 1,1(1 - 0,005d_n)\rho_{12\%}^{0,55}, \text{ МПа}$$

$$R_{см,0}^{пред} = 0,082(1 - 0,01d_n)\rho_{12\%}, \text{ МПа} \quad (17)$$

- для сопротивления смятию древесины поперек волокон:

$$R_{см,90}^{I-II} = 1,48(0,12 + d_n^{-0,55})\rho_{12\%}^{0,55}, \text{ МПа} \quad (18)$$

$$R_{см,90}^{пред} = 1,88(0,12 + d_n^{-0,55})\rho_{12\%}^{0,55}, \text{ МПа} \quad (19)$$

- для сопротивления смятию древесины под углом к волокнам:

$$R_{см,\alpha}^{I-II} = \frac{R_{см,0,90}^{I-II}}{1 + \left(\frac{R_{см,0,90}^{I-II}}{R_{см,90/0}^{I-II}} - 1 \right) \sin^2 \alpha}, \text{ МПа} \quad (20)$$

В результате испытаний стальных нагелей на изгиб (рис.3а, 3г, 3д) определены следующие зависимости:

- для изгибающего момента, соответствующего границе упругой работы (Отечественная методика):

$$M^{упр} = 0,3\sigma_u d_n^{2,6}, \text{ Н/мм}^2 \quad (21)$$

где σ_u – временное сопротивление стали растяжению;

- для изгибающего момента, соответствующего условному пределу текучести (Североамериканская методика, ASTM F1575):

$$M_{5\%}^m = 0,37\sigma_u d_n^{2,6}, \text{ Н/мм}^2 \quad (22)$$

- для предельно допустимого изгибающего момента (Европейская методика, EN409):

$$M^{пред} = 0,4\sigma_u d_n^{2,6}, \text{ Н/мм}^2 \quad (23)$$

Для расчета по деформациям и определения предельно допустимой нагрузки на нагельное соединение экспериментально определены зависимости угла изгиба нагеля от его диаметра и временного сопротивления стали:

$$\alpha^{упр} = 0,0021\sigma_u (1,18 + 0,18 \sin(23d_u + 183)), \text{ град} \quad (24)$$

$$\alpha^{пред} = 4\alpha^{упр}, \text{ град} \quad (25)$$

где $\alpha^{упр}$ – угол изгиба нагеля при границе упругой работы; $\alpha^{пред}$ – угол изгиба, соответствующий границе упругопластической работы нагеля.

По результатам испытаний нагелей на изгиб в основании стальной пластины (рис.3б и 3в) установлена зависимость диаметра отверстия, требуемого для “зашемления” нагеля, от прочности и диаметра нагеля, а также от толщины стальной пластины:

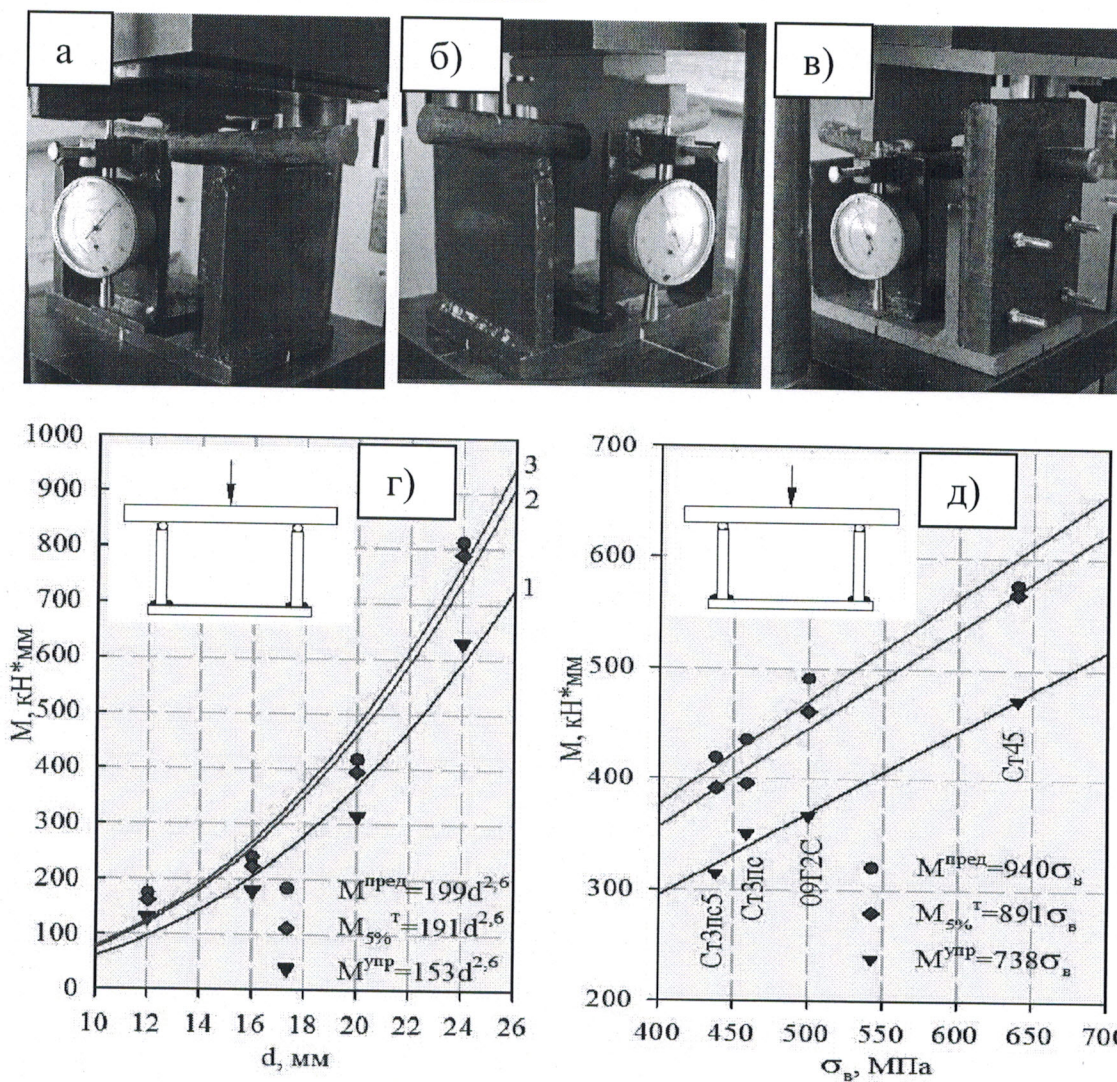


Рис.3. Механические характеристики нагеля при изгибе: а, б, в – испытательные стенды; г и д – зависимости изгибающего момента от диаметра стержня и временного сопротивления стали, соответственно

$$d_{омв} \leq d_n + tg\alpha^{nped} \cdot t, \text{ мм} \quad (26)$$

где t – толщина стальной накладки.

Из анализа работы стержня, приваренного к пластине, определен коэффициент, учитывающий перераспределение моментов для случая образования двух пластических шарниров, который должен учитываться при определении рабочих параметров нагельных соединений:

$$k_M = \frac{M_{nl}^{yup}}{M^{yup}} = 1,2 \quad (27)$$

В результате экспериментально-теоретического исследования торцевых нагельных соединений установлены уравнения для расчета по прочности и деформациям торцевых нагельных соединений. Определены прочностные и деформационные характеристики древесины и стали, требуемые для расчета нагельных соединений, в зависимости от физико-механических свойств материалов (12-15, 21-23).

На примере торцевых нагельных соединений со стальными накладками выполнен сравнительный анализ отечественной и зарубежных методик оценки несущей способности. Расчетные значения, полученные по предложенной методике по методике EuroCode5, оказались близкими, расхождение составило не более 10%. Эти результаты оказались примерно в 1,5 раза больше величин, определенных по методике, заложенной в СНиП II-25-80. Значительное расхождение значений связано с тем, что в отечественных нормах не учитывается эффект от “защемления” нагеля в стальной накладке. Кроме того, при определении формул для СНиП было принято заниженное значение сопротивления нагеля изгибу. Расчетная несущая способность нагельных соединений со стальными накладками, определенная по американским нормам NDS, оказалась близкой к величинам, полученным по методике СНиП II-25-80.

В третье глава приведены результаты экспериментальных исследований кратковременной и длительной несущей способности торцевых нагельных соединений (рис.4 слева), которые позволили установить их действительную несущую способность и деформативность.

Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов исследований (рис.4 справа) показал достаточную надежность предложенного экспериментально-теоретического метода расчета нагельных соединений.

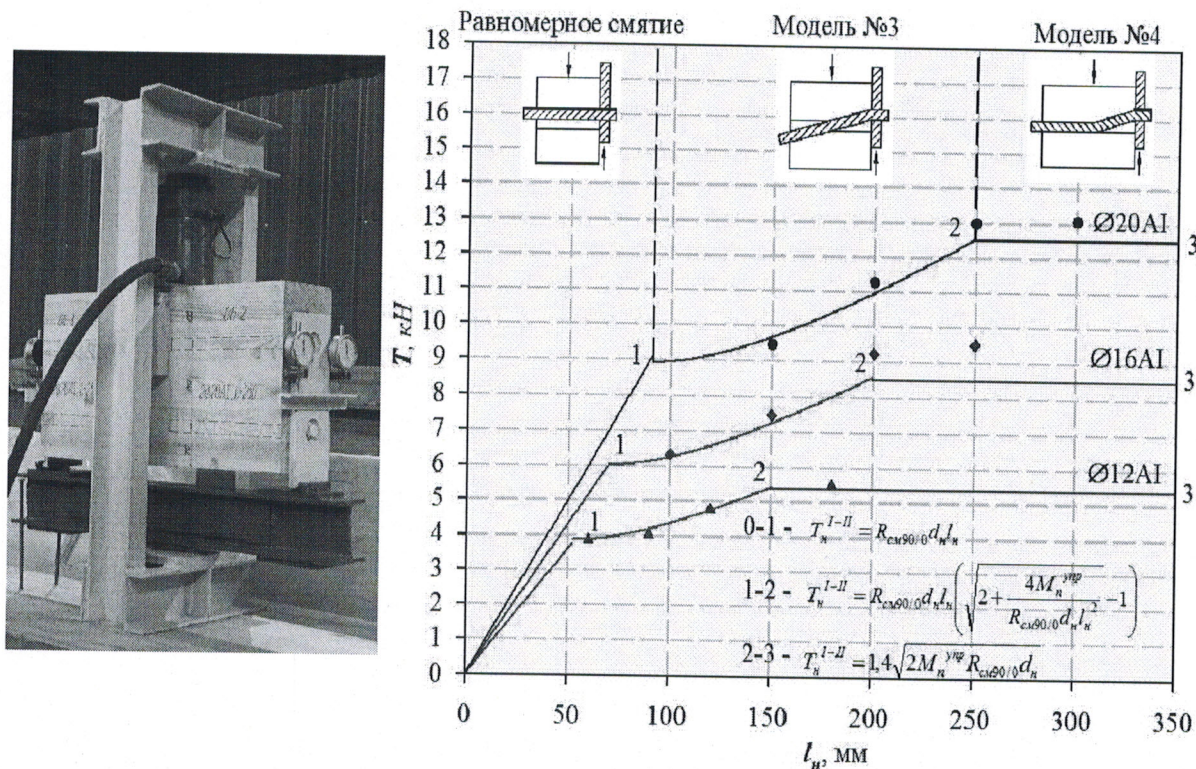


Рис.4. Испытательный стенд(слева) и график зависимости несущей способности торцевого соединения от длины нагеля (справа)

По результатам длительных испытаний, которые проводились на протяжении 8 лет, был определен коэффициент надежности для торцевых нагельных соединений:

$$K' = \frac{T^{I-II}}{T_{расч}} = 1,95 \quad (28)$$

Для определения несущей способности торцевых нагельных соединений из условия раскалывания торца деревянного элемента была применена механическая модель разрушения балок от раскалывания поперек волокон, используемая в Европе. Применение данной модели совместно с полученными результатами испытаний позволило установить минимально допустимые параметры расстановки нагелей на торцевой поверхности (рис.5) и определить следующие уравнения для их проверки на раскалывание:

$$F_{90/0} = \begin{cases} 13b \sqrt{\frac{S_1}{\left(1 - \frac{S_1}{h}\right)}} \geq T_{n,1} \\ 10,7b \sqrt{\frac{h-S_3}{\left(1 - \frac{h-S_3}{h}\right)}} \geq T_{n,\Sigma} \end{cases}, (H) \quad (29)$$

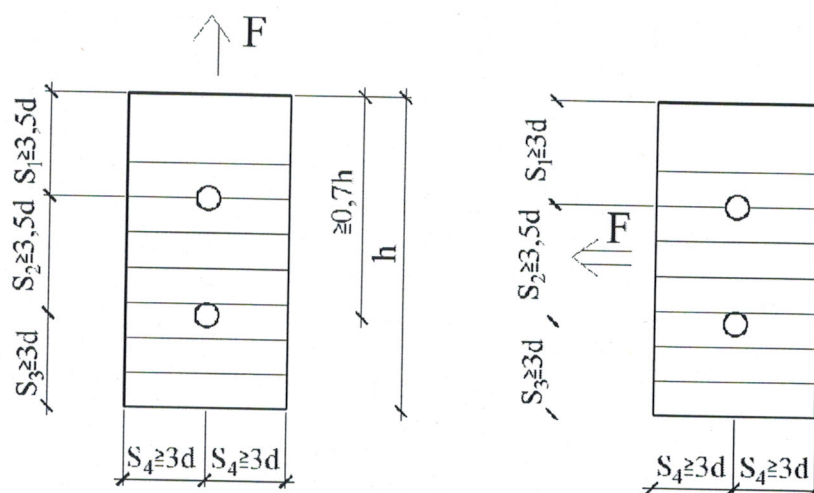


Рис.5. Параметры расстановки нагелей на торцевой поверхности

где $F_{90/0}$ – несущая способность соединения из условия раскалывания $T_{н,1}$ – несущая способность одного нагеля, Н; $T_{н,\Sigma}$ – несущая способность соединения на один срез, Н; h – высота деревянного элемента, мм; b – ширина сечения деревянного элемента, мм; S_1 и S_2 – параметры расстановки нагелей, приведенные на рис.6, мм.

На основании анализа ранее проводимых отечественных исследований для определения расчетной величины $F_{90/0}^{расч}$ предложено использовать коэффициент надежности, равный 0,3.

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния торцевого соединения с креплением нагелей в стальной накладке на сварке (рис.6 и 7) подтвердило возможность использования предложенных параметров расстановки нагелей.

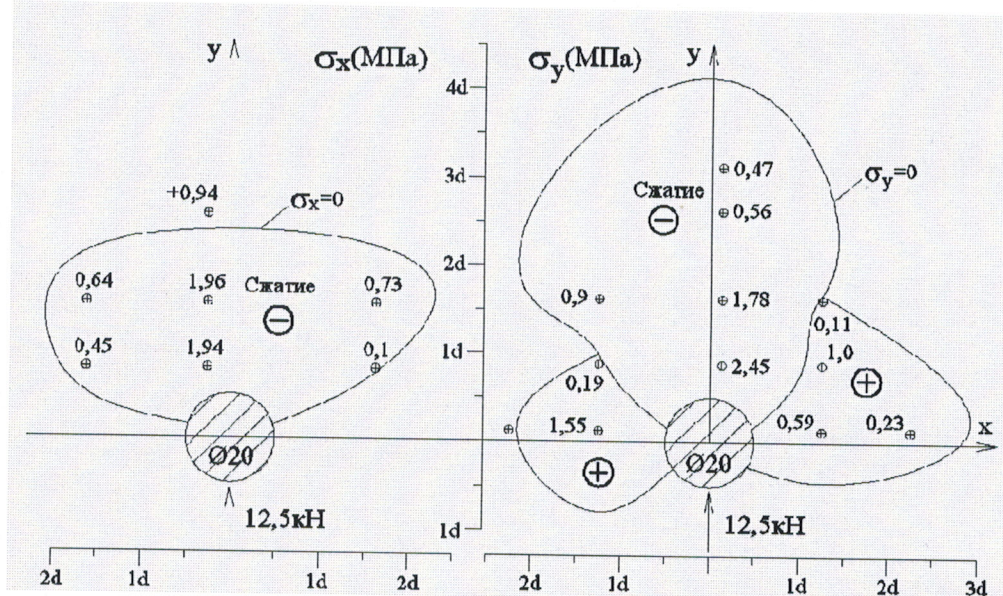


Рис.6. Эпюры распределения напряжений на торцевой поверхности

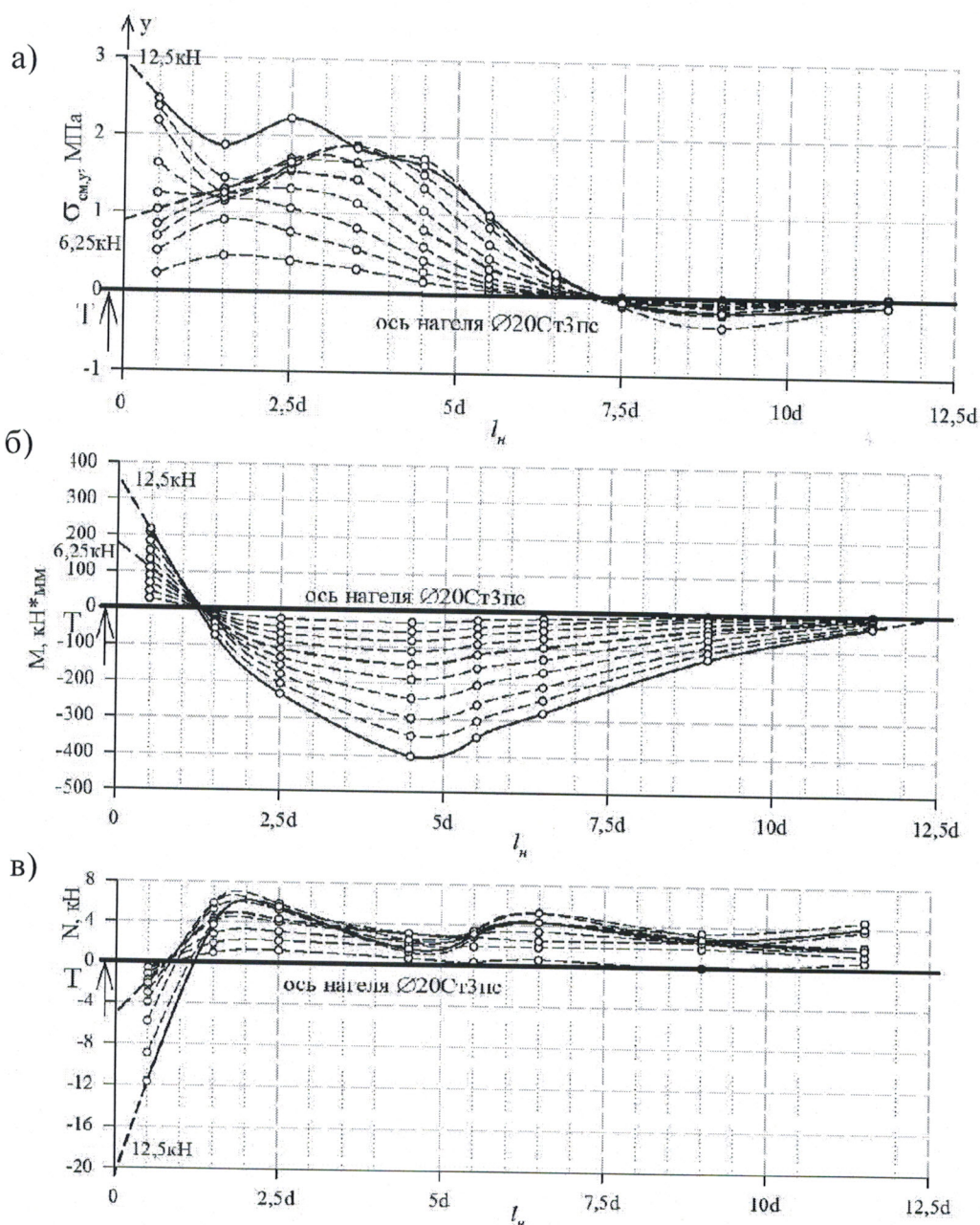


Рис.7. Эпюры усилий: а – распределение напряжений в древесине вдоль нагельного гнезда; б и в - распределение моментов и продольных сил по длине стального нагеля, соответственно

Установлено, что рабочие параметры нагеля, определенные в соответствии с расчетными зависимостями, предложенными в главе №2, достаточно точно отвечают действительным рабочим параметрам нагеля. При анализе эпюр изгибающих моментов было подтверждено наличие эффекта перераспределения моментов в нагеле при его жестком закреплении на одной из опор (в стальной накладке) и возможность использования для оценки этого эффекта повышающего коэффициента $k_M=1,2$ к изгибающему моменту.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить прочность и деформативность торцевых нагельных соединений, требуемые параметры расстановки нагелей, а также установить расчетную несущую способность таких соединений, в том числе из условия раскалывания. Полученные результаты подтвердили возможность использования предложенной в главе №2 методики расчета нагельных соединений.

Четвертая глава содержит экспериментальные исследования узловых торцевых нагельных соединений деревянных конструкций.

Для подтверждения эффективности использования нагельных соединений со стальными накладками совместно с применением нагелей, выполненных из марок сталей повышенной прочности, было разработано и испытано узловое торцевое нагельное соединение балочных элементов, объединение которых выполнено через стальную деталь (рис.8). Задачей исследований было - сравнить его действительную несущую способность и деформативность с результатами, полученными по методике расчета, предложенной в главе №2. Кроме того, ставилась задача определить характер разрушения и величину предельно допустимой нагрузки из условия раскалывания деревянного элемента поперек волокон, сравнить их с результатами расчета и подтвердить возможность применения поперечного армирования для усиления таких соединений.

Приведенное на рисунке 8 торцевое стыковое соединение двух деревянных балочных элементов 1 и 2 было выполнено с помощью Т-образной соединительной стальной детали 3 с центрирующими прокладками. При этом, для балочного элемента 2 эта деталь являлась накладкой на торцевой поверхности, через отверстие в которой устанавливались на сварке три нагеля 4 из стали марки Ст45 ($\sigma_u=640\text{МПа}$). Соединение элементов производилось с помощью шурупов, вкрученных в тело балок через отверстия в центрирующих прокладках. Сплачивание узлового соединения на практике может быть выполнено с помощью шурупов с резьбой по всей длине, установленных крест-накрест. При испытаниях было решено заменить шурупы, установленные крест-накрест, на стяжное устройство 5 в виде стальных уголков, через заранее просверленные отверстия в которых вкручивались шурупы в тело элементов 1 и 2. При этом, уголки крепились на поверхности элемента 2 на расстоянии 100мм от плоскости сдвига, что позволило свести к минимуму поддерживающий эффект за счет гибкости шурупов.

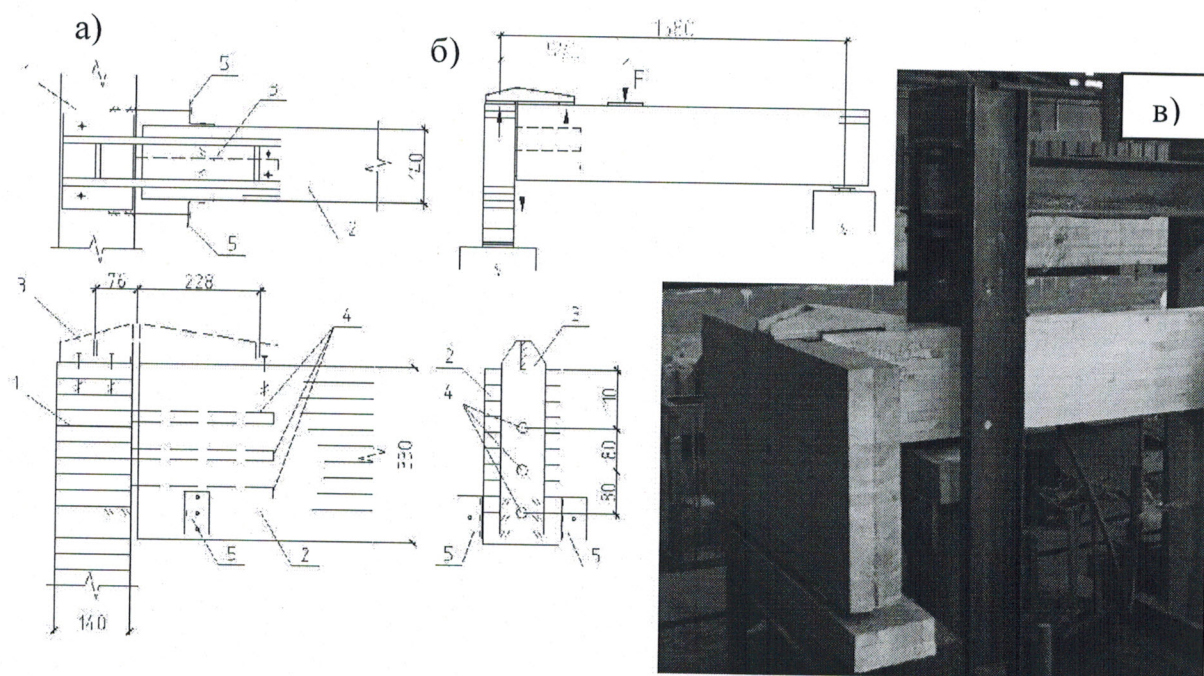


Рис.8.Испытания торцевого соединения со стальной накладкой:
а – конструкция соединения; б – схема нагружения; в – испытательный стенд

Таблица 1

Несущая способность и рабочие параметры соединений

Диаметр нагеля, мм	Ожидаемые (теоретические)							Действительные			
	$T_n^{I-II}, \text{кН}$	$T_n^{пред}, \text{кН}$	$l_{опт}, \text{мм}$	$\alpha^{упр}, \text{град}$	$\delta_{90/0}^{I-II}, \text{мм}$	$\alpha^{пред}, \text{град}$	$\delta_{90/0}^{пред}, \text{мм}$	$T_n^{I-II}, \text{кН}$	$T_n^{пред}, \text{кН}$ ($\delta^{пред}=8,8 \text{ мм}$)	$\alpha^{упр}, \text{град}$	$\delta^{I-II}, \text{мм}$
20	14,4	21,3	337	1,35	3,2	3,7	8,8	15,6	22,6	1,36	3,1

Для первых двух соединений, в которых выполнялось поперечное армирование шурупами с резьбой по всей длине, был зафиксирован пластический характер разрушения от смятия древесины нагельного гнезда и изгиба нагеля при постоянной нагрузке. Разрушение третьего, неармированного соединения, произошло от раскалывания торцевого деревянного элемента поперек волокон при нагрузке, величина которой была близкой к определенной по зависимостям, предложенным в главе №3.

Сравнение ожидаемых рабочих параметров узлового соединения с экспериментальными данными приведено в таблице 1. Из таблицы видно, что

результаты расчета по прочности и по деформациям оказались близкими к результатам испытаний.

Разработанное новое стыковое решение балочных конструкций с применением нагелей, работающих в торце, оказалось эффективным решением с точки зрения несущей способности, что подтверждается патентом на изобретение №2471930.

Далее в главе №4 приведены результаты испытаний торцевых стыковых соединений двух деревянных балочных элементов (рис.9).

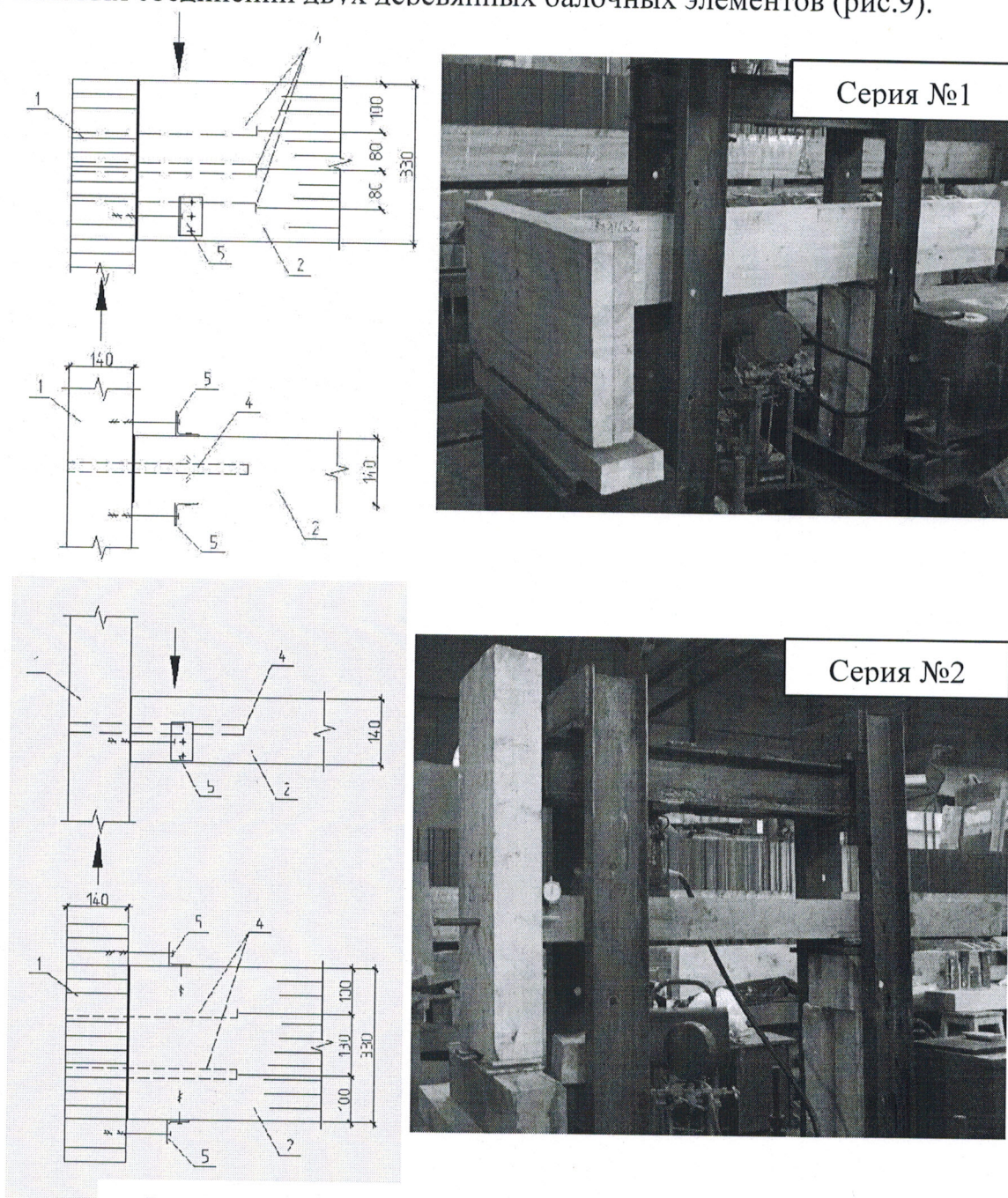


Рис.9. Конструкция и испытательный стенд узловых торцевых нагельных соединений деревянных элементов

Испытанные соединения отличались от соединений со стальной накладкой тем, что стыкование деревянных элементов 1 и 2 выполнялось с помощью нагелей 4 из стали марки Ст3пс ($\sigma_u=450\text{МПа}$), которые устанавливались через элемент 1 в торец элемента 2. При этом, были проведены две серии испытаний, по три узловых соединения в каждой, отличающихся направлением волокон древесины по отношению к направлению сдвига.

В первой серии расположение деревянных элементов было аналогично испытаниям со стальными накладками, а для соединения элементов использовались три нагеля. Нагели в элементе 1 работали под углом 90° к волокнам, а в элементе 2 в торце - перпендикулярно клеевым швам.

Для второй серии в соединении использовалось два нагеля, которые в элементе 1 работали под углом 0° к волокнам, а в элементе 2 в торце - параллельно клеевым швам. Сплачивание узлового соединения выполнялось с помощью стяжного устройства 5, используемого при ранее проведенных испытаниях.

Результаты испытаний и ожидаемые величины рабочих параметров соединений представлены в таблице №2. Из таблицы видно, что для второй серии испытаний действительная прочность соединений T^{I-II} и $T^{пред}$ оказалась выше ожидаемой примерно на 25%. Это объясняется тем, что прочностные характеристики древесины определялись для наиболее неблагоприятного случая работы древесины, когда смятие происходит перпендикулярно клеевым швам деревянного элемента. В этом случае, сжатие вначале происходит только за счет ранней, более рыхлой зоны годичных слоев.

Таблица 2

Несущая способность и рабочие параметры соединений

№ серии	Диаметр нагеля, мм	Ожидаемые (теоретические)								Действительные		
		T_n^{I-II} , кН	$T_n^{пред}$, кН	$\alpha^{упр}$, град	$\Sigma\delta^{I-II}$	$\alpha^{пред}$, град	$\delta_a^{пред}$, мм	$\delta_{90/0}^{пред}$, мм	$\Sigma\delta^{пред}$	T_n^{I-II} , кН	$T_n^{пред}$, кН	δ^{I-II} , мм
1	20	9,6	13,8	0,95	2,4	4,4	4,5	6,7	11,2	9,1	14,6	3,0
2		10,4	14,8		2,4		3,7	7,2	10,9	12,8	18,8	2,4

Средняя величина деформаций при испытаниях второй серии соединений совпала с ожидаемым значением.

Результаты экспериментальных исследований узловых торцевых соединений подтвердили возможность применения предложенного метода расчета нагельных соединений, основанного на действительных физико-механических характеристиках древесины и материала нагеля. Сходимостью результатов расчета и испытаний подтверждены предложенные зависимости для проверки торцевых нагельных соединений из условия раскалывания. вариант поперечного армирования для обеспечения прочности торцевых соединений из условия раскалывания и возможность применения.

В пятой главе определена область применения торцевых нагельных соединений в строительных конструкциях, приведены схемы узловых торцевых нагельных соединений, даны рекомендации по их расчету, и обеспечению эксплуатационной безопасности.

В большепролетных конструкциях торцевые нагельные соединения предложено применять для опорных узлов крепления деревянных арок и рам к железобетонному основанию, где нагельное соединение может работать на усилие распора. В коньковых узлах конструкций торцевые нагельные соединения могут воспринимать перерезывающую сила. В опорных узлах фахверковых стоек под действием ветровой нагрузки возникает усилие сдвига, в этом случае, для присоединения стальной опорной детали к торцу деревянного элемента могут быть использованы нагели, установленные в детали на сварке.

В малоэтажном домостроении торцевые соединения предложено применять для узлов крепления стропильных кровельных элементов здания. Это могут быть узлы стыкования элементов ендов, крепление подстропильных балок к стропилам или применяться при устройстве технологических отверстий в кровле для прохождения вентиляционных каналов или дымоходов. Торцевые соединения могут применяться в конструкции междуэтажного и чердачного перекрытия для стыкования балок в одном уровне.

При строительстве зданий из панелей с перекрёстными слоями типа CLT или X-lam торцевые нагельные соединения могут быть использованы для их крепления между собой, при этом нагели будут работать в узких сторонах панелей, куда выходит торцевая поверхность досок.

В рекомендациях по расчету торцевых нагельных соединений предложены зависимости для определения прочности и деформативности, а также для определения их расчетной несущей способности.

В разделе рекомендаций по обеспечению эксплуатационной безопасности даны предложения по химической и конструкционной защите торцевых нагельных соединений. Для конструкционной защиты предложено применять поперечное армирование, назначение которого - воспринимать растягивающие напряжения поперек волокон, возникающие в нагельном соединении, и препятствовать развитию усушечных трещин.

Для поперечного армирования могут быть использованы клеенные стержни и шурупы с резьбой по всей длине. Применение клеенных стержней для повышения эксплуатационной безопасности большепролетных клееных деревянных конструкций подтверждено многолетним опытом строительства объектов с применением "системы ЦНИИСК". Армирование шурупами может выполняться при сборке узловых соединений в условиях стройплощадки и применяться в малоэтажном домостроении.

По результатам исследований сформулированы **основные выводы** диссертационной работы, приведенные в заключении:

1. Разработана и экспериментально проверена методика расчета несущей способности торцевых нагельных соединений по прочности и деформациям, основанная на определении физико-механических свойствах материалов.
2. Определены зависимости для расчета механических характеристик древесины нагельного основания, в том числе при работе нагеля в торце, от диаметра нагеля и плотности древесины.
3. Установлены новые экспериментальные зависимости для расчета механических характеристик нагеля при изгибе от его диаметра и временного сопротивления стали на растяжение.
4. Определен требуемый допуск отверстия в стальной пластине под нагель для повышения несущей способности нагельных соединений со стальными накладками на 40%.
5. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден коэффициент перераспределения моментов $k_M=1,2$, учитывающий крепление нагеля на сварке в стальной пластине.
6. Установлен коэффициент длительной прочности торцевых нагельных соединений $k_{дл}=0,38$ и коэффициент надежности по нагрузке $K' = \frac{T^{I-II}}{T_{расч}} = 1,95$.
7. Установлены экспериментально и аналитически подтверждены требуемые параметры расстановки нагелей в торце деревянного элемента.
8. Предложена и экспериментально проверена методика расчета торцевых нагельных соединений на раскалывание.

9. Разработаны и экспериментально проверены торцевые узловые нагельные соединения для деревянных конструкций, в том числе и с применением нагелей из высокопрочной стали. Результаты их расчета по предложенной методике оказались близкими к действительной прочности и деформативности соединений.

10. Предложены рекомендации по применению и расчету торцевых нагельных соединений, разработаны варианты их усиления из условия раскалывания для обеспечения эксплуатационной безопасности.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Изданиях, рекомендованных ВАК

1. Смирнов П.Н. Сравнение методик расчета нагельных соединений деревянных конструкций. Отечественный и зарубежный опыт // Строительная механика и расчет сооружений. - 2013. - №6. - С. 68 - 72.

2. Смирнов П.Н., Шенгелия А.К. Особенности работы нагельных соединений со стальными накладками и прокладками. Методика расчета // Строительная механика и расчет сооружений. - 2015. - №2. - С. 19-25.

Прочих изданиях

1. Смирнов П.Н. Работа нагеля, установленного вдоль волокон древесины и нагруженного поперечной силой // Строительный эксперт. - 2004. - №16. - С. 12.

2. Шенгелия А.К., Смирнов П.Н., Турковский С.Б., Погорельцев А.А. Испытание нагельных соединений, предназначенных для большепролетных деревянных конструкций - В сб. материалов семинара МГСУ: Комплексный подход к проектированию зданий и сооружений, - М., 2005. - С. 98-103.

3. Шенгелия А.К., Смирнов П.Н., Погорельцев А.А. Исследование нагельных соединений деревянных конструкций с расположением нагелей вдоль волокон. - В сб. материалов семинара МГСУ: Малоэтажное строительство для Подмосковья, - 2006. - М., С. 57-67.

4. Смирнов П.Н., Шенгелия А.К., Погорельцев А.А. Экспериментальные исследования нагеля, установленного в торец деревянного элемента, работающего на поперечную силу. - В сб. научных трудов: Современные строительные конструкции из металла и древесины. - Одесса, 2006. - С. 187-194.

5. Смирнов П.Н., Погорельцев А.А. Исследование длительной прочности соединений на нагелях, установленных вдоль волокон древесины.

- В сб. научных трудов: Современные строительные конструкции из металла и древесины. - Одесса, 2007. - С. 214-218.

6. Смирнов П.Н., Погорельцев А.А., Шенгелия А.К. Исследование механических свойств основания нагеля, установленного в торец деревянного элемента в соединении со стальными пластинами. - В сб. научных трудов: Современные строительные конструкции из металла и древесины. - Одесса, 2010. - С. 144-149.

7. Смирнов П.Н. Работа нагельных соединений, установленных в торец деревянного элемента. - В сб. научных трудов МГСУ: Промышленное и гражданское строительство в современных условиях, - М., 2011. - С. 90-94.

8. Смирнов П.Н. Работа торцевых нагельных соединений в деревянных конструкциях. - В сб. научных трудов: Современные строительные конструкции из металла и древесины. - Одесса, 2011. - С. 220-227.

9. Смирнов П.Н., Погорельцев А.А., Шенгелия А.К. Исследование несущей способности нагельных соединений на основании стандартных характеристик материалов. - В сб. научных трудов: Современные строительные конструкции из металла и древесины. - Одесса, 2013. - С. 247-253.

10. Патент РФ на изобретение №2471930 МПК E04B 1/58. Торцевое нагельное соединение деревянных балочных конструкций / П.Н.Смирнов, С.Б.Турковский, А.А.Погорельцев. - Опубл. 10.01.2013. Бюл. №1.