

*На правах рукописи*



**ЧЕРЕДНИЧЕНКО Валерий Вадимович**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ МНОГОЭТАЖНЫХ  
КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ ИЗ КЛЕЕННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛЬНЫХ  
ДЕМПФИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ**

Специальность: 2.1.1 – Строительные конструкции,  
здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова».

- Научный руководитель: **Лабудин Борис Васильевич**  
доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент РААСН
- Официальные оппоненты: **Травуш Владимир Ильич**,  
доктор технических наук, профессор,  
академик РААСН, ЗАО «ГОРПРОЕКТ»,  
заместитель генерального директора  
по научной работе
- Уздин Александр Моисеевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Петербургский  
государственный университет путей  
сообщения им. Александра I», кафедра  
«Механика и прочность материалов  
и конструкций»
- Ведущая организация: **ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко**,  
**АО «Научно-исследовательский центр  
«Строительство»**

Защита состоится «03» июня 2026 года в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационного совета (ауд. №220).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» или на сайте:

<https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/cherednichenko-valeriy-vadimovich>

Автореферат разослан «30» марта 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Попов Владимир Мирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время объёмы использования древесины в качестве строительного материала при возведении зданий и сооружений вновь увеличиваются. Появились новые конструктивные типы деревянных зданий: каркасные, панельные, каркасно-панельные, модульные, позволяющие снизить затраты на использование древесины при строительстве без ущерба для надежности строительных конструкций. Учитывая, что около 20 % территории РФ относится к сейсмоопасным, деревянные конструкции вследствие относительной легкости конструкции, демпфирующему влиянию упруго-деформирующихся узлов, развитию пластических деформаций в узлах являются эффективным решением для строительства в районах с высокой сейсмической активностью. Первостепенными задачами являются разработка, исследование и совершенствование конструктивных решений многоэтажных зданий из клееных деревянных конструкций (КДК) при действии статических и динамических нагрузок с учетом меняющихся статико-геометрических параметров узлов соединений, а также узловых соединений элементов каркаса при сейсмических воздействиях. Всё это делает работу актуальной и своевременной.

**Степень разработанности темы исследования.** В Российской Федерации и бывшем СССР проблемам конструирования, расчета, повышения сейсмостойкости зданий и сооружений посвящены работы: Айзенберга Я.М., Бирбраера А.Н., Гольденבלата И.В., Завриева К.С., Корчинского И.В., Масленникова А.М., Травуша В.И. и др., а также зарубежных: Blum J., Borges J., Newmark N. и др.

Большой вклад в развитие деревянных конструкций внесли: Знаменский Е.М., Иванов Ю.М., Иванов А.М., Каган М.Е., Карлсен Г.Г., Ковальчук Л.М., Серов Е.Н., Bradley D., Natterer J., Stamm В. и др. Развитию и совершенствованию нагельных соединений посвящены работы: Дмитриева П.А., Никитина Г.Г., Коченова В.М., Слицкоухова Ю.В. и др. Значительный практический и теоретический вклад в исследование древесины перекрестно-клееной (ДПК) внесли работы: Найчука А.Я., Погорельцева А.А., Смирнова П.Н., Турковского С.Б., Филимонова М.А., Aicher S., Cecotti A., и др. Однако вопросы сейсмостойкости многоэтажных зданий из клееной древесины до сих пор остаются малоизученными, а нерешённые вопросы требуют теоретических и экспериментальных исследований.

**Цель работы:** Совершенствование узлового соединения, позволяющего повысить сейсмостойкость многоэтажных каркасных зданий из клееных деревянных конструкций путем изменения жесткости узла в зависимости от сейсмического воздействия.

**Задачи исследования:**

- анализ состояния вопроса и выявление наиболее рационального конструктивного решения многоэтажного здания из клееных деревянных элементов;
- расчетно-теоретическое обоснование выбора каркасной конструктивной схемы многоэтажного здания из КДК в виде пространственно-регулярной системы с учетом жесткости связей узловых соединений и анизотропных свойств материала;
- совершенствование и разработка узлового соединения плит из ДПК и клееных деревянных балок перекрытия, позволяющего повысить сейсмостойкость многоэтажных каркасных зданий за счет изменения жесткости узла и диссипации энергии землетрясения;
- определение влияния диаметра и модуля упругости материала вкладыша на напряженно-деформированное состояние узла сопряжения плит из ДПК с балкой перекрытия методом конечных элементов;
- выполнить экспериментальные исследования для определения деформативности, несущей способности и коэффициента поглощения разработанного узла на действие статических и динамических нагрузок;
- оценить влияние узлового демпфирующего соединения на НДС элементов каркаса многоэтажного зданий при сейсмических воздействиях различного частотного состава и интенсивности методом конечных элементов;
- сформулировать рекомендации по проектированию сейсмостойких многоэтажных зданий из клееных деревянных конструкций с предлагаемыми узлами.

**Научная гипотеза** заключается в предположении, что включение упруго-деформируемого вкладыша в конструкцию узлового соединения балок и плит перекрытий из ДПК снижает пластические деформации в древесине, обеспечивает демпфирование горизонтальных динамических нагрузок в узлах, повышает их ремонтпригодность и эксплуатационную надежность конструкций многоэтажных зданий.

**Объект исследования:** клееные деревянные конструкции многоэтажного каркасного здания с демпфирующими элементами в соединениях плит из ДПК с балками перекрытия.

**Предмет исследования:** влияние жесткостных параметров узла соединения балок и плит перекрытия из ДПК на сейсмостойкость многоэтажного каркасного здания из клееных деревянных конструкций с оценкой напряженно-деформированного состояния узловых соединений.

**Научная новизна результатов исследований:**

- предложена конструктивная схема многоэтажного здания из клееных деревянных элементов в виде пространственно-регулярной системы с узлами варьируемой жесткости и диссипацией энергии землетрясения;
- обосновано включение упруго-деформируемого вкладыша в конструкцию узла сопряжения плит с балками перекрытия, позволяющее снизить пластические деформации в древесине, обеспечить демпфирование горизонтальных динамических нагрузок в узлах, повысить эксплуатационную надежность конструкций многоэтажных зданий;
- установлены границы рационального использования предложенного соединения путем варьирования диаметров и модуля упругости материала вкладыша и их влияние на напряженно-деформированное состояние узла;
- подтверждено, что применение демпфирующих элементов в соединении балок и плит перекрытий из ДПК в конструкции многоэтажного каркасного здания из деревянных клееных конструкций позволяет повысить его сейсмостойкость при действии высокочастотных и среднечастотных землетрясений.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы заключается в научно-обоснованном применении клееных деревянных конструкций в многоэтажных зданиях для строительства в сейсмоопасных районах. Доказано, что НДС конструктивных элементов здания и его сейсмостойкость зависит от типа применяемых нагельных связей, характеристик демпфирующих свойств нового соединения между несущими конструкциями каркаса здания и перекрытиями при действии землетрясений различного частотного состава.

**Практическая ценность работы.**

- разработано усовершенствованное соединение плит из ДПК с клееными деревянными балками перекрытия с изменяемой жесткостью и диссипацией энергии землетрясения в узлах, позволяющее повысить несущую способность элементов каркаса, получены коэффициенты жесткости и поглощения экспериментальных узлов;
- сформулированы рекомендации по практическому применению разработанного узла при проектировании сейсмостойких многоэтажных зданий из клееных деревянных конструкций, что повышает достоверность статических и динамических расчетов, снижению отклика здания на сейсмическое воздействие и как следствие изменению НДС в конструктивных элементах и узлах.

**Методология и методы исследований.** При проведении исследований поставленные задачи реализованы путем численного моделирования

с использованием методов математического анализа, строительной механики, теории упругости и пластичности анизотропных тел. Экспериментальные исследования выполнены с применением методов планирования эксперимента, математической обработки результатов, численного и натурального эксперимента. Проведена верификация полученных результатов экспериментальных исследований с использованием пространственной расчетной динамической модели во временной области с применением инструментальных акселерограмм.

**Положения, выносимые на защиту:**

- конструктивная схема многоэтажного здания из клееных деревянных элементов в виде пространственно-регулярной системы, позволяющая учитывать жесткость узлов в зависимости от сейсмического воздействия и диссипацию энергию землетрясения в узлах;
- разработанное соединение плит из ДПК с клееными деревянными балками перекрытий каркасных зданий, заключающееся в наличии упругодеформируемого вкладыша с изменяемой жесткостью материала;
- результаты численных и экспериментальных исследований предложенного соединения, позволяющего снизить пластические деформации в древесине, обеспечить демпфирование горизонтальных динамических нагрузок в узлах;
- результаты применения сейсмостойкого узла соединения балок и плит перекрытия из ДПК в конструкции многоэтажного каркасного здания из клееных деревянных конструкций для повышения его сейсмостойкости при действии высокочастотных и среднечастотных землетрясений;
- рекомендации по проектированию сейсмостойких многоэтажных зданий из клееных деревянных конструкций с разработанными узлами.

**Область исследования:** соответствует паспорту научной специальности ВАК 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения и относится к п. 8 «Разработка новых и совершенствование рациональных типов несущих и ограждающих конструкций, конструктивных решений зданий и сооружений с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий, механической, пожарной и экологической безопасности».

**Достоверность результатов исследований** обеспечивается корректными допущениями при замене реальных процессов математическими моделями, приемлемым совпадением результатов теоретических и экспериментальных исследований, подтверждается решением задач в соответствии с классическими гипотезами и допущениями строительной механики и теории упругости анизотропных тел, использованием лицензионных расчетных программных комплексов и современного аттестованного измерительно-вычислительного оборудования.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения и результаты диссертационного исследования представлены на следующих конференциях:

- XIV Международный конгресс по деревянному строительству, Санкт-Петербург, 2023 г.;
- LXXVII Международная научно-практическая конференция Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика, Санкт-Петербург, 2023 г.;
- Актуальные вопросы архитектуры и строительства. XVII международная научно-техническая конференция, г. Новосибирск, 2024 г.;
- International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering” (MPCPE-2025), г. Владимир, 2025 г.;
- Международная научно-практическая конференция «Сталь. Дерево. Сейсмика», г. Москва, 2025 г.;

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 9 печатных работах, в том числе 6 статей в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК, 3 публикации в журналах, включенных в базу данных РИНЦ. В рамках исследования получены патентные свидетельства на 1 изобретение и 5 полезных моделей.

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы приняты к использованию ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко при подготовке новой редакции СП 544.1325800.2025, что подтверждается справкой о внедрении № 9–1728 от 27.10.2025г. Используются в учебном процессе в Высшей инженерной школе САФУ им. М.В. Ломоносова.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, библиографического списка, изложена на 245 страницах, содержит 185 рисунков, 21 таблицу, 4 приложения, 262 библиографического источника.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**1. Конструктивная схема многоэтажного здания из клееных деревянных элементов в виде пространственно-регулярной системы, позволяющая учитывать жесткость узлов в зависимости от сейсмического воздействия и диссипацию энергии землетрясения в узлах**

Нагельные соединения элементов КДК обладают существенной деформативностью, не могут приниматься в расчетах абсолютно «жесткими» и требуют корректного подхода к выбору расчетных схем. Это потребовало разработать конструктивную схему многоэтажного здания, позволяющую учитывать податливость связей. Конструктивные решения здания

«Mjøstårnet» в нашей работе приняты за основу исследования. Анализ и выбор конструктивного решения многоэтажного здания выполнены применительно к эксплуатации здания в сейсмоопасных районах. По результатам численных расчетов, анализа 10 вариантов схем, разработана конструктивная схема многоэтажного здания из клееных деревянных элементов высотой  $H=75$  м, размерами в плане –  $36 \times 36$  в виде пространственно-регулярной системы. Достигнуты наименьшие горизонтальные и вертикальные перемещения, ускорения при действии постоянных и кратковременных нагрузок. Разработанная конструктивная схема (рис. 1), позволяет учитывать анизотропные свойства материала, жесткость узлов в зависимости от сейсмического воздействия и диссипацию энергии землетрясения в узлах.

На основе разработанной конструктивной схемы многоэтажного здания из КДК проведены численные исследования с различными вариантами связей конечной жесткости между плитами и балками перекрытия. Результаты максимальных перемещений элементов здания приведены на рисунке 2. Установлено, что максимальные перемещения элементов здания с упруго-податливыми и шарнирными связями между плитой и балкой перекрытия по сравнению с «жестким» соединением при действии сейсмического воздействия интенсивностью 8 баллов увеличились на 40 % для шарнирного опирания, на 28 %, 22 %, 23 % – для самонарезающих винтов, наклонно-ввинченных винтов и нагельного соединения с когтевым коннектором соответственно.

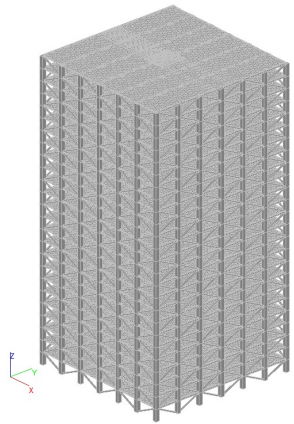


Рисунок 1 – Расчетная пространственно-регулярная конструктивная схема

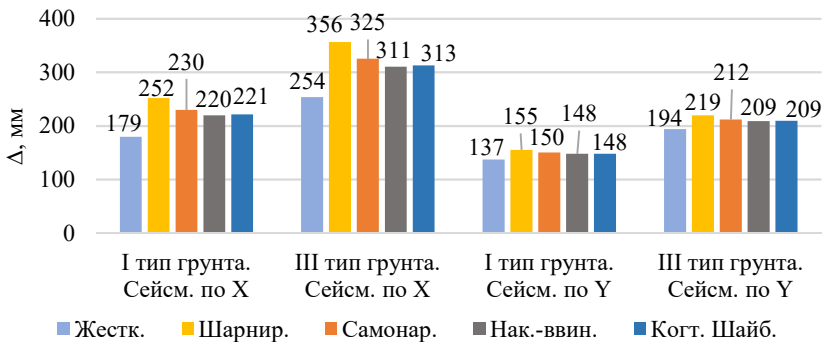


Рисунок 2 – Гистограммы максимальных перемещений здания при действии сейсмического воздействия по направлению оси X и Y

По результатам численных исследований установлено, что неучёт диссипативных свойств узловых соединений вследствие податливости связей значительно влияет на перераспределение внутренних усилий и, следовательно, на напряжённо-деформированное состояние в элементах конструкции здания.

## 2. Разработанное соединение плит из ДПК с клееными деревянными балками перекрытий каркасных зданий, заключающееся в наличии упруго-деформируемого вкладыша с изменяемой жесткостью материала

На основе выполненного патентного поиска разработано конструктивное решение узла сопряжения плиты из ДПК с балкой с использованием упруго-деформируемых вкладышей для применения в сейсмостойком строительстве каркасных многоэтажных и высотных зданий из КДК. Конструкция узла (рис.3) состоит из клееной деревянной балки (1), ДПК (2), упруго-деформируемого вкладыша (3), стального нагеля (4) и удерживающей шайбы (5), предусмотренной для ограничения перемещения вкладыша по вертикали. Вкладыш состоит из внутренней втулки (6), обоймы (7), упруго-деформируемого материала (8). Шаг  $L$  и диаметр вкладыша  $D$  назначаются исходя из диаметра нагеля, пролета плиты, значений расчетных статических и динамических нагрузок. Вкладыш (3) может монтироваться в конструкцию на строительной площадке или изготавливаться непосредственно в плите ДПК, тогда обойма (7) не требуется.

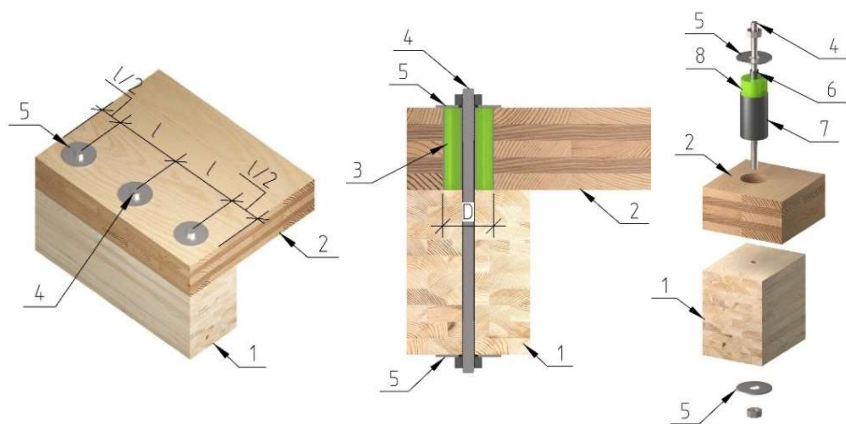


Рисунок 3 – Сейсмостойкий узел сопряжения плиты из ДПК с клееной деревянной балкой перекрытия: 1 – клееная деревянная балка, 2 – ДПК, 3 – вкладыш, 4 – стальной нагель, 5 – стальная шайба, 6 – стальная втулка, 7 – стальная обойма, 8 – упруго-деформируемый материал

Узловое соединение позволяет снизить пластические деформации в древесине, локализовать развитие упругих деформаций в узловом соединении, повысить эксплуатационную надежность здания при сейсмических воздействиях. Применение разработанного узла в конструкции многоэтажного здания позволяет использовать перекрытия как демпферы настроенной массы, что приводит к изменению напряженно-деформированного состояния в конструктивных элементах и узлах. Конструктивное решение узла имеет дополнительные резервы в выборе конструктивной системы здания под конкретные условия строительства с преобладающим сейсмическим воздействием. Варьирование податливости соединения может быть реализовано путем изменения модуля упругости вкладышей по высоте здания.

### 3. Результаты численных и экспериментальных исследований предложенного соединения, позволяющего снизить пластические деформации в древесине, обеспечить демпфирование горизонтальных динамических нагрузок в узлах

Для подтверждения гипотез о снижении пластических деформаций в древесине на участках смятия под нагелем разработана конечно-элементная модель нагельного соединения в программно-вычислительном комплексе Ansys Workbench. Диаметр вкладыша варьировался от 30 мм до 160 мм, модуль упругости – от 1 МПа до 100 МПа. Статическая нагрузка на узел – 11,1 кН. Значения максимальных напряжений в древесине на участке смятия под нагелем представлены в таблице 1. Ячейкам таблиц присвоен цвет в зависимости от величины результата: максимальные значения напряжений в плите под нагелем не превышают сопротивление смятию древесины поперек волокон – зеленый, превышение на 20 % – желтый, более 20 % – красный.

Таблица 1 – Максимальные напряжения в древесине плиты ДПК при различных параметрах вкладыша

Диаметр вкладыша, мм	Модуль упругости вкладыша, МПа								
	1	2	3	4	5	10	20	50	100
	Напряжения в нижнем слое ДПК-плиты, МПа								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30	8,07	8,08	8,62	9,48	10,21	<b>12,18</b>	14,01	15,62	16,76
40	7,54	7,83	8,54	9,30	9,65	<b>9,93</b>	10,35	9,23	9,56
50	6,45	5,80	6,44	7,52	6,64	<b>7,67</b>	8,44	6,88	6,85
<b>60</b>	<b>3,57</b>	<b>4,58</b>	<b>4,89</b>	<b>5,18</b>	<b>5,27</b>	<b>5,44</b>	5,64	5,83	5,91
70	3,08	4,19	4,61	4,76	4,99	5,08	5,37	5,51	5,65
80	2,89	4,01	4,25	4,32	4,39	4,46	4,67	4,71	4,80
90	2,10	2,97	4,21	3,91	3,40	3,60	3,95	3,34	3,26
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
160	1,01	1,53	1,55	1,60	1,65	1,63	1,75	1,68	1,45

Предварительные численные исследования нагельного соединения без вкладыша показали, что максимальные напряжения в ДПК на участке смятия под нагелем – 23,89 МПа; максимальные перемещения ДПК относительно ригеля – 4,11 мм. Полученные результаты объясняются использованием в конструкции узла цельнорезьбовой шпильки, что привело к некоторой концентрации напряжений на витках резьбы.

Снижение пластических деформаций в древесине наблюдается с диаметра вкладыша 60 мм и модуля упругости 1 МПа. Применение вкладыша диаметром более 90 мм нецелесообразно: напряжения в древесине снижаются незначительно, однако наблюдается рост максимальных перемещений плиты из ДПК относительно ригеля.

Включение вкладыша между плитой из ДПК и нагелем снизило пластические деформации в древесине, это подтверждается мозаиками максимальных нормальных напряжений в исследуемом соединении (рис. 4). Для вкладыша  $D = 60$  мм и  $E = 10$  МПа максимальные напряжения в плите ДПК меньше на 77 %, а перемещения увеличились более чем в два раза по сравнению с нагельными.

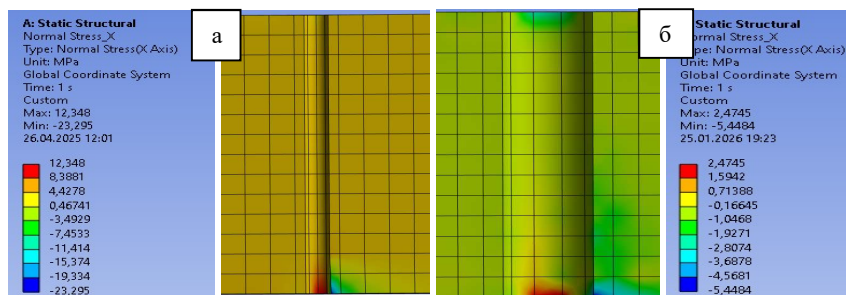


Рисунок 4 – Мозаики максимальных нормальных напряжений в плите ДПК: а – без вкладыша; б – при диаметре 60 мм и модуле упругости вкладыша 10 МПа.

Предварительные численные исследования в программном комплексе Ansys Workbench показали значительное снижение пластических деформаций в древесине при использовании вкладыша. Это послужило основанием для выполнения статических испытаний разработанного узла с различным приложением вектора сил по отношению к направлению волокон древесины со стальным нагелем и вкладышем (рис. 5). Испытания проведены на 6 образцах с полиуретановым (далее – ПУ) вкладышем и без него. При проведении испытаний регистрировались краевые деформации волокон сжатой и растянутой зон в древесине у контакта с нагелем. Затем вычислялись напряжения в древесине по краевым деформациям тензорезисторов.



Рисунок 5 – Экспериментальное соединение:  
а – сборка образцов, б – испытания в прессе П125

По результатам экспериментальных исследований построены зависимости  $\Delta(N)$ ,  $\sigma(N)$ , представленные на графиках 1–2 для образцов № 1–4 (рис. 6, 7). Разрушающая нагрузка для образцов с вкладышем на 12% выше, чем без них. Это обусловлено более равномерным изгибом нагеля и снижением эффекта концентратора нагрузок. Разрушение всех образцов произошло по среднему элементу из клееного бруса.

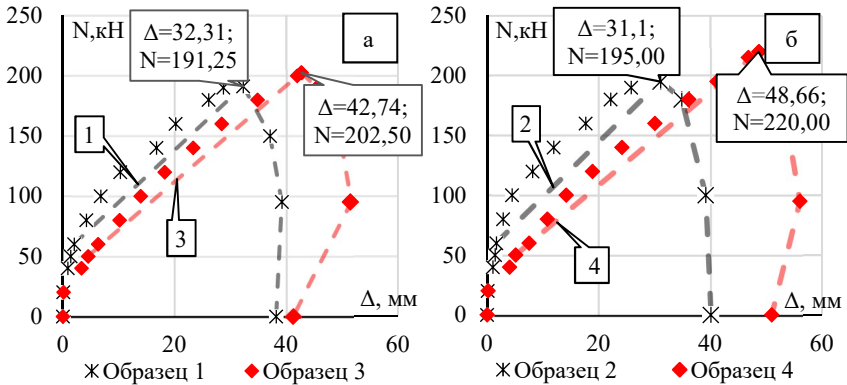


Рисунок 6 – Графики 1, 2 зависимости максимальных деформаций от нагрузки при испытании образцов **поперек** (а) и **вдоль** (б) волокон:  
1, 2 – без вкладыша; 3, 4 – с вкладышем

На графиках 3, 4 (рис. 7) цветом выделено значение напряжений в древесине под нагелем и значение внешней нагрузки, после которой начали развиваться остаточные деформации в древесине. Из представленных графиков следует, что нагрузка, после которой развиваются пластические деформации в древесине, почти в 2 раза больше с вкладышем, чем без него.

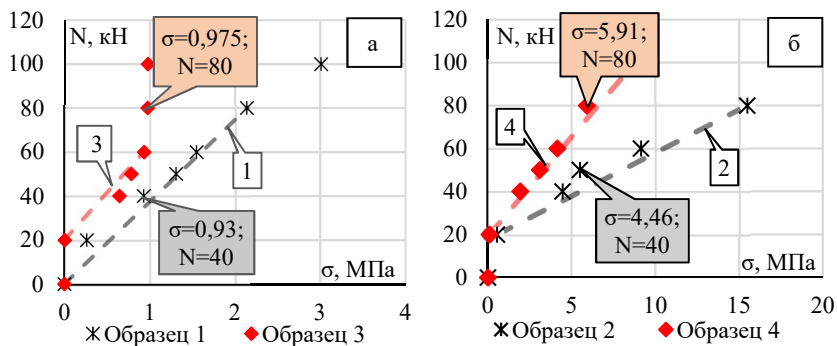


Рисунок 7 – Графики 3, 4 зависимости нормальных напряжений под нагелем и вкладышем на участке смятия от нагрузки при испытании образцов **поперек** (а) и **вдоль** (б) волокон: 1, 2 – без вкладыша, 3, 4 – с вкладышем

Как видно из характера разрушения образцов соединений (рис. 8), включение вкладыша в конструкцию узла значительно снизило повреждение в древесине, что позволяет повысить работоспособность и ремонтпригодность соединений.

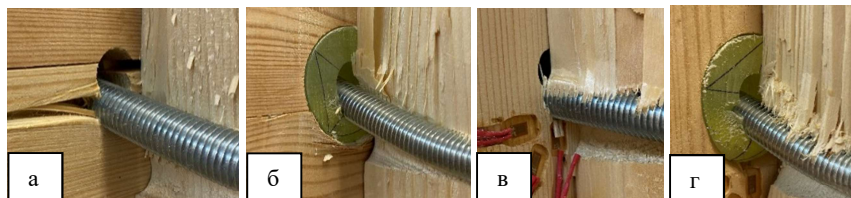


Рисунок 8 – Характер разрушения образцов ДПК: при статическом испытании **поперек волокон**: а – образец №1 (без вкладыша), б – образец №3 (с вкладышем); **вдоль волокон**: в – образец №2 (без вкладыша), г – образец №4 (с вкладышем)

Следующий этап исследования – испытания нагельных соединений на динамические нагрузки. Для проведения испытаний изготовлены 4 образца экспериментальных соединений: 2 без вкладыша, 2 с ПУ-вкладышем. Схема загрузки принята циклическая (частота  $\nu = 3,33$  Гц, 200 циклов), осевая (вдоль и поперек волокон). Степень нагружения – 0,2 разрушающего усилия. Для закрепления образцов была изготовлена оснастка. На рисунке 9 представлен общий вид экспериментальных узлов и образец со смонтированной оснасткой.

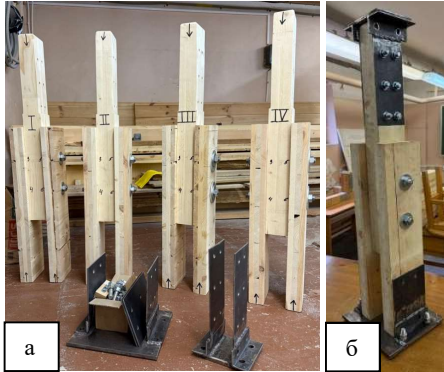


Рисунок 9 – Нагельные соединения клееных деревянных конструкций:  
а – экспериментальные образцы №1, 2, 3, 4;  
б – образец со смонтированной оснасткой

В ходе выполнения эксперимента получены зависимости  $\Delta(N)$ , по результатам которых построены диаграммы деформирования нагельного соединения для каждой ступени нагружения. На рисунке 10, (а) представлены усредненные значения кривых гистерезиса для образцов № 1,3, на рисунке 10, (б) – для образцов № 2,4.

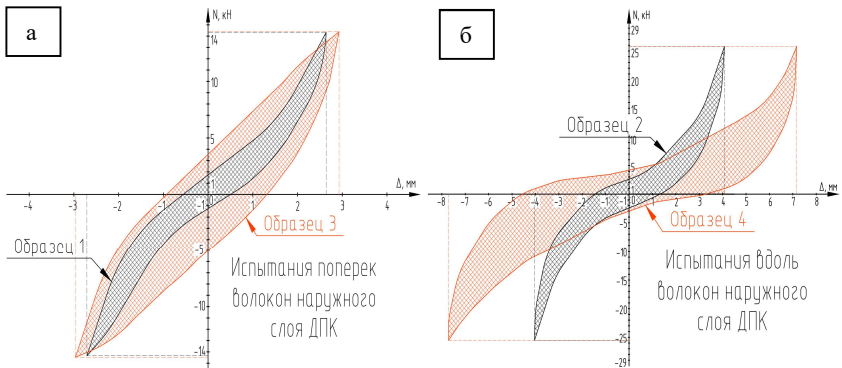


Рисунок 10 – Диаграммы деформирования образцов: а – №1,3 при циклической нагрузке 14,4 кН; б – №2,4 при циклической нагрузке 25,6 кН.  
Образец 1,2 – без вкладыша, 3,4 – с вкладышем

В результате испытаний установлено, что разрушение образцов №2,3,4 произошло по среднему элементу (клееный брус) (рис. 11, а). Образец №1 разрушился по нагелю (рис. 11, б). Значения разрушающих нагрузок образцов: №1 - 87,5 кН, №2 – 89,2 кН; №3 – 52,4 кН; №4 – 72,08 кН. Несмотря на разрушение образца №3 по среднему элементу на нагеле наблюдаются следы «излома» (рис. 11 в, г).

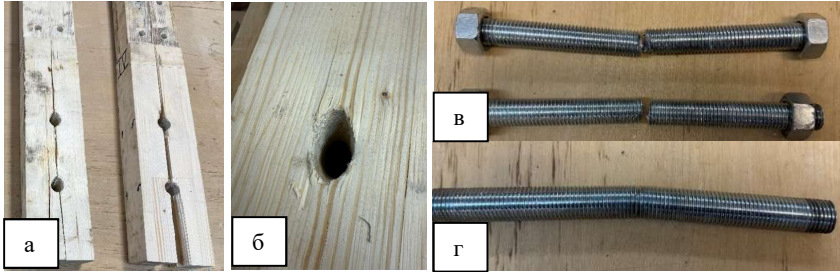


Рисунок 11 – Характер повреждения образцов №№1–4: а – разрушение образцов № 3,4 по среднему элементу; б – значительное обмятие нагельного гнезда среднего элемента образца №1; в, г – разрушение нагелей образца №1, 3

В процессе исследования и после анализа полученных результатов установлено следующее:

- для всех ступеней нагружения, при которых контролировалось обмятие нагельных гнезд, не обнаружено повреждение древесины ДПК, в которых установлен полиуретановый вкладыш;
- наблюдаются пластические деформации в нагельных гнездах полиуретановых вкладышей (рис. 12, а);
- при разрушении образца №3 наблюдались пластические деформации в древесине около вкладышей (рис. 12, б);



Рисунок 12 – Характер повреждения образцов из ДПК:  
 а – остаточные деформации в полиуретановом вкладыше образца №4,  
 б – пластические деформации в древесине под полиуретановым вкладышем при разрушении образца №3

– наибольший вклад в пластические деформации древесины в нагельном гнезде вносит первоначальный цикл сжатия/растяжения. При дальнейшем динамическом нагружении происходит рост деформаций;

– вкладыши из полиуретана увеличили диапазон упругой работы экспериментального соединения. При испытаниях поперек волокон наружных ламелей ДПК для образца без вкладышей начало пластических деформаций наблюдается с нагрузки 14,4 кН, при использовании вкладыша – с нагрузки 21,6 кН. При испытаниях вдоль волокон начало пластических деформаций в образцах без вкладышей с нагрузки – 12,8 кН, при использовании вкладыша – с нагрузки 25,6 кН. В значительной мере на характер упругой работы соединения влияет обжатие среднего элемента из клееного бруса, в который вкладыш не помещался;

– существенное влияние на результаты экспериментов оказывает амплитуда колебаний, а также усилие обжатия нагельных соединений;

– упруго-деформируемые вкладыши значительно увеличивают податливость соединения и могут быть рекомендованы к использованию в конструкциях многоэтажных зданий из КДК, подвергающихся действию знакопеременных нагрузок, в том числе и сейсмических воздействий.

В соответствии с результатами экспериментальных исследований на динамическую нагрузку установлены осредненные значения коэффициента поглощения для образцов с вкладышем –  $\psi_{\text{вкл}} = 0,83$ , без –  $\psi_{\text{наг}} = 0,56$ . Полученные экспериментальные результаты использованы в последующих теоретических расчетах.

#### **4. Результаты применения сейсмостойкого узла соединения балок и плит перекрытия из ДПК в конструкции многоэтажного каркасного здания из клееных деревянных конструкций для повышения его сейсмостойкости при действии высокочастотных и среднечастотных землетрясений**

Исследовано напряженно-деформированное состояние конструкций многоэтажного здания с упруго-деформируемыми узлами сопряжения в условиях сеймики с учетом полученных результатов статических и динамических испытаний. Численные исследования выполнены на действие высокочастотных, среднечастотных и низкочастотных записей землетрясений. Результаты численных исследований представлены в таблице 2 при действии высокочастотных и среднечастотных землетрясений в зависимости от различного типа связей (жесткие, нагельные и с применением ПУ вкладыша). Жесткостные параметры узлов вдоль волокон клееных деревянных балок приняты по результатам статических испытаний, поперек – по результатам численного моделирования в ПК Ansys. В качестве характеристик, описывающих напряженно-деформируемое состояние несущих конструкций здания, выбраны изгибающие моменты, продольные силы

в наружных и внутренних колоннах, поперечные силы и изгибающие моменты в балках перекрытия. Для наглядного сопоставления полученных результатов наибольшие значения отражены в ячейках красного цвета, наименьшие – в зеленых.

Таблица 2 – Максимальные усилия и перемещения в элементах конструкций здания при действии высокочастотного и среднечастотного землетрясений при различном типе связей

№ п/п	Наименование конструкции	г. Алмирос, Греция (1980 г.)			г. Грива, Греция (1990 г.)		
		Вклад.	Жестк.	Нагель	Вклад.	Жестк.	Нагель
1	2	4	5	6	7	8	9
1	$M_y$ в наружных колоннах у заделки, кНм	385,75	246,44	396,59	704,00	819,25	875,9
2	$M_y$ во внутренних колоннах у заделки, кНм	218,91	322,35	229,46	413,78	719,55	539,44
3	$N$ в наружных колоннах, кН	3808,00	3847,21	3891,04	3518,67	4346,29	3982,55
4	$N$ во внутренних колоннах, кН	4694,84	4563,52	4692,73	4700,99	4876,27	4846,09
5	$Q_z$ в пролете главных балках перекрытия, кН	234,65	192,22	163,05	243,83	195,82	168,35
6	$Q_y$ в пролете главных балках перекрытия, кН	200,50	202,19	124,97	438,66	465,57	368,15
7	$M_z$ в пролете главных балках перекрытия, кНм	153,48	322,35	196,39	250,13	267,36	262,84
8	Перемещения всего здания, мм	85,51	70,14	86,63	69,26	99,16	91,43

Применение ПУ-вкладыша при действии землетрясения в г. Алмирос, Греция привело к снижению до 28 % максимальных изгибающих моментов в колоннах и балках перекрытия по сравнению с нагельным соединением, зафиксировано снижение максимальных перемещений конструкций здания и максимальных перемещений (до 28 %) по сравнению с другими типами рассматриваемых связей. Для землетрясения в г. Грива минимальные значения изгибающих моментов и продольных усилий в колоннах, изгибающих моментов в балках достигнуты с применением ПУ-вкладыша (снижение до 30 % по сравнению с нагельным соединением). Однако наблюдается незначительный рост усилий в главных балках перекрытия по сравнению с другими типами связей.

В таблице 3 представлены максимальные ускорения перекрытий при действии высокочастотного, среднечастотного и низкочастотного землетрясений в зависимости от различного типа связей. Применение ПУ-вкладыша привело к снижению до 46 % максимальных ускорений перекрытия для среднечастотного и низкочастотных землетрясений. Для высокочастотного землетрясения минимальные ускорения перекрытий установлены для жесткого типа связей – снижение до 30 % по сравнению с другими типами рассмотренных связей.

Таблица 3 – Максимальные значения ускорений перекрытий здания при действии различных землетрясений и типов связей

№ п/п	Наименование региона	Ускорения перекрытия, м/с <sup>2</sup>		
		Вклад.	Жестк.	Нагель
1	2	3	4	5
<b>Высокочастотное</b>				
1	г. Алмирос, Греция (1980 г.)	2,1	1,4	1,7
2	г. Фриули, Греция (1976 г.)	3,0	2,3	3,3
<b>Среднечастотное</b>				
3	рег. Умбрия, Италия (1997 г.)	3,1	3,2	3,6
4	г. Грива, Греция (1990 г.)	4,9	7,2	6,6
<b>Низкочастотное</b>				
5	г. Цзи-Цзи, Тайвань (1999 г.)	4,7	6,6	6,5
6	горы св. Ильи, Аляска (1979 г.)	7,4	10,3	8,8

На рисунке 13 представлены максимальные перемещения этажей по высоте здания (с шагом 5 этажей) относительно основания в зависимости от различной частоты землетрясения.

Как видно из графиков (рис. 13 а) включение упруго-деформируемого вкладыша по сравнению с нагельным соединением позволило снизить перемещения с отм. +15,000 м. до отм. +45,000 м на 21 % для высокочастотного землетрясения, при среднечастотном - начиная с отм. +15,000 на 30 % (рис. 13 б).

Установлено, что тип связей значительно влияет на напряженно-деформированное состояние конструкций здания в зависимости от частотного состава землетрясения. Наибольший эффект от использования вкладыша при сопряжении плиты и балки перекрытия наблюдается при действии высокочастотных и среднечастотных землетрясений. При действии низкочастотных землетрясений наблюдается увеличение максимальных усилий М, N, Q в конструкциях. С применением упруго-деформируемого вкладыша получены минимальные ускорения перекрытий здания в расчетных схемах при среднечастотных и низкочастотных воздействиях.

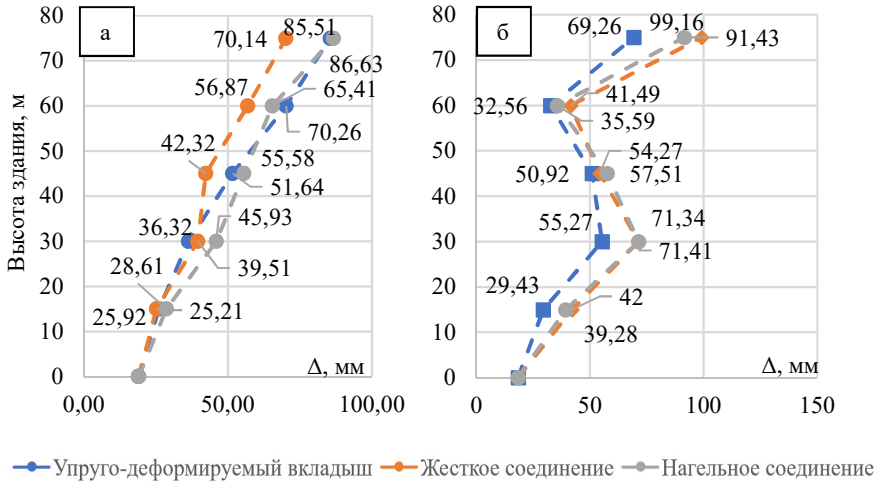


Рисунок 13 – Графики максимальных перемещений элементов здания при различной частоте землетрясения: а – г. Алмирос, Греция (1980 г.), б – г. Грива, Греция (1990 г.)

По результатам проведенных исследований подтверждена гипотеза, что включение упруго-деформируемого вкладыша в конструкцию узла сопряжения плит с балками перекрытий снижает пластические деформации в древесине, обеспечивает демпфирование горизонтальных динамических нагрузок в узлах, повышает их ремонтпригодность и эксплуатационную надежность конструкций многоэтажных зданий.

### 5. Рекомендации по проектированию сейсмостойких многоэтажных зданий из клееных деревянных конструкций с разработанными узлами

Усовершенствованный сейсмостойкий узел сопряжения плит из ДПК с деревянными клееными балками перекрытия предназначен для использования в преимущественно каркасных многоэтажных зданиях. Применение разработанного узла должно соотноситься с собственными частотами зданий, частотами землетрясений участка строительства.

#### Алгоритм подбора упруго-деформируемого вкладыша:

1. Определяют инженерно-геологические условия строительства, в том числе выполняют сейсморазведку.
2. Определяют тип и характер действующих нагрузок.
3. Формируют пространственный каркас многоэтажного здания, в котором пространственная жесткость и неизменяемость системы обеспечивается за счет связей, диафрагм, лестничных маршей и площадок, и других

элементов жесткости. Сопряжение колонн по длине с ригелями, ригелей с ядром жесткости принимают условно «жесткими».

4. Выполняют статические и динамические расчеты. Подбирают геометрически размеры основных несущих и ограждающих элементов.

5. Проводят предварительные расчеты по линейно-спектральной методике с учетом прогнозируемой интенсивности землетрясения.

6. Определяют усилия, приходящиеся на нагельные соединения между плитами и ригелями перекрытия. Рекомендуется принимать шаг нагелей из условия расстановки и диаметра ПУ вкладышей, но не более 300–400 мм для исключения хрупкого разрушения древесины.

7. Определяют диаметр, корректируют шаг нагелей соединения плиты из ДПК и балок перекрытия.

8. По результатам инженерных изысканий определяют частотный состав прогнозируемых землетрясений. Проводят модальный анализ проектируемого здания. Выполняют анализ свободных механических колебаний с целью определения собственных частот и форм колебаний конструкции.

9. Если прогнозируемое землетрясение относится к низкочастотным не рекомендуется в конструкции вкладыша использовать упруго-деформируемый материал, обеспечивающий большую податливость соединения чем стандартное нагельное. Возможно использование вкладыша из твердых пластиков или полиуретанов.

10. Для высокочастотных и среднечастотных землетрясений принимают диаметра вкладыша  $D \geq 4$  диаметра нагеля (рис. 3). Шаг нагелей принимают не менее 7 диаметров нагеля. Вкладыш помещается на всю толщину плиты из ДПК. Рекомендуется устанавливать вкладыш в балку перекрытия на  $1/3$  сечения элемента. Для повышения ремонтпригодности соединения рекомендуется назначать диаметр  $D$  вкладыша в ригеле меньше или равным диаметру вкладыша в плите из ДПК, но не более  $1/3$  ширины сечения ригеля.

11. Коэффициент жесткости соединения при различном диаметре и модуле упругости вкладыша предварительно рекомендуется принимать по результатам проведенных численных исследований. Нагель рекомендуется выполнять в виде гладких или резьбовых шпилек из марки стали не ниже С245 с учетом исключения их возможного хрупкого разрушения.

12. Выполняют поверочные расчеты конструкций зданий на действие инструментальных записей землетрясений прямым динамическим методом с учетом подобранного вкладыша. По результатам расчета корректируют характеристики вкладыша, сечения несущих элементов здания.

13. Рекомендуется перед применением подобранного вкладыша в конструкции многоэтажного здания провести его испытания на действие динамической нагрузки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований получены следующие результаты:

1. Выполнен анализ сейсмостойкого строительства зданий и сооружений в России и за рубежом. Рассмотрены основные методы повышения сейсмоустойчивости зданий и сооружений из клееных деревянных конструкций. Установлено, что многоэтажные здания из деревянных клееных конструкций недостаточно исследованы на сейсмическое воздействие. Выбрано наиболее рациональное конструктивное решение многоэтажного здания из клееной древесины для сейсмостойкого строительства.

2. Разработана конструктивная схема многоэтажного здания из клееных деревянных элементов в виде пространственно-регулярной системы, позволяющая учитывать анизотропные свойства материала, жесткость узлов в зависимости от сейсмического воздействия и диссипацию энергии землетрясения в узлах.

3. Установлено, что неучет типа связей между элементами значительно влияет на перераспределение внутренних усилий и напряжённо-деформированное состояние в элементах и узловых соединениях здания. Максимальные перемещения элементов здания с упругоподатливыми и шарнирными связями по сравнению с «жестким» сопряжением при сейсмических воздействиях увеличиваются до 40% для шарнирного опирания, до 28 % - для нагельных соединений. Максимальные изгибающие моменты во внутренних колоннах увеличились до 70 % в шарнирной расчетной модели и до 36% в расчетной модели, учитывающей упругую податливость связей.

4. Выполнен патентный поиск и разработано новое конструктивное решение узла сопряжения плит из ДПК и балок перекрытия пространственного каркаса многоэтажного здания из клееных деревянных конструкций с использованием упруго-деформируемых вкладышей (патент на изобретение № 2833987С1), позволяющее повысить сейсмостойкость многоэтажных каркасных зданий за счет изменения жесткости узла и диссипации энергии землетрясения. На другие новые технические решения также получены патенты (№229553U1, № 229881U1, № 231246U1, №231265U1, № 231345U1).

5. Выполнены сравнительные численные и экспериментальные исследования разработанного узла при действии статической и динамической нагрузок по специальной программе с использованием клееных деревянных элементов, построены графические зависимости. Определена деформативность, несущая способность и коэффициент поглощения соединений. По результатам статических испытаний несущая способность узла нагельного соединения с полиуретановым вкладышем выше до 12% чем без него.

6. Установлено, что при динамическом нагружении в нагельном гнезде без вкладыша наблюдается значительное обмятие древесины, для уменьшения которого с одновременным увеличением несущей способности узла рекомендуется применять нагельные соединения с упруго-деформируемым вкладышем из полиуретана. Применение упруго-деформируемого вкладыша привело к увеличению деформативности узлов до 75 % по сравнению с нагельным и повышению коэффициента поглощения  $\psi$  соединения.

7. По результатам выполненных численных исследований напряженно-деформированного состояния элементов каркаса здания с разработанным узловым соединением верифицирована эффективность его применения, что подтверждается повышением несущей способности клееных деревянных конструкций при действии высокочастотных и среднечастотных землетрясений. При этом минимальные ускорения перекрытий здания достигаются при среднечастотных и низкочастотных воздействиях.

8. Сформулированы рекомендации по проектированию сейсмостойких многоэтажных зданий из клееных деревянных элементов с разработанными узлами.

#### **Перспективы дальнейшей разработки:**

1. Развитие методики расчета и конструирования уникальных зданий и сооружений высотой 100 и более метров.

2. Экспериментальные исследования различных конструктивных систем зданий и сооружений из клееных деревянных и деревокомпозитных материалов на сейсмоплатформе.

3. Разработка и совершенствование узловых соединений для различных конструктивных схем многоэтажных, высотных, уникальных зданий и сооружений, как для нормальных условий, так и в сейсмоопасных зонах.

4. Совершенствование нормативной документации.

## **НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованные ВАК РФ**

1. НДС в элементах и узлах многоквартирного здания из CLT-панелей в условиях сеймики / Б. В. Лабудин, **В. В. Чередниченко**, А. В. Карельский, Е. В. Попов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2023. – № 3. – С. 12-22.

2. Влияние различных типов связей на НДС конструкций высотных зданий из деревоклееных элементов / **В. В. Чередниченко**, Е. В. Попов, А.В. Карельский, Б. В. Лабудин // Вестник Поволжского государственного

технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2023. – № 4. – С. 33-45.

3. Влияние податливости связей в узловых соединениях на силовое сопротивление конструкций каркаса многоэтажного здания из деревокомпозитных элементов в условиях сеймики / **В. В. Чердниченко**, Б. В. Лабудин, А. В. Карельский, Е. В. Попов // Вестник гражданских инженеров. – 2024. – № 5(106). – С. 28-40.

4. Численные исследования конструктивных решений высотных зданий из деревокомпозитных элементов / Б. В. Лабудин, **В. В. Чердниченко**, А. В. Карельский, Е. В. Попов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 6(786). – С. 29-40.

5. Расчет устойчивости составных стержней с нелинейно-податливыми связями сдвига / Е. В. Попов, О. В. Копров, Д. А. Стольпин, **В. В. Чердниченко** [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2025. – № 3(795). – С. 118-131.

6. Исследование сейсмостойкого узла сопряжения ДПК-плиты с деревокомпозитной балкой перекрытия пространственного каркаса высотного здания / **В. В. Чердниченко**, Е. В. Попов, Б. В. Лабудин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2025. – № 3. – С. 19-33.

-----  
Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 20.03.2026. Формат 60×84<sup>1/16</sup> Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 29.

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