

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
И. С. ТУРГЕНЕВА»

На правах рукописи

Трошин Михаил Юрьевич

**РАЗВИТИЕ ВИБРАЦИОННОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ ПЛИТ
ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ ПЕРЕКРЕСТНОКЛЕЕНОЙ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук, профессор Турков Андрей Викторович
--

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Коробко Андрей Викторович

Орёл – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	14
1.1 Современные материалы, конструкции и сооружения из древесины. 14	
1.2 Плиты перекрытия из древесины перекрестноклееной (ДПК)	21
1.3 Обзор современных исследований плит из ДПК.....	27
1.4 Обзор методов неразрушающей оценки несущей способности и деформативности плит из ДПК	32
1.5 Выводы по первой главе.....	41
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ НА НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗ ДПК.....	44
2.1 Аналитическое описание функциональной взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний	44
2.1.1 Основные зависимости теории пластин	44
2.1.2 Редукция рассматриваемой задачи к изопериметрическому формату	47
2.1.3 Определение зависимости для ортотропных пластин и объекта исследования.....	50
2.1.4 Аналитическое определение коэффициента K для различных условий двустороннего опирания.....	54
2.2 Допущения и расчётная схема объекта численных исследований	60
2.3 Исследование влияния геометрических параметров сечения и условий опирания на несущую способность и деформативность плит перекрытия из древесины перекрестноклееной.....	67

2.3.1 Влияние шага ламелей в поперечном слое на деформации и напряжения в трехслойных плитах перекрытия	67
2.3.2 Влияние толщины поперечного и продольных слоев на деформации и напряжения в трехслойных плитах перекрытия.....	70
2.3.3 Влияние шага ламелей в поперечных слоях на деформации и напряжения в пятислойных плитах перекрытия.....	75
2.3.4 Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформации и напряжения в пятислойных плитах перекрытия.....	79
2.4 Выводы по второй главе.....	86
ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ МАКСИМАЛЬНОГО ПРОГИБА И ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПЛИТАХ ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗ ДПК.....	87
3.1 Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении шага ламелей в поперечном слое в трехслойных плитах перекрытия	87
3.2 Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении толщины продольных и поперечного слоев в трехслойных плитах перекрытия	90
3.3 Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении шага ламелей в поперечных слоях в пятислойных плитах перекрытия	97
3.4 Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении толщины продольных и поперечных слоев в пятислойных плитах перекрытия	100
3.5 Выводы по третьей главе	107
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗ ДПК.....	108

4.1 Испытательный стенд и экспериментальные конструкции для проведения исследований.....	108
4.2 Методика проведения экспериментальных исследований плит из ДПК	110
4.2.1 Методика проведения статических испытаний	110
4.2.2 Методика проведения динамических испытаний.....	118
4.3 Определение кратковременного модуля упругости древесины плит	120
4.4 Определение влажности древесины.....	123
4.5 Результаты экспериментальных исследований плит из ДПК при статическом нагружении	125
4.5.1 Статические испытания трехслойной плиты из ДПК (конфигурация № 1)	125
4.5.2 Статические испытания трехслойной плиты из ДПК с утолщенными продольными слоями (конфигурация № 2).....	128
4.5.3 Статические испытания трехслойной плиты из ДПК с утолщенным поперечным слоем (конфигурация № 3).....	132
4.5.4 Статические испытания трехслойной плиты из ДПК с зазорами в поперечном слое (конфигурация № 4).....	135
4.5.5 Статические испытания пятислойной плиты из ДПК (конфигурация № 5)	138
4.6 Результаты экспериментальных исследований взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний в плитах из ДПК	142
4.6.1 Динамические испытания трехслойной плиты из ДПК.....	142
4.6.2 Динамические испытания трехслойной плиты из ДПК с утолщенными продольными слоями.....	144

4.6.3	Динамические испытания трехслойной плиты из ДПК с утолщенным поперечным слоем	146
4.6.4	Динамические испытания трехслойной плиты из ДПК с зазорами в поперечном слое	148
4.6.5	Динамические испытания пятислойной плиты из ДПК	150
4.7	Выводы по четвертой главе	152
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ ДВУСТОРОННЕ ОПЕРТЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗ ДПК.....		153
5.1	Алгоритм определения максимального прогиба и нормальных напряжений плит перекрытия из ДПК.....	153
5.2	Выводы по пятой главе.....	160
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		162
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....		164
ПРИЛОЖЕНИЕ		190

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

В условиях глобального перехода к устойчивому и низкоуглеродному строительству древесина вновь приобретает статус одного из ключевых конструктивных материалов. Способность аккумулировать атмосферный углерод, возобновляемость, низкая энергоёмкость производства и высокие конструктивные свойства делают её привлекательной альтернативой традиционным материалам, таким как железобетон. Особое значение в этом контексте приобретают инженерные древесные материалы, среди которых ведущую роль играет древесина перекрестноклееная (ДПК, CLT). Благодаря многослойной перекрестной структуре, возможно создавать плиты значительных габаритов, применяемые в стенах, перекрытиях и покрытиях зданий.

Плиты перекрытия из ДПК являются одним из наиболее ответственных элементов здания. Их механическое поведение определяется не только общими геометрическими параметрами, но и свойствами отдельных слоев. В последние годы наблюдается устойчивый интерес к исследованию различных конфигураций сечения ДПК, направленных на снижение материалоемкости и адаптацию под специфические эксплуатационные условия. Однако достоверное численное определение несущей способности и деформативности таких конструкций возможно только при наличии исчерпывающей информации об упругих характеристиках материала и условиях опирания.

Существующие методы оценки действительной несущей способности и деформативности плит перекрытия из ДПК в подавляющем большинстве случаев основаны на статических испытаниях, требующих приложения внешней нагрузки. Такие подходы трудоёмки и не применимы в условиях строительного производства без остановки технологического процесса. Активно развиваемой альтернативой служат динамические методы, однако они либо ориентированы на выявление

локальных дефектов, либо не обеспечивают прямой количественной связи между измеряемыми динамическими и статическими параметрами конструкции.

В этих условиях научную и практическую значимость приобретает вибрационный метод, основанный на фундаментальной закономерности, которая связывает максимальный статический прогиб конструкции с квадратом частоты основного тона её собственных колебаний. Эта зависимость позволяет оценивать деформативность и, опосредованно, несущую способность конструкции без активного нагружения в упругой стадии работы. На сегодняшний день данный подход получил развитие применительно к железобетонным и простым балочным деревянным конструкциям; однако его применимость к многослойным ортотропным плитам перекрытия из ДПК с учетом различной геометрии слоёв остается недостаточно изученной.

Таким образом, актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью развития универсального, неразрушающего и практически реализуемого метода оценки несущей способности и деформативности для плит перекрытия из ДПК.

Степень разработанности темы исследования

Исследованию деревянных конструкций посвящена обширная научная традиция. Вклад в нашей стране в её формирование внесли Е.К. Ашкенази, Ф.П. Белянкин, В.Н. Глухих, П.А. Дмитриев, Е.М. Знаменский, А.М. Иванов, Л.М. Ковальчук, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов, Р.Б. Орлович, А.П. Павлов, А.А. Погорельцев, С.И. Рощина, Е.И. Савков, Е.Н. Серов, Ю.С. Соболев А.В. Турков, С.Б. Турковский, С.В. Тутурин, Г.М. Хвесько, В.М. Хрулев, П.Н. Хухрянский, А.Г. Черных, А.Н. Чубинский и другие.

Изучением конструкций из древесины перекрестноклееной занимались И.В. Каменев, Б.В. Лабудин, А.А. Погорельцев, Ю. Сюй, А.В. Турков, М.А. Филимонов, Т.П. Чернова, А.Г. Черных, H.J. Blass, T. Bogensperger, R. Brandner, A. Ceccotti, R. Crocetti, B. Douglas, G. Fink, M. Flaig, S. Gagnon, D. Honfi, E. Karacabeyli, H. Kreuzinger, C. Loss, A. Polastri, S.A. Ringhofer, G. Schickhofer и другие.

Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний получена при рассмотрении изучаемого объекта в виде пластины. Вклад в развитие теории пластин внесли С.А. Амбарцумян, П. Г. Великанов, В.В. Карпов, А. В. Коробко, В. И. Коробко, С.Г. Лехницкий, Б.К. Михайлов, А. Р. Ржаницын, С. П. Тимошенко, В. В. Филатов, А. Р. Хечумов и другие.

Исследованием неразрушающих методов контроля и оценки строительных конструкций занимались: С.Н. Савин, В.В. Капустина, Н.А. Крылов, И.В. Ситников, И.Д. Смирнов, А.В. Улыбин, А.А. Чуркин, Abraham O., Cascante G., Cavalagli N., Hsiao C., Gusella V., Lee Y.H., Le Marrec L., Polak M.A., Song K.I. и другие.

Исследованием подхода для неразрушающей оценки физико-механических характеристик строительных конструкций, основанного на закономерности Коробко В.И., занимались: Е.Г. Абашин, П.А. Гвозков, М.О. Калашников, Д.И. Красильников, А.А. Макаров, К.В. Марфин, Г.В. Слюсарев, А.В. Турков, А.П. Юров.

Целью работы является развитие вибрационного метода оценки несущей способности и деформативности плит перекрытия из древесины перекрестноклееной путем установления закономерности, связывающей частоту основного тона собственных колебаний и максимальный прогиб, полученной с учетом ортотропии упругих свойств древесины.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- проанализировать состояние вопроса исследований конструкций из ДПК и методов оценки несущей способности и деформативности;
- теоретически определить взаимосвязь максимального прогиба и квадрата частоты основного тона собственных колебаний ортотропных пластин;
- установить влияние геометрических параметров слоев и условий опирания на несущую способность и деформативность плит перекрытия из ДПК методом конечных элементов;

- численно исследовать взаимосвязь максимального прогиба и частоты основного тона собственных колебаний для плит перекрытия из ДПК с варьируемыми геометрическими параметрами слоев при различных условиях опирания;
- экспериментально определить нормальные напряжения, максимальный прогиб и частоту основного тона собственных колебаний в образцах для верификации численных исследований;
- разработать метод оценки несущей способности и деформативности плит перекрытия из ДПК.

Научная гипотеза: полагается, что для ортотропных многослойных конструкций, в частности, плит перекрытия из древесины перекрестноклееной произведение максимального прогиба и квадрата круговой частоты основного тона собственных колебаний является постоянной величиной, практически не зависящей от податливости узлов опирания и неоднородности сечения в пределах линейно-упругой работы конструкции.

Объект исследования: трехслойные и пятислойные однопролётные плиты перекрытия из ДПК с варьируемым геометрическими параметрами сечения с различными видами двустороннего опирания.

Предмет исследования: взаимосвязь максимального прогиба и частоты основного тона собственных колебаний в плитах перекрытия из древесины перекрестноклееной при упругой работе.

Область исследования: соответствует требованию паспорта научной специальности ВАК РФ 2.1.1 «Строительные конструкции, здания и сооружения» пункт 4 «Разработка и развитие методов мониторинга, оценки качества и диагностики технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений в период их строительства, эксплуатации и реконструкции».

Методология и методы исследования.

В теоретических исследованиях использованы классические аналитические и численные методы строительной механики и теории сооружений. Актуальность

темы определена на основе выводов фактологического анализа существующих работ по рассматриваемым конструкциям и методам оценки их напряжённо-деформированного состояния. Численное моделирование выполнено в программном комплексе «SCAD++» с применением метода конечных элементов. Обработка экспериментальных данных проведена с использованием методов математической статистики.

Научная новизна полученных результатов.

При проведении исследований получены следующие новые научные результаты:

– разработан метод оценки несущей способности и деформативности двусторонне опертых плит перекрытия из древесины перекрестноклееной, реализуемый для различных конфигураций сечения конструкции;

– доказано, численно и экспериментально, что произведение максимального прогиба на квадрат круговой частоты основного тона собственных колебаний плит перекрытия из древесины перекрестноклееной с варьируемыми геометрическими параметрами слоев при различных условиях двустороннего опирания является постоянной величиной, выраженной через коэффициент пропорциональности K , с малым процентом отклонения.

Теоретическая значимость состоит в установлении закономерности о взаимосвязи максимального прогиба и частоты основного тона собственных колебаний для ортотропных плит перекрытия из древесины перекрестноклееной.

Практическая значимость состоит в разработке методики оценки деформативности и несущей способности вновь возводимых и существующих двусторонне опертых плит перекрытия из древесины перекрестноклееной, независимо от условий опирания конструкции и геометрической конфигурации сечения.

Достоверность результатов исследований обеспечена применением общепринятых положений строительной механики, согласованностью решений, полученных по различным расчётным схемам при идентичных исходных

параметрах, использованием актуальной версии программного комплекса SCAD++ для конечно-элементного анализа, высокой сходимостью экспериментального и теоретического исследований, корректностью методов статистической обработки, а также применением аттестованного измерительного оборудования.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Метод оценки несущей способности и деформативности двусторонне опертых плит перекрытия из древесины перекрестноклееной, реализуемый для различных конфигураций сечения конструкции.

2. Зависимости нормальных напряжений и максимального прогиба в плитах перекрытия из древесины перекрестноклееной при действии статической нагрузки от изменения геометрических параметров слоев и условий опирания.

3. Закономерность о взаимосвязи квадрата частоты основного тона собственных колебаний конструкции и максимального прогиба при действии статической равномерно распределенной нагрузки для плит перекрытия из древесины перекрестноклееной с различной толщиной продольных и поперечных слоев, а также с наличием воздушных зазоров (шага ламелей) в поперечных слоях при различных условиях двустороннего опирания.

4. Результаты экспериментального исследования образцов плит из древесины перекрестноклееной с различными геометрическими параметрами слоев.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлены на конференциях:

1. VII Международная научно-практическая конференция (СибАДИ) «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (г. Омск, 2022 г.).

2. VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационное развитие современной науки: теория, методология, практика» (г. Петрозаводск, 2023 г.).

3. International Scientific and Practical Conference «Modern Problems in Construction: Setting Tasks and Ways to Solve Them» (г. Курск, 2023 г.).

4. VIII Международная научно-практическая конференция «Безопасный и комфортный город» (г. Орёл, 2024 г.).

5. XVII Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (г. Новосибирск, 2024 г.).

6. Всероссийская научно-практическая конференция «Город XXI века. Мировые тренды и региональные особенности» (г. Орел, 2024 г.).

Публикации. По результатам научных исследований опубликовано 15 статей, из них 11 входят в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ.

Внедрение научных результатов диссертации: материалы диссертации использованы в образовательном процессе в ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», на что получен акт о внедрении.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из Введения, 5 глав, Заключения, Списка использованной литературы и Приложения. Библиографический список содержит 212 наименований, в том числе – 90 иностранных. Работа изложена на 191 странице, включая 95 рисунков, 38 таблиц.

Содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, дается ее общая характеристика, формулируются основные цели и задачи исследования, обозначаются достоверность, научная новизна, методология, теоретическая и практическая значимость результатов работы и содержится информация по апробации работы и количеству научных публикаций.

В первой главе рассматривается состояние вопроса исследования, формулируются цели и задачи исследования.

Во второй главе представлено аналитическое описание закономерности о взаимосвязи максимального прогиба и основного тона частоты собственных колебаний ортотропных пластин. Аналитически получены значения коэффициента пропорциональности K для различных условий опирания. Численно исследованы влияние шага ламелей в поперечном слое, толщины продольных и поперечных

слоев на несущую способность и деформативность трех- и пятислойных плит перекрытия из ДПК при различных условиях опирания.

Третья глава посвящена исследованию взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний, выраженной через постоянный коэффициент пропорциональности K применительно к трехслойным и пятислойным плитам перекрытия из ДПК с различными конфигурациями сечения и условиями опирания.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям образцов плит перекрытия из ДПК. Верифицирована численная модель, использованная в исследованиях во второй и третьей главе. Подтверждены зависимости и закономерности, полученные численным способом.

Пятая глава посвящена разработке методики оценки действительной несущей способности и деформативности двусторонне опертых плит перекрытия из ДПК с различными конфигурациями сечения и проведено сопоставление результатов расчета по ней и экспериментальных данных. Рекомендован алгоритм обследования плиты перекрытия из древесины перекрестноклееной.

По результатам исследований сделаны основные выводы.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Современные материалы, конструкции и сооружения из древесины

Древесина является универсальным строительным материалом, который использует человек с древнейших времен. Ряд преимуществ позволяет использовать дерево там, где применение иных материалов, таких как железобетон или металл, неудобно, излишне трудо- или ресурсозатратно, либо необходимы особые свойства возводимого сооружения. При этом, монтаж деревянных конструкций может выполняться с большой скоростью, с использованием строительной техники меньшей грузоподъемности и преимущественно из готовых блоков и модулей заводской сборки. За счет малого собственного веса есть возможность возводить здания и сооружения из деревянных конструкций в сложных инженерно-геологических условиях (сейсмическая активность, просадочные грунты и т.д.).

Сжигание ископаемых видов топлива, накопленных за миллионы лет, нарушило углеродный цикл, вызвав рост концентрации CO₂ в атмосфере и изменение климата. Природные процессы не успевают компенсировать эти выбросы, что и стало основанием для Парижского соглашения 2015 года [203]. В этих условиях древесина как строительный материал играет ключевую роль благодаря способности поглощать и хранить углерод, а изделия из неё, сохраняя углерод в течение всего срока службы, функционируют как углеродные резервуары (рисунок 1.1) [155].

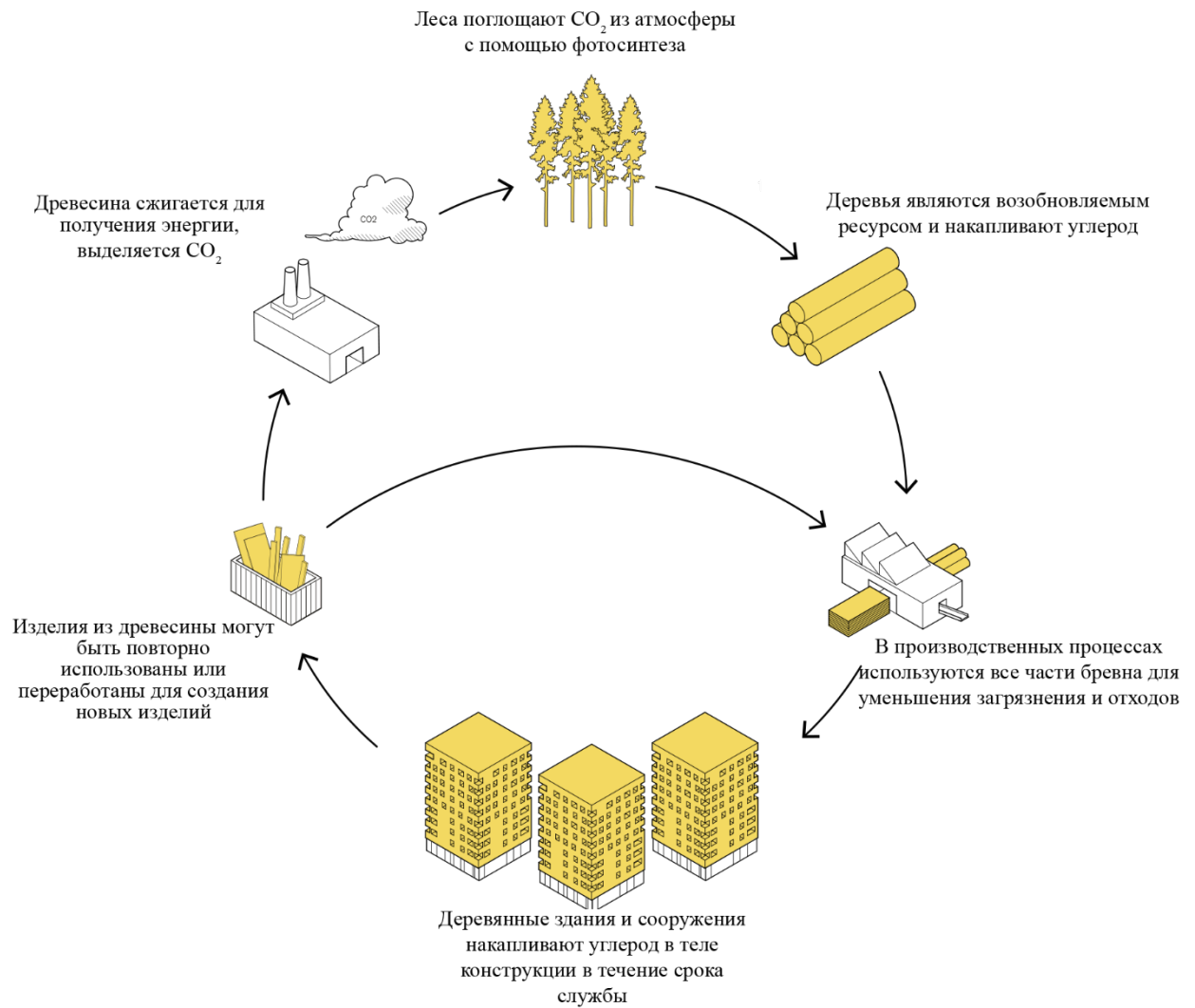


Рисунок 1.1 – Углеродный цикл изделий из древесины [155]

Из иллюстрации следует, что увеличение использования древесины в строительстве позволяет извлекать из атмосферы и надолго сохранять большие объёмы углерода. Деревянные здания при этом становятся долговременными углеродными хранилищами, что способствует снижению антропогенных выбросов CO_2 и смягчению климатических изменений.

Помимо экологичности и возобновляемости, древесина обладает высокими физико-механическими и конструктивно-технологическими свойствами, низкой теплопроводностью, кислотостойкостью и другими ценными характеристиками. Исследованию деревянных конструкций посвящена обширная научная традиция. Вклад в нашей стране в её формирование внесли: Е.К. Ашкенази, Ф.П. Белянкин, В.Н. Глухих, П.А. Дмитриев, Е.М. Знаменский, А.М. Иванов, Л.М. Ковальчук, Б.В.

Лабудин, В.И. Мелехов, А.Н. Митинский, Р.Б. Орлович, А.П. Павлов, А.А. Погорельцев, П.Ф. Плешков, С.И. Рощина, Е.И. Савков, Е.Н. Серов, Ю.С. Соболев А.В. Турков, С.Б. Турковский, С.В. Тутурин, Г.М. Хвесько, В.М. Хрулев, П.Н. Хухрянский, А.Г. Черных, А.Н. Чубинский и др. [3, 5, 9-11, 21, 27-28, 34, 46, 52, 56-58, 62-64, 70, 72-73, 75, 99-102, 107, 111-112, 115-116, 118]. Их работы заложили теоретическую основу и способствовали развитию технологий эффективного применения древесины в строительстве.

С развитием науки и техники область применения древесины стала значительно расширяться за счет появления новых технологий и конструкций, которые стремились повысить жесткость, прочность, стойкость древесины к гниению, огнестойкость, снизить гигроскопичность и уменьшить влияние анизотропии на механические свойства материала [119, 121].

Клееные деревянные конструкции (КДК) значительно расширили применение древесины в строительстве [73]. Соединение отдельных досок с помощью клея в пакет позволяет создавать прочные и устойчивые конструкции из нескольких слоев пиломатериала. Благодаря этому древесина стала более востребованным строительным материалом, получив новые возможности использования. В США и странах Западной Европы такие материалы имеют обозначение *EWP (Engineered Wood Products)* – конструкционные (или инженерные) древесные материалы [207].

Клееный брус (Glulam, Glued laminated lumber), важный представитель инженерных древесных материалов, сыграл значительную роль в расширении применения древесины в строительстве (рисунок 1.2). Традиционные пиломатериалы имеют ограничения в размерах и не могут использоваться для конструкций пролётом более 6 м. Клееный брус позволил преодолеть эти ограничения.



Рисунок 1.2 – Клееный брус
(Glulam)



Рисунок 1.3 – Брус из клееного шпона
(LVL-брус)

Доски для склеивания могут иметь разные размеры, но обычно не превышают 45 мм в толщину. В настоящее время в производство некоторых видов клееного бруса были включены полимеры, армированные волокнами. Этот компонент повышает характеристики элемента при растяжении и обеспечивает экономическую выгоду в некоторых областях применения. Клееный брус часто используется в качестве прямых балок, включая перемычки, прогоны, коньковые балки и балки перекрытия, колонны круглого, квадратного и сложного сечения, изогнутые балки и крыши.

Брус из клееного шпона, или LVL-брус (LVL, Laminated Veneer Lumber), в отличие от клееного бруса, который собирается из досок, создаётся с использованием древесного шпона (рисунок 1.3). Изобретенный в конце 1960-х годов, LVL завоевал репутацию высокопрочного материала для колонн и балок как в жилых, так и коммерческих зданиях. Поскольку он изготавливается из шпона, использование LVL на 35 % более эффективно в расходе лесных ресурсов, чем массивных пиломатериалов. LVL-брус применяется в качестве высокопрочных несущих балок, способствуя уменьшению нагрузки на окна, входные группы, а также в конструкциях полов и крыш жилых и легких коммерческих деревянных зданий. Он может служить и для создания плит, и для элементов балок и колонн.

Пиломатериал с параллельными прядями PSL (Parallel strand lumber), обычно известный как Parallam, разработан для замены цельных пиломатериалов, таких как балки, доски и столбы (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – PSL-брус



Рисунок 1.5 – LSL-брус

Данный материал был разработан в Канаде и появился на рынке в конце 1980-х годов. PSL может иметь различную толщину и ширину, и производится в длинах до 20 метров. Волокна в основном извлекаются из шпона, снятого с самой внешней части бревен, где присутствует больше текстуры. Шпон высушивают до влажности 11 % и проверяют на прочность перед разделкой на волокна. Затем волокна выравнивают параллельно друг другу, покрывают водостойким клеем, после чего происходит прессование и отверждение. PSL применяется для создания крупных элементов в жилищном строительстве, а также для средних и крупных элементов в строительстве коммерческих зданий.

Слоисто-стружечный брус LSL (Laminated strand lumber) обычно производится из древесной массы (рисунок 1.5). В настоящее время LSL изготавливается из избыточных, переразвившихся деревьев осины, которые часто не обладают достаточными размерами, прочностью или достаточной прямоотой для создания традиционных деревянных изделий. Данный материал схож с другим материалом из древесной стружки – ориентированно-стружечной плитой (ОСП, или OSB) с тем отличием, что в LSL стружки ориентированы строго в направлении длины плиты, а в ОСП (OSB) – во всех направлениях. После шлифовки материал нарезается на различные размеры, соответствующие различным областям

применения, таким как обрамляющие балки для каркасов полов, колонны и перекрытия. LSL

Последние 20 лет доля строительства из древесины в мире неуклонно растет. Несмотря на то, что Россия является одной из лидирующих стран по деревопереработке, доля деревянного строительства в общем объеме вводимого жилья уступает Европейским странам и США. Так, в сегменте индивидуального жилищного строительства на 2018 год, в США более 95 % домов строятся из дерева, в Финляндии – около 90 %, в Канаде и Швеции – 83 % и 78 % соответственно. В России же этот показатель до 2018 года не превышал 5 % [61]. Однако в 2021 году, по данным Рослесинфорга, этот показатель вырос до 11,67 %, и прогнозируется дальнейший рост [68].

При этом, значительно растет количество многоэтажных общественных и жилых зданий из древесины. По миру есть немало реализованных проектов: здание «Murray Grove», 2009 г., Великобритания (рисунок 1.6); здание жилого комплекса «Puukuokka», 2015 г., Финляндия (рисунок 1.7); здание жилого комплекса «Limnologen», 2008 г., Швейцария (рисунок 1.8); здание жилого комплекса «Forte», 2012 г., Австралия (рисунок 1.9); здание жилого комплекса «Mjøstårnet», 2019 г., Норвегия (рисунок 1.10); жилой комплекс «Соколики», 2022 г., Россия (рисунок 1.11) и др.



Рисунок 1.6 – Здание «Murray Grove», Великобритания



Рисунок 1.7 – Здание жилого комплекса «Puukuokka», Финляндия



Рисунок 1.8 – Здание жилого комплекса «Limnologen», Швейцария



Рисунок 1.9 – Здание жилого комплекса «Forte», Австралия



Рисунок 1.10 – Здание жилого комплекса «Mjøstårnet», Норвегия



Рисунок 1.11 – Жилой комплекс «Соколики», Россия

Это стало возможным благодаря развитию современных строительных материалов, описанных выше [4]. Однако ранее намеренно не указан наиболее интересный с точки зрения увеличения несущей способности деревянных конструкций материал, который является ключевым при строительстве многоэтажных зданий – плиты из древесины перекрестноклееной (ДПК, или CLT).

1.2 Плиты перекрытия из древесины перекрестноклееной (ДПК)

Древесина перекрестноклееная (ДПК) [18] представляет собой фабрично изготавливаемую деревянную плиту, состоящую из нечётного числа ортогонально склеенных слоёв (рисунок 1.12). Материал предназначен для применения в несущих (стенах, перекрытиях, покрытиях) и ограждающих конструкциях, где требуются высокая прочность и жёсткость. В международной практике ДПК известна под наименованием *Cross-Laminated Timber (CLT)*.



Рисунок 1.12 – Плита из ДПК

Конструктивно плита ДПК состоит как минимум из трёх склеенных между собой слоёв, ориентированных чередующимся образом: внешние слои располагаются вдоль основного направления плиты, а внутренние – перпендикулярно к ним (рисунок 1.13). В отдельных случаях для достижения требуемых механических характеристик могут применяться двойные продольные слои на гранях или дополнительные слои в центре сечения.

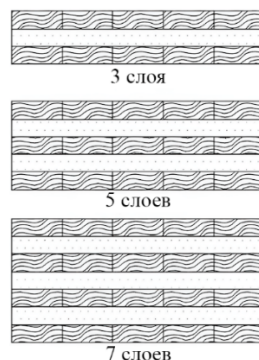


Рисунок 1.13 – Примеры сечений плиты из ДПК

Производство ДПК осуществляется в строго контролируемых условиях. Влажность древесины на этапе склеивания, как правило, составляет 8-15 % [18], что обеспечивает оптимальные условия для полимеризации клея и минимизирует последующие деформации. Для увеличения длины, ламели соединяются с помощью зубчатого сращивания, обеспечивающего прочность, близкую к прочности цельной доски (рисунок 1.14). В качестве клеевых составов применяются однокомпонентный полиуретан (PUR), эмульсионный полимерный изоцианат (EPI) и фенол-резорциново-формальдегидные смолы (PRF). Наибольшее распространение получил клей PUR благодаря высокой адгезии к древесине и отсутствию вредных выделений [18].

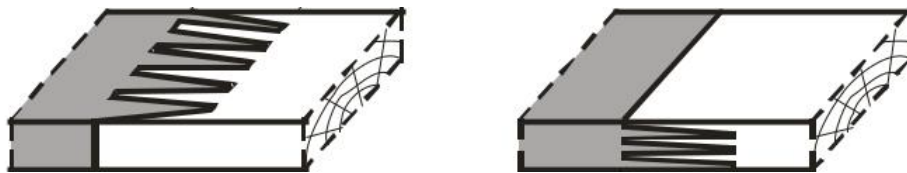


Рисунок 1.14 – Соединение «зубчатый шип»

Размеры плит ограничены возможностями производственного оборудования и требованиями к транспортировке. Типичные габариты: длина – от 3000 до 18000 мм, ширина – от 1250 до 3800 мм, толщина – от 60 до 500 мм при толщине отдельного слоя не более 45 мм [18].

Слоистая структура ДПК с чередующейся ориентацией волокон способствует усреднению анизотропных свойств древесины и снижению локальных неоднородностей. Несущая способность и жёсткость плиты при изгибе в значительной степени определяются компоновкой поперечного сечения и качеством склеивания слоёв.

К числу эксплуатационных преимуществ ДПК также относятся повышенная огнестойкость [125, 139, 148, 189] и высокая удельная теплоёмкость [198]. Как инженерный материал высокой степени заводской готовности, ДПК отличается повышенной стоимостью – на 30-40 % выше по сравнению с традиционными конструкционными материалами. Это обусловлено применением качественной древесины, современных производственных технологий, высокопрочных клеевых

составов и увеличенными затратами на транспортировку крупногабаритных плит. Вместе с тем, за счёт лёгкости, скорости монтажа и экологической устойчивости применение ДПК может привести к сокращению общих затрат на строительство.

Проектирование и применение ДПК регулируются международными и национальными нормативными документами. К числу основных стандартов относятся: EN 1995-1-1:2009 Eurocode 5 [142], европейский EN 16351:2021 [141], международный ISO 16696-1:2019 [159] и североамериканский ANSI/APA PRG 320 (2019) [123]. В Российской Федерации действует ГОСТ Р 56706-2022 «Плиты из перекрестноклееной древесины. Общие технические условия» [18], а также применяется СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» [80] в части общих принципов расчёта. Важную роль в практическом проектировании играют национальные справочники (Handbooks), такие как: The CLT Handbook (Швеция) [202], CLT Handbook US Edition (США) [161] и FPInnovations Canadian CLT Handbook (Канада) [134], содержащие рекомендации по расчёту, результаты экспериментов, примеры проектирования и данные по огнестойкости, акустике и динамике.

Несмотря на разнообразие конструктивных применений, в настоящей работе в качестве основного объекта исследования рассматриваются плиты перекрытия из ДПК. Этот выбор обусловлен их высокой ответственностью в зданиях различного назначения: недостаточная несущая способность или чрезмерный прогиб могут привести не только к нарушению условий нормальной эксплуатации (трещины в отделке, заедание дверей, локальные скопления воды), но и, в случае повышенных нагрузок, к угрозе локального или прогрессирующего обрушения.

Плиты перекрытия (или покрытия) из ДПК обычно опираются на несущие стены или балки либо по контуру, либо по двум противоположным сторонам (рисунок 1.15).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.15 – Примеры плит перекрытия/покрытия из ДПК
 (а – плита покрытия двустороннего опирания; б – плита перекрытия двустороннего опирания; в – плита перекрытия контурного опирания; г – плиты перекрытия и покрытия различного опирания)

Условия опирания зависят от конструктивного решения и способа соединения [202]. Узлы примыкания всегда обладают податливостью, обусловленной допусками на геометрию сопряжений, деформативностью соединительных элементов и смятием древесины в местах опирания (рисунок 1.16). Вследствие этого в реальных конструкциях не достигаются ни идеальный шарнир (нулевая изгибная жёсткость), ни идеальное защемление (бесконечная жёсткость) – поведение узла всегда лежит между этими предельными случаями. В связи с этим при исследовании плит перекрытия из ДПК, как правило, рассматриваются именно предельные схемы – шарнирное опирание и жёсткое защемление (в меньшей степени), поскольку они позволяют оценить границы возможного поведения конструкции, обеспечивают сопоставимость результатов и избегают неопределённости, связанной с количественной оценкой податливости узлов.

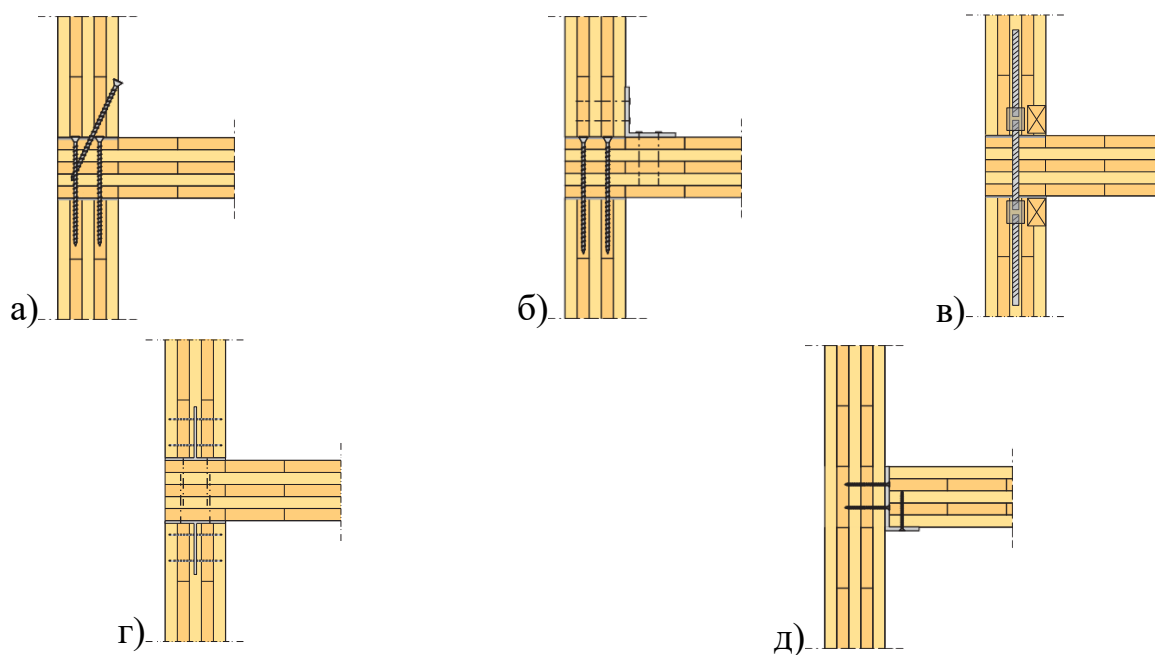


Рисунок 1.16 – Примеры соединения плит перекрытия из ДПК со стенами [201] (а – длинными шурупами; б – крепежными уголками; в – шурупами и нагелями; г – стальными пластинами; д – уголками и шурупами)

Различные экспериментальные исследования [64, 153, 157, 166, 199 и др.] механического поведения плит перекрытия из древесины перекрестноклееной показывают, что до достижения 85-90 % разрушающей нагрузки сохраняется линейная зависимость между нагрузкой и деформацией (рисунок 1.17). Вследствие

отсутствия выраженной пластической стадии и незначительного проявления нелинейности до наступления предельного состояния, поведение материала в диапазоне эксплуатационных нагрузок удовлетворительно описывается линейной теорией упругости.

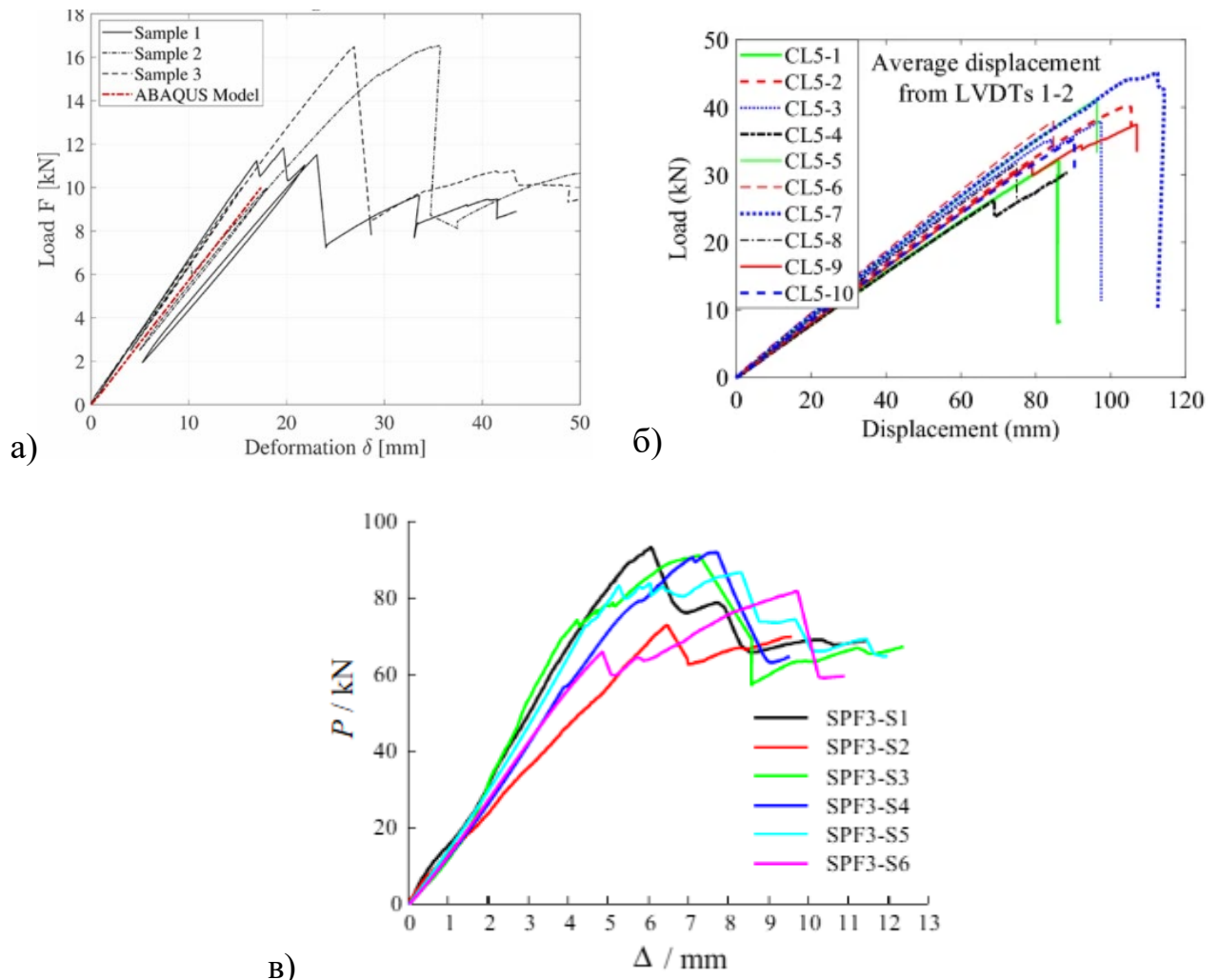


Рисунок 1.17 – Примеры диаграмм «нагрузка-деформация» различных видов плит перекрытия из ДПК
(а – плита перекрытия с зазорами в поперечном слое [199]; б – пятислойная плита перекрытия [153]; в – трехслойная плита перекрытия [157])

В плитах перекрытия из ДПК вклад сдвиговых деформаций в общее деформированное состояние конструкции является существенным и влияет как на поперечные деформации (прогиб), так и на распределение касательных и нормальных напряжений. Ключевым параметром, определяющим необходимость учёта сдвига, является отношение пролёта к толщине L/h . Согласно данным [157], при $L/h < 6$ сдвиг становится определяющим фактором несущей способности, что

подтверждается стандартами, такими как ASTM D 2718. В справочнике [134] описаны испытания на межслойный сдвиг при $L/h=5$ или 6, подчёркивающие важность этого эффекта при данном соотношении геометрических параметров. В то же время в работах [133, 168] отмечается, что при $L/h > 30$ влиянием сдвига можно пренебречь, тогда как в [146] показано, что наибольшее влияние сдвига на жёсткость проявляется при $L/h < 20$. В [212] предложен корректирующий коэффициент для прогнозирования прогиба в зависимости от L/h ; при $L/h > 30$ его значение приближается к единице, что свидетельствует о незначительности сдвиговых эффектов.

В инженерной практике для расчёта плит перекрытия из ДПК при изгибе применяются такие теоретические модели, как балочная теория Эйлера-Бернулли, теория Тимошенко с учётом сдвиговых деформаций [113], а также классические и уточненные теории тонких упругих пластин (Кирхгофа-Лява, Рейсснера-Миндлина и др.). Вклад в развитие теории пластин внесли учёные: С.А. Амбарцумян, П. Г. Великанов, В.В. Карпов, А. В. Коробко, В. И. Коробко, С.Г. Лехницкий, Б.К. Михайлов, А. Р. Ржаницын, С. П. Тимошенко, В. В. Филатов, А. Р. Хечумов и другие [2, 7, 35-41, 45, 47-48, 66-67, 83-84, 104-105, 108-110].

С учётом многослойной структуры, ортотропии, чувствительности к условиям опирания и геометрии сечения, а также ответственной функции в здании, плиты перекрытия из ДПК требуют комплексного подхода к анализу их механического поведения. Для формирования такого подхода необходимо опираться как на накопленный международный опыт, так и на результаты фундаментальных и прикладных исследований.

1.3 Обзор современных исследований плит из ДПК

На сегодняшний день проведено значительное количество исследований, посвященных плитам из древесины перекрестноклееной. Фокус исследований лежит, как правило, на анализе общих механических свойств конструкций под

действием нагрузок, влиянии характеристик отдельных слоёв на несущую способность и деформативность, а также на выявлении рациональных конструктивных решений, обеспечивающих требуемые прочностные и жесткостные характеристики. Такой многоаспектный подход способствует глубокому пониманию поведения ДПК в реальных условиях эксплуатации и выявлению направлений для дальнейшего развития технологий производства и применения этого материала в строительстве.

Исследованиями конструкций из древесины перекрестноклееной занимались И.В. Каменев, Б.В. Лабудин, А.А. Погорельцев, Ю. Сюй, А.В. Турков, М.А. Филимонов, Т.П. Чернова, А.Г. Черных, Н.Ж. Blass, Т. Bogensperger, R. Brandner, A. Ceccotti, R. Crocetti, B. Douglas, G. Fink, M. Flaig, S. Gagnon, D. Honfi, E. Karacabeyli, H. Kreuzinger, C. Loss, A. Polastri, S.A. Ringhofer, G. Schickhofer и другие [31, 63-64, 82, 106, 114-115, 129-131, 147, 149, 186 и др.].

Важным ориентиром для понимания эволюции исследований ДПК служит обзор [129], подготовленный учеными из Граца в 2016 году. В этой работе систематизированы ключевые аспекты, включая производство и технологию материала, его механические свойства, принципы проектирования и способы соединений. Авторы не только суммировали текущее состояние знаний на момент публикации, но и прогнозировали направления исследований на ближайшие 10 лет, подчеркивая актуальность изучения несущей способности плит с неоднородной структурой сечения. Этот прогноз в значительной мере сбылся, о чем свидетельствует последующий рост числа работ, посвященных исследованию различных параметров плит из ДПК.

Комплексные оценки несущей способности представлены в работах [63, 64] группы исследователей из НИЦ «Строительство». В этих исследованиях проведен анализ прочностных и упругих характеристик стеновых панелей и плит перекрытия из ДПК, включая экспериментальные испытания и теоретические расчеты. Авторы разработали методики расчета несущей способности, учитывающие ключевые параметры конструкций, и предложили их для интеграции в нормативную документацию. Результаты подчеркивают практическую ценность ДПК как

надежного материала для многоэтажного деревянного строительства. Тем не менее, в этих работах акцент сделан на общих свойствах всей конструкции, без глубокого рассмотрения влияния отдельных параметров слоев на деформативность и несущую способность в целом.

В работах [154, 165, 166, 192, 194, 195] подробно анализируются механические свойства плит, где в слоях используются различные сорта древесины, часто представляющие собой более экономичные альтернативы традиционной сосне. Общая цель этих исследований заключается в оценке, как упругие характеристики отдельных слоев влияют на общую несущую способность конструкции с акцентом на поиск рациональных конфигураций, обеспечивающих требуемую несущую способность.

В других работах учитываются локальные дефекты в слоях, такие как трещины или неоднородности [187], а также влияние сучков и заболони [181], демонстрируя, как эти факторы могут снижать общую прочность и жесткостные свойства. Такие подходы подчеркивают необходимость комплексного учета как глобальных, так и локальных параметров при проектировании ДПК.

Продолжая анализ влияния параметров сечения, в работе [180] изучается комбинированное воздействие сорта древесины (в частности, лиственницы и сосны) и толщины слоев на прочность пятислойных плит ДПК при изгибе и сжатии. Авторы проводят экспериментальные тесты, показывающие, как изменение этих параметров влияет на несущую способность и деформации, что имеет прямое отношение к повышению эффективности конструкции. Аналогичный подход применяется в исследовании [172] японских ученых, где оценивается прочность на изгиб трех- и пятислойных плит из японского кедра с разной толщиной слоев. В этой работе подчеркиваются преимущества неоднородных конфигураций для уменьшения расхода материала и расширения возможностей проектирования зданий, включая более гибкие архитектурные решения. В [153] анализируется прочность на изгиб и сдвиг трех- и пятислойных плит из черной ели, с выводами о том, как общая толщина плиты влияет на жесткость и прочность. Влияние отдельных слоев на несущую способность в работе описано менее детально, что

оставляет пространство для дальнейших уточнений. Эти примеры иллюстрируют, как изменения различных параметров слоев напрямую сказываются на эксплуатационных характеристиках ДПК, способствуя переходу к нестандартным сечениям для использования в строительстве.

Несмотря на обширный накопленный объем исследований, касающихся влияния толщины слоев на деформативность и несущую способность ДПК, сохраняются заметные пробелы в знаниях. В частности, недостаточно данных о роли толщины продольных или поперечных слоев в распределении нормальных напряжений в отдельных слоях и в напряженно-деформированном состоянии всей плиты в целом.

В работе [199] исследуется влияние воздушных зазоров в поперечном слое на прочность на сдвиг и изгиб плит ДПК. Авторы отмечают тенденцию к уменьшению материалоемкости плит за счет введения таких неоднородностей, подчеркивая их потенциал для производства недорогих и легких конструкций. Однако количество исследований плит перекрытия из ДПК с зазорами в слоях остается ограниченным, хотя это направление представляется перспективным и актуальным для дальнейшего снижения материалоемкости при сохранении необходимой несущей способности и жесткости конструкции.

Помимо фокуса на параметрах сечения, исследования ДПК демонстрируют многообразие тем, выходящих за рамки базовых характеристик самого материала. Например, в работе [114] изучается напряженно-деформированное состояние соединений с деревянными ребрами, подчеркивая взаимодействие элементов. В [31] анализируется несущая способность цилиндрических оболочек из ДПК. В [82] исследуются соединения на металлических накладках. Такие работы в целом иллюстрируют сложность оценки свойств ДПК, которая обусловлена не только многослойностью и ортотропией материала, но и необходимостью учета множества факторов (от геометрических параметров и условий эксплуатации до взаимодействия с другими конструкциями), что требует комбинации лабораторных данных, экспериментов и аналитических моделей для получения надежных результатов.

В исследованиях ДПК применяются различные методы расчета, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. В работе [13] предлагается структурно-феноменологический подход для расчета подобных конструкций, основанный на решении обобщенного закона Гука с учетом жесткостных характеристик слоев, но авторы отмечают его высокую трудоемкость, ведущую к ограничениям в расчетах и потенциальным погрешностям. В исследовании [197] австрийских ученых проводится сравнительный анализ усовершенствованных теорий пластин, таких как теория Рейсснера-Миндлина (FSDT), усовершенствованная теория Мураками с зигзагообразной деформацией (MZZT) и теория Рэна (RPT). Выводы указывают на наибольшую точность RPT, однако ее применение требует наличия большого объема входных данных, что может снижать практическую применимость и, как следствие, точность результатов. Стандартизированные методы, включая балочную теорию Тимошенко, метод-гамма или k-метод, активно используемые в руководствах по проектированию [134, 149, 161, 202], обеспечивают более быстрые расчеты, но снижают точность, которая сильно зависит от качества информации о реальных упругих характеристиках конструкции. В работах [157, 136, 185] анализируются подходы к оценке сдвиговой прочности, демонстрируя, как погрешности возрастают при изменении конфигурации слоев и подчеркивая необходимость развития моделей с учетом сдвиговых деформаций для повышения надежности.

Метод конечных элементов (МКЭ) остается одним из наиболее распространенных инструментов для расчета ДПК благодаря способности учитывать ортотропные свойства, ориентацию и геометрические параметры слоев. В работе [169] авторы разрабатывают собственную конечно-элементную модель для анализа напряженно-деформированного состояния плит ДПК, применяя критерий прочности Цая-Ву для прогнозирования разрушения. В [150] предлагается алгоритм расчета зданий с использованием ДПК на основе МКЭ, интегрирующий данные о многослойной структуре.

Хотя разнообразие подходов к расчету обеспечивает возможность получения верифицируемых результатов, но различия в уровне точности и сложности

построения моделей увеличивают погрешности в зависимости от метода расчёта. Более того, даже наиболее точные подходы зависят от знания реальных упругих характеристик материала, которые варьируются ввиду особенностей внутренней структуры древесины и производства конструкций из нее.

В исследовании [147] приводится анализ серии испытаний образцов от разных производителей, демонстрирующий значительную вариативность свойств плит ДПК из-за отсутствия полной стандартизации технологии производства и методов испытаний [130, 131, 160]. Такая неопределенность приводит к дополнительным неточностям в расчетах и проектах.

Указанные ранее аспекты обуславливают необходимость развития универсальных неразрушающих методов оценки действительной несущей способности и деформативности плит перекрытия из ДПК, применимых к различным геометрическим конфигурациям сечения. Такие методы позволят объективно оценивать напряженно-деформированное состояние конструкции на стадиях строительства, ввода в эксплуатацию и последующей эксплуатации, минимизируя зависимость от лабораторных испытаний или сложных аналитических моделей, требующих большое количество входных данных о конкретном элементе здания.

1.4 Обзор методов неразрушающей оценки несущей способности и деформативности плит из ДПК

Оценка несущей способности и деформативности конструкций в практике неразрушающего контроля реализуется в рамках двух основных подходов – статических и динамических испытаний.

Для достоверной оценки деформативности (прогиба) и несущей способности (напряжений) плитных строительных конструкций до сих пор основным эталоном остаются статические методы, при которых конструкция или её фрагмент подвергается механическому нагружению. Прогиб в данном случае измеряется

контактными (часовые индикаторы, прогибомеры, тензометры) или оптическими (тахеометры, лазерные датчики, камеры) методами.

Измерение прогибов с помощью прогибомеров или индикаторов часового типа оправдано при необходимости высокой точности фиксации деформаций, особенно в лабораторных условиях или при испытаниях ответственных конструкций. Однако монтаж прогибомеров требует дополнительных приспособлений (например, стоек или опорных рам), которые должны быть жёстко закреплены и обеспечивать неподвижность датчиков относительно конструкции. Это создаёт неудобства при длительных испытаниях: крепёжные элементы могут мешать строительным процессам, подвергаться случайным повреждениям или нарушать технологическую последовательность, что ведёт к потере данных [59].

В стремлении повысить информативность и пространственное разрешение измерений при статических испытаниях применяются современные оптические методы, в частности – *метод цифровой корреляции изображений (digital image correlation and tracking, DIC/DITT)* [190]. Сущность метода заключается в количественном сопоставлении цифровых изображений исследуемой поверхности до и после деформирования с использованием алгоритмов корреляционного анализа.

Поверхность образца предварительно покрывается случайным контрастным узором (спекл-паттерном), обеспечивающим достаточную текстуру для надёжной идентификации локальных участков. В процессе нагружения регистрируется последовательность изображений с помощью одной (2D-DIC) или нескольких (3D-DIC, стерео-DIC) калиброванных камер. Затем исходное изображение разбивается на подобласти, и для каждой из них осуществляется поиск соответствующей подобласти на деформированном изображении путём максимизации коэффициента взаимной корреляции. На основе смещений строятся полные поля перемещений и деформаций [55].

Метод DIC обладает рядом преимуществ: он бесконтактный, обеспечивает высокое пространственное разрешение и применим к анизотропным и неоднородным материалам, включая ДПК. В исследованиях многослойных

конструкций он позволяет визуализировать локальные эффекты – сдвиг слоёв, концентрацию деформаций, развитие трещин [174].

Однако важно подчеркнуть, что, несмотря на высокую информативность, DIC не отменяет необходимости приложения внешней нагрузки и, следовательно, сохраняет ключевые ограничения статического подхода: трудоёмкость, риск повреждения конструкции, невозможность применения без подготовки поверхности и в условиях непрерывного строительного процесса. Кроме того, метод даёт только поверхностные данные и не позволяет напрямую оценить внутреннее напряжённо-деформированное состояние или экстраполировать поведение конструкции на другие уровни нагрузки без дополнительных гипотез.

Несмотря на эти ограничения, DIC активно используется в зарубежных исследованиях плит из древесины перекрестноклееной [176, 191, 192 и др.].

Помимо прямого измерения прогибов и оценки напряженного состояния, при статических испытаниях могут применяться методы, регистрирующие сопутствующие физические процессы, сопровождающие деформирование конструкции. К ним относится, в частности, метод акустической эмиссии.

Метод акустической эмиссии (acoustic emission, AE) [173] это пассивный неразрушающий метод контроля, основанный на регистрации упругих волн, генерируемых в материале при локальных изменениях его структуры под действием внешних или внутренних напряжений.

Когда в материале возникают микроскопические процессы – такие как зарождение и рост трещин, пластическая деформация, сдвиг слоёв, разрушение клеевых соединений, фазовые превращения – происходит быстрое высвобождение упругой энергии. Это приводит к излучению транзитных упругих волн (в диапазоне от ~20 кГц до нескольких МГц), которые распространяются по объёму конструкции и могут быть зафиксированы пьезоэлектрическими датчиками, установленными на её поверхности.

В целом, данный метод является релевантным для исследования деревянных конструкций, в частности плит из ДПК, что подтверждается актуальными зарубежными исследованиями с его применением [126, 167, 206]. Однако

ключевым *недостатком* является зависимость от активного изменения напряжённого состояния материала, что на практике требует приложения внешней нагрузки – статической или циклической. Таким образом, несмотря на пассивный характер регистрации сигнала, метод акустической эмиссии не может быть реализован без вмешательства в конструкцию, что исключает его применение для оперативной диагностики в условиях строительной площадки или при невозможности нагружения. Кроме того, метод не обеспечивает прямой количественной оценки ни прогиба, ни распределения напряжений, а интерпретация сигналов остаётся качественной или полуколичественной, требуя калибровки на аналогичных образцах.

Поэтому несмотря на разнообразие существующих подходов – от классических контактных измерений до оптических и физических методов, – все они объединены одной принципиальной проблемой: необходимостью искусственного нагружения для получения диагностической информации. Это делает испытания трудоёмкими, потенциально опасными и малоприменимыми в реальных условиях строительного производства, где требуется быстрая, безопасная и неразрушающая оценка без остановки технологического процесса.

В связи с этим особый интерес представляют динамические методы диагностики, которые позволяют оценить несущую способность и деформативность конструкции без статического нагружения.

К числу таких методов относится *ультразвуковой эхо-метод (ultrasonic pulse-echo method)*, широко применяемый для оценки внутреннего состояния деревянных элементов. Метод основан на анализе отражённых ультразвуковых волн – как продольных, так и поперечных, – которые генерируются преобразователем и распространяются в объёме материала. При встрече с границами раздела сред (например, задней поверхностью образца или внутренними неоднородностями – трещинами, пустотами, зонами гниения) часть энергии волны отражается обратно к приёмнику. Анализ временных и амплитудных характеристик эхо-сигнала позволяет судить о наличии и глубине залегания дефектов [152].

В зависимости от расположения преобразователей различают три основные схемы ультразвукового прозвучивания [137]:

- метод сквозного прозвучивания (Direct Through-Transmission, DTT) – излучатель и приёмник располагаются на противоположных сторонах образца;
- полупрямой метод (Semi-Direct Transmission, STT) – преобразователи размещаются на смежных гранях;
- метод одностороннего доступа (Indirect or Surface Transmission, ITT) – оба датчика устанавливаются на одной поверхности.

В работе [42] показана высокая эффективность зонального ультразвукового сканирования плит в комбинации с методом сопротивления бурению для исследования плиты из ДПК в вопросе обнаружения скрытых дефектов в материале. В [126] авторам удалось объединить ультразвуковое исследование с акустической эмиссией, что позволяет определить локализацию повреждений в перекрестноклееной композитной деревянно-стальной балке.

Несмотря на возможность локализации неоднородностей, ультразвуковой эхо-метод имеет существенные ограничения. Его разрешающая способность ограничена длиной волны: в древесине при рабочих частотах (50–200 кГц) минимально выявляемый дефект составляет ~12 мм. Метод не позволяет надёжно различать один крупный дефект и группу мелких, а также количественно классифицировать повреждения [200].

Хотя ультразвуковой метод и не требует приложения нагрузки, его диагностические возможности ограничены выявлением локальных неоднородностей. Он не обеспечивает прямой оценки изгибной жёсткости, которая определяется не только наличием дефектов, но и интегральными свойствами конструкции – включая эффективное сцепление слоёв, условия опирания и соответствие фактического поведения конструкции расчётной схеме. В перекрестноклееной древесине снижение жёсткости может происходить без образования дискретных дефектов, например, за счёт податливости клеевых швов или отклонений в упругих характеристиках слоёв, что не приводит к заметным

отражениям ультразвуковых волн. Следовательно, отсутствие аномалий в эхо-сигнале не гарантирует сохранения проектной жёсткости, а сам метод не позволяет количественно связать измеренные параметры с прогибом или напряжениями.

Стоит отдельно упомянуть группу акустических методов, основанных на анализе упругих волн – как объёмных, так и поверхностных. К ним относятся метод импакт-эхо, спектральный анализ поверхностных волн (SASW), метод анализа многоканальных поверхностных волн (MASW), а также подходы использующие волны Рэлея и Лэмба [69, 103]. Эти и другие методы получили широкое распространение при диагностике бетонных, железобетонных и каменных конструкций. Их развитие и практическое применение отражено в работах как отечественных исследователей: С.Н. Савина, В.В. Капустиной, Н.А. Крылова, И.В. Ситникова, И.Д. Смирнова, А.В. Улыбина, А.А. Чуркина; и зарубежных специалистов, среди которых О. Abraham, G. Cascante, N. Cavalagli, С. Hsiao, V. Gusella, Y.H. Lee, L. Le Marrec, M.A. Polak, K.I. Song и другие.

Однако в исследованиях деревянных композитов, включая перекрестноклееную древесину, их использование ограничено из-за высокого затухания, сильной анизотропии и сложности интерпретации сигналов в слоистых системах.

Отдельный класс динамических методов неразрушающей оценки несущей способности и деформативности составляют вибрационные методы с использованием экспериментального модального анализа (ЭМА).

Модальный анализ представляет собой определение собственных динамических характеристик упругой системы – собственных частот, форм колебаний и коэффициентов демпфирования. Эти параметры определяются распределением массы и жёсткости, а также граничными условиями, и отражают внутреннюю структуру и механическое состояние конструкции.

Экспериментальный модальный анализ реализуется путём внешнего возбуждения конструкции (ударным импульсом, гармоническим или случайным воздействием) и регистрации отклика с помощью инерционных датчиков (акселерометров) или бесконтактных методов (лазерная доплеровская

виброметрия). На основе временных реализаций отклика строится частотная функция, по экстремумам которой идентифицируются собственные частоты и соответствующие им моды [145].

Связь между собственными частотами и изгибной жёсткостью позволяет использовать модальный анализ в качестве инструмента неразрушающей оценки механического состояния конструкции: снижение частот при неизменной массе указывает на потерю жёсткости, вызванную повреждениями или деградацией материала. Формы колебаний, в свою очередь, позволяют локализовать аномалии. Например, искажение симметрии моды может свидетельствовать о локальном дефекте. Кроме того, экспериментально полученные модальные параметры служат основой для верификации численных моделей и калибровки эффективных упругих характеристик.

Модальный анализ активно применяется при исследовании плит из древесины перекрестноклееной: в работах [138, 188] исследуются динамические характеристики трехслойных плит из ДПК с помощью экспериментального модального анализа; в [178] проведено большое исследование по развитию метода оценки упругих свойств плит из ДПК низкого качества с применением ЭМА; в [207] определялись упругие константы плиты с использованием вибрационного метода.

Помимо рассмотренных выше подходов, в практике неразрушающего контроля деревянных конструкций находят применение и другие методы – сопротивления бурению, оптические, магнитные, радиационные, термографические и др. [132, 170, 175, 179, 182]. Они демонстрируют высокую эффективность при выявлении локальных повреждений (гниль, пустоты, расслоения) и оценке прочностных характеристик материала в области измерения. Однако ни один из них не обеспечивает оценки несущей способности или деформативности конструкции в целом.

В последние годы значительное внимание уделяется развитию динамических методов неразрушающей диагностики деревянных конструкций, включая плиты (в том числе перекрытия) из ДПК [127, 128, 151, 158, 162-164, 183, 184, 196, 211]. Тем

не менее, у них есть ряд недостатков. Часть методов ориентирована на обнаружение дефектов, другая – на определение динамических характеристик (собственных частот, форм колебаний), отклонение которых от расчётных значений лишь косвенно указывает на возможное снижение жёсткости [124]. Кроме того, учитывая проведенный анализ тенденций исследования плит из ДПК, где определена актуальность изучения различных конфигураций сечения, некоторые методы без модификации не могут быть применены для оценки напряженно-деформированного состояния определенных видов сечений (например, ультразвуковые методы дадут некорректную информацию при исследовании сечений с зазорами в слоях). И самое главное, отсутствует универсальная прямая связь между измеряемыми динамическими параметрами и прогибом конструкции, что ограничивает возможность их использования для достоверной оценки деформативности в условиях строительного производства.

В связи с этим, одним из перспективных направлений исследований является развитие интегрального метода неразрушающего вибрационного контроля, оценка деформативности и, опосредованно, несущей способности, которая основана на фундаментальной закономерности, впервые описанной в работе проф. В.И. Коробко [39]. Согласно ей, независимо от вида граничных условий пластины произведение её максимального прогиба W_0 от действия равномерно распределенной нагрузки q на квадрат основной частоты собственных колебаний в ненагруженном состоянии ω с точностью до размерного множителя q/m есть величина постоянная и связана через коэффициент пропорциональности K .

Преимуществами закономерности, по сравнению с описанными ранее методами, являются:

- 1) Прямая взаимосвязь максимального прогиба и основного тона колебаний конструкции через коэффициент пропорциональности K .
- 2) Простота и скорость реализации в условиях строительного производства.

Важной задачей, решаемой с помощью данного подхода, является определение и уточнение корректности примененных расчетных схем

строительных конструкций, а также оценка принимаемой и действительной жесткости конструкций.

На настоящий момент использование закономерности в оценке несущей способности и деформативности строительных конструкций глубоко развито для железобетонных конструкций, благодаря работам отечественных исследователей [1, 30, 40, 43, 74, 122 и др.].

Кроме того, проведены работы по адаптации этого подхода для деревянных конструкций. Так, в [8] определялась жесткость составных деревянных и деревометаллических однопролетных балок с помощью данной закономерности. В исследовании [99] широко изучена взаимосвязь динамических и статических параметров сплошных и составных конструкций из древесины. В [49] подход распространен на изучение систем перекрестных балок из древесины. В результате всех исследований достигнута достаточно высокая точность по определению деформаций для рассматриваемых конструкций.

На настоящий момент отсутствуют работы по развитию данного подхода на конструкции из древесины перекрестноклееной. Основным отличием объекта исследования от рассмотренных ранее являются многослойность, ортотропия и разнонаправленность слоев, а также ортотропия плиты в целом. Кроме того, в приведенных выше исследованиях расчетная схема была балочной, которая не способна полностью учесть поведение плит перекрытия из древесины перекрестноклееной. В [51] автором изучалось применение данного метода к составным пластинам различных очертаний и различных граничных условий. Однако в работе рассматривалась изотропная пластина, поэтому распространить полученные результаты на ортотропные конструкции нельзя.

Исходя из вышесказанного, необходимо установить данную закономерность для ортотропных плит перекрытия из древесины перекрестноклееной сплошного сечения и определить её устойчивость к изменению геометрических параметров слоев.

1.5 Выводы по первой главе

По результатам проведённого анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Древесина является актуальным и перспективным строительным материалом в условиях глобального перехода к устойчивому и низкоуглеродному строительству. Её способность аккумулировать углерод, возобновляемость, высокие физико-механические свойства и технологичность обуславливают рост интереса к её применению в строительстве, особенно в виде инженерных древесных материалов. Среди них особое место занимает древесина перекрестноклееная (ДПК), позволяющая создавать несущие конструкции зданий повышенной этажности.

2. Плиты перекрытия из ДПК являются одним из наиболее ответственных элементов здания. Их механическое поведение определяется не только общими геометрическими характеристиками, но и отдельными свойствами слоёв: толщиной продольных и поперечных слоёв, наличием воздушных зазоров и другими параметрами, влияющими на распределение напряжений, а также на изгибную жёсткость.

3. В современных научных работах активно исследуются новые типы конфигураций сечения плит из ДПК, направленные на снижение материалоемкости и расширение функциональных возможностей материала. Однако достоверная оценка несущей способности и деформативности таких конструкций с помощью численных или аналитических моделей возможна лишь при наличии полной и точной информации об упругих характеристиках каждого слоя, качестве склеивания и условиях опирания. На практике в условиях строительного производства такие данные недоступны, что делает прямой расчёт неприменимым для оперативной оценки напряженно-деформированного состояния конструкции.

4. Существующие методы оценки действительной несущей способности и деформативности плит перекрытия из ДПК в подавляющем большинстве случаев

требуют статического нагружения, что делает их трудоёмкими и малоприменимыми в натуральных условиях. В то же время динамические методы, такие как ультразвуковая диагностика или акустическая эмиссия, ориентированы на выявление локальных дефектов. Другие, например, модальный анализ, позволяют оценить жёсткость конструкции. Однако ни один из существующих подходов не обеспечивает прямой количественной связи между динамическими параметрами и прогибом, а, соответственно, и напряжениями.

5. В этих условиях научную и практическую ценность приобретает развитие динамического неразрушающего метода, основанного фундаментальной закономерности, связывающей максимальный статический прогиб конструкции с квадратом частоты основного тона свободных колебаний. Однако применимость этой зависимости к многослойным ортотропным плитам перекрытия из ДПК с различными конфигурациями сечения до настоящего времени не изучена.

Исходя из вышесказанного, **целью** данной научной работы является развитие вибрационного метода оценки несущей способности и деформативности плит перекрытия из древесины перекрестноклееной путем установления закономерности, связывающей частоту основного тона собственных колебаний и максимальный прогиб, полученной с учетом ортотропии упругих свойств древесины.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- проанализировать состояние вопроса исследований конструкций из ДПК и методов оценки несущей способности и деформативности;
- теоретически определить взаимосвязь максимального прогиба и квадрата частоты основного тона собственных колебаний ортотропных пластин;
- установить влияние геометрических параметров слоев и условий опирания на несущую способность и деформативность плит перекрытия из ДПК методом конечных элементов;
- численно исследовать взаимосвязь максимального прогиба и частоты основного тона собственных колебаний для плит перекрытия из ДПК с

варьируемыми геометрическими параметрами слоев при различных условиях опирания;

– экспериментально определить нормальные напряжения, максимальный прогиб и частоту основного тона собственных колебаний в образцах для верификации численных исследований;

– разработать метод оценки несущей способности и деформативности плит перекрытия из ДПК.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗ ДПК

2.1 Аналитическое описание функциональной взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний

2.1.1 Основные зависимости теории пластин

Для исследования взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний в плитах перекрытия из древесины перекрестноклееной, представляющей собой ортотропную многослойную конструкцию, необходимо рассмотреть теоретические выводы, полученные профессором Коробко В.И. для изотропных пластин. Использование доказанного теоретического фундамента позволяет транслировать и усовершенствовать полученные взаимосвязи на исследование рассматриваемого объекта.

Далее приведены только общие этапы вывода закономерности для изотропных пластин ввиду громоздкости математических преобразований и отсутствия в них авторских научных результатов.

Задачи поперечного изгиба и свободных колебаний изотропных пластин описываются дифференциальными уравнениями эллиптического типа четвертого порядка, представлены следующими выражениями [41]:

$$D \left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) - q(x, y) = 0, \quad (2.1)$$

$$D \left(\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} \right) + m \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0, \quad (2.2)$$

или

$$\begin{cases} D\Delta^2\Delta^2W - q(x, y) = 0 \\ D\Delta^2\Delta^2W + m\frac{\partial^2W}{\partial t^2} = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

где $W = W(x, y)$ – функция прогибов пластинки при поперечном изгибе;
 $W = W(x, y, t)$ – функция прогибов свободно колеблющейся пластинки;
 $D = Eh^3/(12(1 - \nu^2))$ – цилиндрическая жесткость пластинки; $q(x, y)$ – закон изменения поперечной нагрузки; m – масса единицы площади пластинки; E, ν – модуль упругости материала и коэффициент Пуассона; $\Delta^2\Delta^2$ – бигармонический оператор.

Если колебания совершаются по гармоническому закону, то:

$$W = W(x, y) \cos(\omega t), \quad (2.4)$$

где ω – круговая (угловая) частота колебаний.

После подстановки функции прогибов (2.4) во второе уравнение из системы (2.3) и проведения необходимых преобразований получим:

$$D\Delta^2\Delta^2W - m\omega^2W = 0 \text{ или } \Delta^2\Delta^2W - \beta^2W = 0, \quad (2.5)$$

где $\beta^2 = m\omega^2/D$ – собственное значение дифференциального уравнения (2.5).

В этом случае, задача состоит в том, чтобы определить основной тон частоты колебаний пластины, что требует нахождения собственного значения дифференциального уравнения (2.5). Решение данных вопросов в рамках теории пластин требует одновременного выполнения двух ключевых условий:

- 1) определение функции перемещений, которая удовлетворяет дифференциальному уравнению;
- 2) эта функция должна удовлетворять граничным условиям.

Подобрать такую функцию перемещений, которая будет соответствовать этим требованиям, значительно сложно. Следовательно, точное аналитическое решение возможно найти только для ограниченного подмножества областей с определенными граничными условиями, например, шарнирного опирания пластины. Для решения задач в остальных, более общих случаях, традиционно применяются приближённые методы. Среди приближенных методов

исследования, используемых в теории пластинок, наиболее широкое распространение получили вариационные методы. Их применение базируется на энергетических соотношениях технической теории пластинок, в частности, на выражении для потенциальной энергии системы [41]:

$$\begin{aligned} \mathfrak{E} = \frac{D}{2} \iint_A \left\{ (\Delta^2 W)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dA \\ - \iint_A q(x, y) W dA = 0, \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{E} = \frac{D}{2} \iint_A \left\{ (\Delta^2 W)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dA \\ - \omega^2 \iint_A m W^2 dA = 0, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где $\Delta^2 W = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}$ – оператор Лапласа.

Для пластин с жёстко закреплённым краем и пластин с многоугольным шарнирно закреплённым краем интеграл от выражения в квадратных скобках равен нулю.

$$\begin{cases} \mathfrak{E} = \frac{D}{2} \iint_A (\Delta^2 W)^2 dA - \iint_A q(x, y) W dA = 0; \\ \mathfrak{E} = \frac{D}{2} \iint_A (\Delta^2 W)^2 dA - \omega^2 \iint_A m W^2 dA = 0. \end{cases} \quad (2.8)$$

Потенциальная энергия системы имеет свойство, которое можно сформулировать так: из всего множества возможных перемещений, соответствующих наложенным на пластинку связям, именно та поверхность прогибов, которая существует в реальности, имеет минимум потенциальной энергии. Это фундаментальное свойство потенциальной энергии и положено в основу вариационных методов.

Вариационные методы заключаются в том, чтобы заменить функцию, которая удовлетворяет решению дифференциальных уравнений (2.5) и граничным условиям, на приближённую функцию, зависящую от нескольких параметров. Выбор функции заключается в том, чтобы она удовлетворяла (полностью или

частично) граничным условиям. При этом она может не удовлетворять решению дифференциальных уравнений (2.5), но должна быть приблизительно схожей с действительной функцией, чтобы полученное решение отличалось от действительных значений минимально.

Подставив эту функцию в функционалы (2.8) и минимизировав её по каждому из неизвестных параметров, получим задачу, состоящую из системы линейных алгебраических уравнений при их равенстве нулю. Решая определитель полученной системы, находим значения собственных частот колебаний.

2.1.2 Редукция рассматриваемой задачи к изопериметрическому формату

При решении задач в «энергетической» постановке чаще всего прибегают к модифицированному методу Релея-Ритца. Это предполагает выбор ограниченного количества уравнений, линейно зависящих от заданного числа искомых параметров.

Запишем функцию перемещений в виде:

$$W(x, y) = W_0 f(x, y). \quad (2.9)$$

Подставляя её в уравнение (2.8), получим:

$$\mathcal{E} = W_0^2 \frac{D}{2} \iint_A (\Delta^2 f)^2 dA - q W_0 \iint_A f dA, \quad (2.10)$$

$$\mathcal{E} = (W_0)^2 \left[\frac{D}{2} \iint_A (\Delta^2 f)^2 dA - m \omega^2 \iint_A f dA \right]. \quad (2.11)$$

Прибегнем к вариационному методу Ритца и определим минимум указанных функционалов, для чего вычислим производные потенциальной энергии по параметру W_0 и приравняем их к нулю.

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial W_0} = W_0 D \iint_A (\Delta^2 f)^2 dA - \iint_A q(x, y) f dA = 0, \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial W_0} = \frac{D}{2} \iint_A (\Delta^2 f)^2 dA - m \omega^2 \iint_A f dA = 0. \quad (2.13)$$

Решая полученные уравнения относительно W_0 и ω^2 , найдем:

$$\begin{cases} W_0 = \frac{1}{D} \iint_A q(x, y) f / \iint_A (\Delta^2 f)^2 dA; \\ \omega^2 = \frac{D}{2m} \times \iint_A (\Delta^2 f)^2 dA / \iint_A f^2 dA. \end{cases} \quad (2.14)$$

Представим функцию перемещений в виде единичной функции $f(x, y)$:

$$f(x, y) = g[t/r(\varphi)] = g(\rho), \quad (2.15)$$

где ρ – полярная координата.

Подставим в уравнение (2.14) единичную функцию, представленную в виде (2.15) и после преобразований получим два соотношения:

$$W_0 = \frac{4q A^2}{D K_f^2} \frac{\int_0^1 g(\rho) \rho d\rho}{\Phi_g} = K_W \frac{q A^2}{D K_f^2}, \quad (2.16)$$

$$\omega^2 = \frac{D K_f^2}{8m A^2} \frac{\Phi_g}{\int_0^1 g^2(\rho) \rho d\rho} = K_\omega^2 \frac{D K_f^2}{m A^2}, \quad (2.17)$$

где $\Phi_g = \int_0^1 (g''^2 \rho + 2g'' g' + g'^2 \rho^{-1})$.

$$K_W = \frac{4 \int_0^1 g(\rho) \rho d\rho}{\Phi_g}; \quad (2.18)$$

$$K_\omega^2 = \frac{\Phi_g}{\left(8 \int_0^1 g^2(\rho) \rho d\rho\right)}. \quad (2.19)$$

Следует обратить внимание на то, что оба выражения соответствуют закону изопериметрии, поскольку они включают в себя параметры, связанные с формой и площадью, которые изменяются при трансформации пластинок.

Если в процессе таких изменений площадь пластинок остаётся постоянной ($A = const$), то единственным параметром, который может изменяться, становится форма.

Коэффициент формы K_f представляет собой количественную характеристику степени симметричности двумерных объектов, равную для общего случая:

$$K_f = \oint_L \frac{ds}{h}, \quad (2.20)$$

где ds – линейный элемент контура произвольной области, h – перпендикуляр из точки «а», проведенный на касательную к переменной точке области (рисунок 2.1).

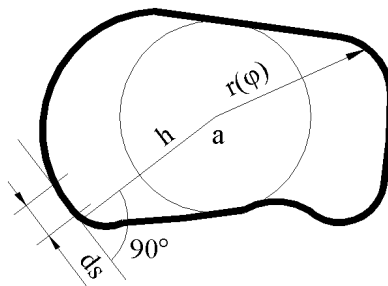


Рисунок 2.1 – Произвольная выпуклая область D

В работе [35] подробно исследованы свойства и закономерности для различных геометрических фигур.

Кроме того, если рассматривать определённый тип областей (например, прямоугольники с фиксированным соотношением сторон), то K_f (коэффициент формы) также остаётся неизменным.

Работы [35, 36] показывают, что коэффициенты K_w и K_ω представляют собой функции, которые, помимо прочего, находятся в зависимости от коэффициента формы пластины.


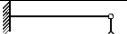
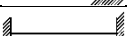
При этом, если рассматривать пластины одной площади и с равным соотношением сторон, то соотношения (2.16) и (2.17) принимают более простой вид. Перемножение приведенных выражений приводит к следующей зависимости [39]:

$$W_0 \omega^2 = K_w K_\omega^2 \frac{q}{m} = K \frac{q}{m}. \quad (2.21)$$

В данном случае K – это коэффициент пропорциональности, который, как и коэффициенты K_w и K_ω , зависит от формы области. Доказать высказанное предположение аналитически пока не удалось, а подтвердить его на основе численного эксперимента можно.

Значения коэффициента пропорциональности K постоянны для различных условий опирания [41] и приведены в таблице 2.1. Важно отметить, что данные значения получены для двустороннего опирания конструкции, рассматриваемого в данном исследовании. При исследовании большего количества опорных сторон значение K будет количественно другим, но постоянным при заданных условиях.

Таблица 2.1 – Значение коэффициента K для различных условий двустороннего опирания

Схема опирания	Основная частота ω	Максимальный прогиб W_0	Коэффициент в произведении $W_0\omega^2 = Kq/m$, K
	π^2	5/384	1,26835
	$(1,25\pi)^2$	1/185	1,28549
	$(1,5\pi)^2$	1/384	1,28420

Результаты работ [49, 51, 99] показывают, что для всех произвольных форм и граничных условий пластинок справедливы с высокой точностью двусторонние неравенства:

$$\frac{4}{\pi} \frac{q}{m} \leq W_0 \omega^2 \leq \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 \frac{q}{m}. \quad (2.22)$$

Таким образом, для изотропной пластины была аналитически установлена фундаментальная зависимость, согласно которой произведение максимального прогиба на квадрат частоты собственных колебаний является постоянной величиной, выраженной через коэффициент пропорциональности K .

2.1.3 Определение зависимости для ортотропных пластин и объекта исследования

В процессе исследования изгибной деформации ортотропных пластин принимается допущение о применимости классических гипотез теории тонких пластин (теории Кирхгофа-Лява). Предполагается, что прямолинейный элемент,

первоначально нормальный к срединной поверхности пластинки, остаётся прямолинейным и нормальным после деформирования. Данное допущение обосновано при анализе тонких плит (см. подглава 1.2), где вклад сдвиговых деформаций в общую деформативность конструкции незначителен. Таким образом, использование данного математического аппарата обеспечивает высокую точность расчетов для плит перекрытия из древесины перекрестноклееной.

Для ортотропной пластинки основное дифференциальное уравнение поперечного изгиба выглядит следующим образом:

$$D_x \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} - q(x, y) = 0, \quad (2.23)$$

где $H = D_1 + 2D_{xy}$, $D_1 = D_x \nu_{yx} = D_y \nu_{xy}$.

Жесткости в данном уравнении в случае однослойных пластин определяются по уравнениям:

$$D_x = \frac{E_x h^3}{12(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})}, D_y = \frac{E_y h^3}{12(1 - \nu_{yx} \nu_{xy})}, D_{xy} = \frac{G h^3}{12}, \quad (2.24)$$

где E_x, E_y – модули упругости, G – модуль сдвига, $\nu_{yx} \nu_{xy}$ – коэффициенты Пуассона.

Для многослойных конструкций справедливо приведение к однослойной с помощью задания эффективных жесткостей [47].

Уравнение свободных колебаний ортотропной пластины записывается в виде:

$$D_x \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} + m \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0, \quad (2.25)$$

где m – масса пластины.

Запишем уравнения полной потенциальной энергии системы для ортотропной пластины для изгиба и свободных колебаний:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{стат}} = \frac{1}{2} \iint_A \left[D_x \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)^2 + D_y \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)^2 + 2D_1 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right. \\ \left. + 4D_{xy} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dA - \iint_A q(x, y) W dA, \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{дин}} = \frac{1}{2} \iint_A \left[D_x \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)^2 + D_y \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)^2 + 2D_1 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right. \\ \left. + 4D_{xy} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dA - \frac{\omega^2}{2} \iint_A m W^2 dA, \end{aligned} \quad (2.27)$$

где ω – частота собственных колебаний пластины.

Левая часть (2.26) и (2.27) представляет собой уравнение потенциальной энергии изгиба, которое запишем в виде:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \iint_A \left[D_x \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)^2 + D_y \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)^2 + 2D_1 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + 4D_{xy} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dA \\ = \frac{1}{2} \iint_A \psi(W) dA. \end{aligned} \quad (2.28)$$

В расчете не учитывается вязкоупругость древесины. Для рассматриваемых размеров плиты и несущественности сдвига, разница между квазистатическим и динамическим модулями упругости не превышает 6 % [176, 177].

Тогда принимая, что статический и динамический модули упругости рассматриваемой конструкции приблизительно равны ($E_{\text{стат}} \approx E_{\text{дин}}$), и, подставив (2.28) в (2.26) и (2.27), можно записать систему вида:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{\text{стат}} = \frac{1}{2} \iint_A \psi(W) dA - \iint_A q(x, y) W dA, \\ \mathcal{E}_{\text{дин}} = \frac{1}{2} \iint_A \psi(W) dA - \frac{\omega^2}{2} \iint_A m W^2 dA. \end{cases} \quad (2.29)$$

По аналогии с (2.9) применим метод Релея-Ритца и запишем функцию прогиба в виде:

$$W(x, y) = W_0 f(x, y), \quad (2.30)$$

где W_0 – максимальный прогиб конструкции.

Тогда система (2.29) принимает вид:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{\text{стат}} = \frac{W_0^2}{2} \iint_A \psi(f) dA - W_0 \iint_A q(x, y) f dA, \\ \mathcal{E}_{\text{дин}} = \frac{W_0^2}{2} \iint_A \psi(f) dA - \frac{W_0^2 \omega^2}{2} \iint_A m f^2 dA. \end{cases} \quad (2.31)$$

Применим вариационный метод Ритца и найдем минимум функционалов:

$$\frac{\partial \mathcal{E}_{\text{стат}}}{\partial W_0} = W_0 \iint_A \psi(f) dA - \iint_A q(x, y) f dA = 0, \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}_{\text{дин}}}{\partial W_0} = W_0 \iint_A \psi(f) dA - W_0 \omega^2 \iint_A m f^2 dA = 0. \quad (2.33)$$

Из (2.32) и (2.33) найдем значения прогиба и частоты собственных колебаний:

$$W_0 = \frac{\iint_A q(x, y) f dA}{\iint_A \psi(f) dA}, \quad (2.34)$$

$$\omega^2 = \frac{\iint_A \psi(f) dA}{\iint_A m f^2 dA}. \quad (2.35)$$

Перемножив (2.34) и (2.35), получим:

$$W_0 \omega^2 = \frac{\iint_A q(x, y) f dA}{\iint_A \psi(f) dA} * \frac{\iint_A \psi(f) dA}{\iint_A m f^2 dA}, \quad (2.36)$$

или

$$W_0 \omega^2 = \frac{\iint_A q(x, y) f dA}{\iint_A m f^2 dA}. \quad (2.37)$$

Учитывая, что прогиб задан равномерно распределенной нагрузкой, получаем:

$$W_0 \omega^2 = \frac{q}{m} \frac{\iint_A f dA}{\iint_A f^2 dA}. \quad (2.38)$$

На основании анализа уравнения (2.38) установлено подобие полученного выражения с (2.21), что теоретически подтверждает, что для ортотропных пластин справедлива закономерность о взаимосвязи максимального прогиба и квадрата

основного тона частоты собственных колебаний, выраженной через постоянный для заданных граничных условий коэффициент пропорциональности K .

2.1.4 Аналитическое определение коэффициента K для различных условий двустороннего опирания

Рассматривая плиты перекрытия с двусторонним опиранием, зависимость (2.38) примет вид:

$$W_0 \omega^2 = \frac{q \int f dx}{m \int f^2 dx}, \quad (2.39)$$

$$\text{где } \frac{\int f dx}{\int f^2 dx} = K.$$

Введем безразмерную координату $\theta = x/L$, где $\theta \in [0; 1]$, таким образом перейдем к функциям вида $f(\theta)$.

Тогда, подставляя функцию в (2.30), получим:

$$W(\theta) = W_0 f(\theta). \quad (2.40)$$

Следовательно,

$$W(\theta) = W_0 \text{ при } \max_{\theta \in [0;1]} (f(\theta)) = 1. \quad (2.41)$$

Для выполнения условия (2.41), введем нормировочный коэффициент η , определяемый как:

$$\eta = f(\theta_{ext}), \quad (2.42)$$

где θ_{ext} – безразмерная координата точки экстремума функции (максимума прогиба).

Получим нормированную функцию прогиба:

$$f_{norm}(\theta) = \frac{f(\theta)}{\eta}. \quad (2.43)$$

Тогда, учитывая все вышесказанное, получим уравнение для определения коэффициента пропорциональности K :

$$K = \frac{\int_0^L f(x)dx}{\int_0^L f(x)^2 dx} = \frac{\int_0^1 f_{norm}(\theta)d\theta}{\int_0^1 f_{norm}(\theta)^2 d\theta} = \frac{\int_0^1 \frac{f(\theta)}{\eta} d\theta}{\int_0^1 \left(\frac{f(\theta)}{\eta}\right)^2 d\theta} = \eta \frac{\int_0^1 f(\theta)d\theta}{\int_0^1 f(\theta)^2 d\theta} \quad (2.44)$$

Далее проведем подбор функций прогиба $f(\theta)$ для различных видов двустороннего опирания.

А) Шарнирное опирание с двух сторон (Ш+Ш).

При шарнирном опирании на краях $\theta = 0$ и $\theta = 1$ должны выполняться условия:

$$f(0) = 0, \quad f''(0) = 0; \text{ и } f(1) = 0, \quad f''(1) = 0. \quad (2.45)$$

Примем функцию вида:

$$f(\theta) = \sin(\pi\theta) \quad (2.46)$$

Проверим, удовлетворяет ли функция (2.46) условиям (2.45):

$$\begin{aligned} f(0) &= \sin(0) = 0, \\ f(1) &= \sin(\pi) = 0, \\ f''(0) &= \pi^2 \sin(0) = 0, \\ f''(1) &= -\pi^2 \sin(\pi) = 0. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Условия выполнены, следовательно, найдем интегралы функции:

$$\begin{aligned} \int f(\theta)d\theta &= \int_0^1 \sin(\pi\theta) d\theta = \left[-\frac{1}{\pi} \cos(\pi\theta) \right]_0^1 = -\frac{1}{\pi} (\cos(\pi) - \cos(0)) \\ &= -\frac{1}{\pi} (-1 - 1) = \frac{2}{\pi}. \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} \int f^2(\theta)d\theta &= \int_0^1 \sin^2(\pi\theta) d\theta \\ &= \int_0^1 \frac{1 - \cos(2\pi\theta)}{2} d\theta = \left[\frac{\theta}{2} - \frac{1}{4\pi} \sin(2\pi\theta) \right]_0^1 = \left(\frac{1}{2} - 0 \right) - 0 \\ &= \frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (2.49)$$

Известно, что при шарнирном опирании максимум функции прогиба находится в центре конструкции (при $\theta = 0,5$), тогда по (2.42) получим:

$$\eta = \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1. \quad (2.50)$$

Используя уравнение (2.44) для шарнирного опирания с двух сторон (Ш+Ш), получим:

$$K = \eta \frac{\int_0^1 f(\theta) d\theta}{\int_0^1 f(\theta)^2 d\theta} = 1 * \frac{\frac{2}{\pi}}{\frac{1}{2}} = \frac{4}{\pi} \approx 1,273. \quad (2.51)$$

Б) Жесткое защемление с двух сторон (Ж+Ж).

При жестком защемлении на краях $\theta = 0$ и $\theta = 1$ должны выполняться условия:

$$f(0) = 0, \quad f'(0) = 0; \text{ и } f(1) = 0, \quad f'(1) = 0. \quad (2.52)$$

Запишем уравнение упругой линии:

$$EI \frac{d^4 f(\theta)}{d\theta^4} = q(\theta). \quad (2.53)$$

Учитывая, что рассматривается равномерно распределенная нагрузка, можно записать уравнение (2.53) в следующем виде:

$$\frac{d^4 f(\theta)}{d\theta^4} = C, \quad (2.54)$$

где $C = \frac{q(\theta)}{EI}$ – константа.

Последовательно интегрируя уравнение (2.54), получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} f'''(\theta) = C\theta + C_1 \\ f''(\theta) = \frac{C\theta^2}{2} + C_1\theta + C_2 \\ f'(\theta) = \frac{C\theta^3}{6} + \frac{C_1\theta^2}{2} + C_2\theta + C_3 \\ f(\theta) = \frac{C\theta^4}{24} + \frac{C_1\theta^3}{6} + \frac{C_2\theta^2}{2} + C_3\theta + C_4 \end{array} \right. \quad (2.55)$$

Искомая функция должна удовлетворять условиям (2.52), тогда:

$$\begin{cases} f(0) = 0, f(0) = C_4 \rightarrow C_4 = 0 \\ f'(0) = 0, f'(0) = C_3 \rightarrow C_3 = 0 \\ f(1) = 0, f(1) = \frac{C}{24} + \frac{C_1}{6} + \frac{C_2}{2} + C_3 + C_4 \\ f'(1) = 0, f'(1) = \frac{C}{6} + \frac{C_1}{2} + C_2 + C_3 \end{cases} \quad (2.56)$$

Следовательно,

$$\begin{cases} \frac{C}{24} + \frac{C_1}{6} + \frac{C_2}{2} = 0 \\ \frac{C}{6} + \frac{C_1}{2} = 0 \end{cases} \quad (2.57)$$

Решая систему (2.57), получим:

$$C_1 = -\frac{C}{2}, C_2 = \frac{C}{12} \quad (2.58)$$

Подставляя (2.58) в 4 уравнение системы (2.55), определим искомую функцию прогиба:

$$f(\theta) = \frac{C\theta^4}{24} - \frac{C\theta^3}{12} + \frac{C\theta^2}{24} = \frac{C}{24}(\theta^4 - 2\theta^3 + \theta^2). \quad (2.59)$$

Найдем интегралы уравнения (2.59):

$$\begin{aligned} \int f(\theta)d\theta &= \int_0^1 \frac{C}{24}(\theta^4 - 2\theta^3 + \theta^2) d\theta = \frac{C}{24} \int_0^1 (\theta^4 - 2\theta^3 + \theta^2) d\theta \\ &= \frac{C}{24} \left[\frac{\theta^5}{5} - \frac{2\theta^4}{4} + \frac{\theta^3}{3} \right]_0^1 = \frac{C}{24} \left(\frac{1}{5} - \frac{2}{4} + \frac{1}{3} \right) = \frac{C}{24} \frac{1}{30} = \frac{C}{720} \end{aligned} \quad (2.60)$$

$$\begin{aligned} \int f^2(\theta)d\theta &= \int_0^1 \left[\frac{C}{24}(\theta^4 - 2\theta^3 + \theta^2) \right]^2 d\theta \\ &= \left(\frac{C}{24} \right)^2 \int_0^1 (\theta^4 - 2\theta^3 + \theta^2)^2 d\theta \\ &= \left(\frac{C}{24} \right)^2 \int_0^1 (\theta^8 - 4\theta^7 + 6\theta^6 - 4\theta^5 + \theta^4) d\theta \\ &= \left(\frac{C}{24} \right)^2 \left[\frac{\theta^9}{9} - \frac{4\theta^8}{8} + \frac{6\theta^7}{7} - \frac{4\theta^6}{6} + \frac{\theta^5}{5} \right]_0^1 = \left(\frac{C}{24} \right)^2 \frac{1}{630} \\ &= \frac{C^2}{362880} \end{aligned} \quad (2.61)$$

При жестком защемлении с двух сторон максимум функции прогиба находится в центре конструкции (при $\theta = 0,5$), тогда по (2.42) получим:

$$\eta = f(0,5) = \frac{C}{24} (0,5^4 - 2 * 0,5^3 + 0,5^2) = \frac{C}{24} * 0,0625 = \frac{C}{24} * \frac{1}{16} = \frac{C}{384} \quad (2.62)$$

Используя уравнение (2.44) для жесткого защемления с двух сторон (Ж+Ж), получим:

$$K = \eta \frac{\int_0^1 f(\theta) d\theta}{\int_0^1 f(\theta)^2 d\theta} = \frac{C}{384} * \frac{\frac{C}{720}}{\frac{C^2}{362880}} = 1,3125. \quad (2.63)$$

В) Жесткое защемление с одной стороны и шарнирное опирание – с другой (Ш+Ж).

При комбинированном опирании на жестко защемленном крае $\theta = 0$ должно выполняться:

$$f(0) = 0, \quad f'(0) = 0 \quad (2.64)$$

На шарнирном крае $\theta = 1$ должно выполняться:

$$f(1) = 0, \quad f''(1) = 0 \quad (2.65)$$

Воспользуемся уравнением из системы (2.55) и получим:

$$\begin{cases} f(0) = 0, f(0) = C_4 \rightarrow C_4 = 0 \\ f'(0) = 0, f'(0) = C_3 \rightarrow C_3 = 0 \\ f(1) = 0, f(1) = \frac{C}{24} + \frac{C_1}{6} + \frac{C_2}{2} + C_3 + C_4 \\ f'(1) = 0, f''(1) = \frac{C}{2} + C_1 + C_2 \end{cases} \quad (2.66)$$

Следовательно,

$$\begin{cases} \frac{C}{24} + \frac{C_1}{6} + \frac{C_2}{2} = 0 \\ \frac{C}{2} + C_1 + C_2 = 0 \end{cases} \quad (2.67)$$

Решая систему (2.67), получим:

$$C_1 = -\frac{5C}{8}, C_2 = \frac{C}{8} \quad (2.68)$$

Определим искомую функцию прогиба:

$$f(\theta) = \frac{C\theta^4}{24} - \frac{5C\theta^3}{48} + \frac{C\theta^2}{16} = \frac{C}{48}(2\theta^4 - 5\theta^3 + 3\theta^2). \quad (2.69)$$

Максимум функции находится в точке, где угол наклона к касательной равен 0, то есть равна нулю первая производная $f'(\theta) = 0$, тогда:

$$f'(\theta) = \frac{C}{48}(8\theta^3 - 15\theta^2 + 6\theta) = 0. \quad (2.70)$$

Решая уравнение (2.70), определим значение координаты максимума функции прогиба $\theta \approx 0,5785$.

Значение нормировочного коэффициента η равно:

$$\begin{aligned} \eta = f(0,5785) &= \frac{C}{48}(2 * 0,5785^4 - 5 * 0,5785^3 + 3 * 0,5785^2) \\ &= \frac{C}{48} * \frac{26}{100} = \frac{13C}{2400} \end{aligned} \quad (2.71)$$

Используя уравнение (2.44) для жесткого защемления с одной стороны и шарнирного опирания – с другой (Ш+Ж) получим:

$$K = \eta \frac{\int_0^1 f(\theta) d\theta}{\int_0^1 f(\theta)^2 d\theta} = \frac{13C}{2400} * \frac{\frac{C}{320}}{\frac{19C^2}{1451520}} \approx 1,291. \quad (2.72)$$

В таблице 2.2 приведено сравнение полученных значений коэффициента пропорциональности K с полученными Коробко В.И. для изотропных пластин.

Таблица 2.2 – Значения коэффициента пропорциональности K

Схема опирания	Полученное K	Теоретическое K	Отклонение
Ш+Ш	1,273	1,26835	0,38%
Ш+Ж	1,291	1,28549	0,43%
Ж+Ж	1,3125	1,28420	2,20%

Таким образом, ввиду высокой сходимости, в целях обеспечения единого расчётного подхода в дальнейших исследованиях используются теоретические значения коэффициента K .

2.2 Допущения и расчётная схема объекта численных исследований

Для установления зависимостей влияния различных конфигураций сечения на несущую способность и деформативность плит перекрытия из ДПК проведены численные исследования в вычислительном комплексе SCAD++ версии 23.1.1.1 [33].

Во всех исследованиях при статическом нагружении применялись расчетные модели трех- и пятислойных плит. Для трехслойной плиты волокна древесины в наружных слоях направлены вдоль пролёта, волокна среднего слоя – поперёк пролёта. Для пятислойной плиты волокна нечётных слоёв направлены вдоль пролёта, чётных – поперёк пролёта. Габаритные размеры в плоскости во всех исследованиях были неизменны и составляли 5890×1140 мм (Д \times Ш). Ширина ламелей в слоях одинакова и составляет 190 мм. Толщина слоев варьируется в зависимости от задач исследования (для сплошного сечения составляет 42 мм для каждого слоя) (рисунки 2.2-2.3).

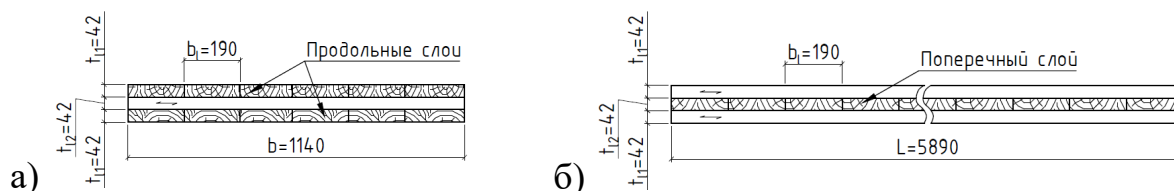


Рисунок 2.2 – Трехслойная плита перекрытия из ДПК
(а – поперечное сечение; б – продольное сечение)

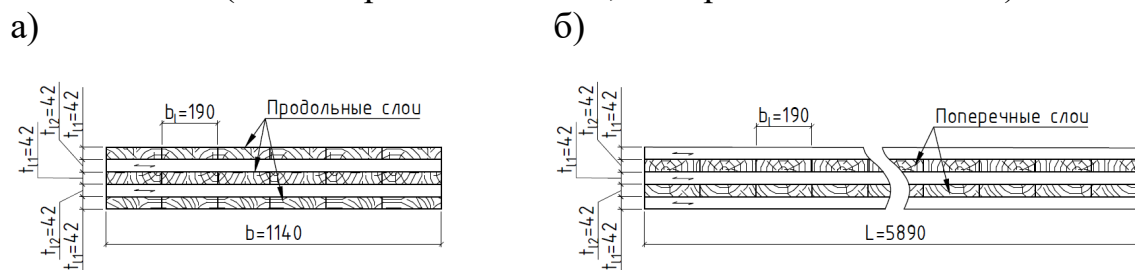


Рисунок 2.3 – Пятислойная плита перекрытия из ДПК
(а – поперечное сечение; б – продольное сечение)

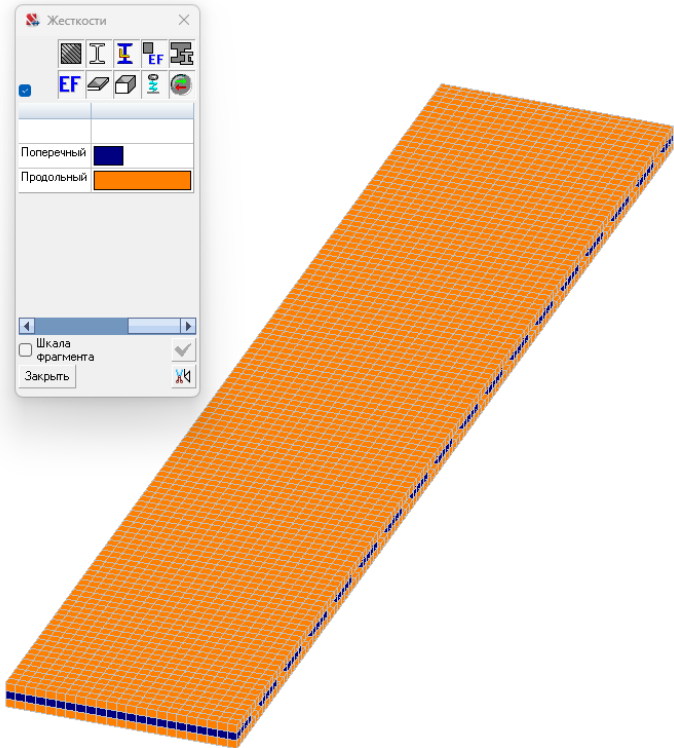
Рассмотрены следующие виды геометрических конфигураций:

- 1) Изменяемая толщина продольных слоев.

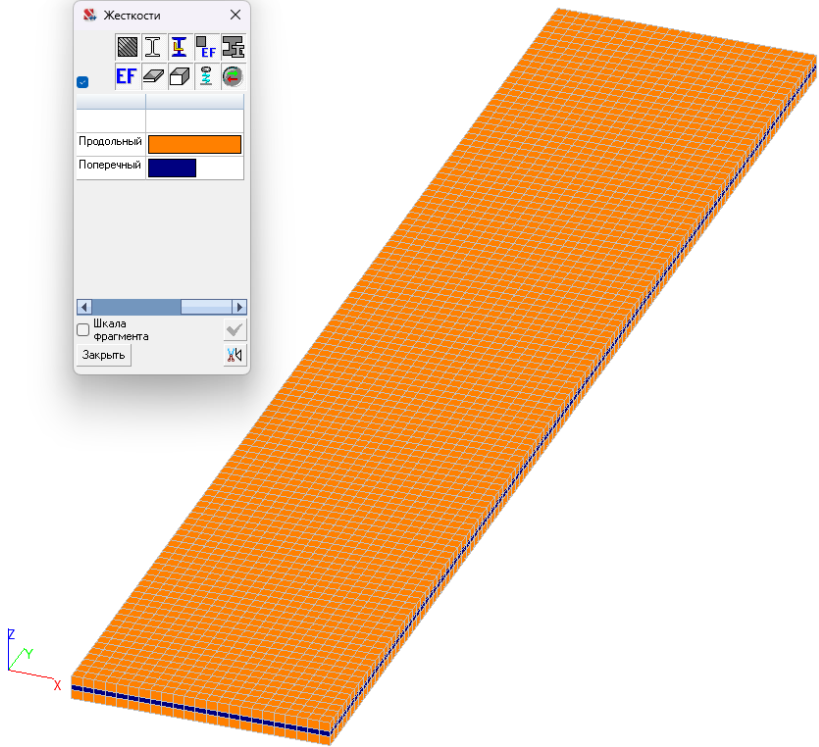
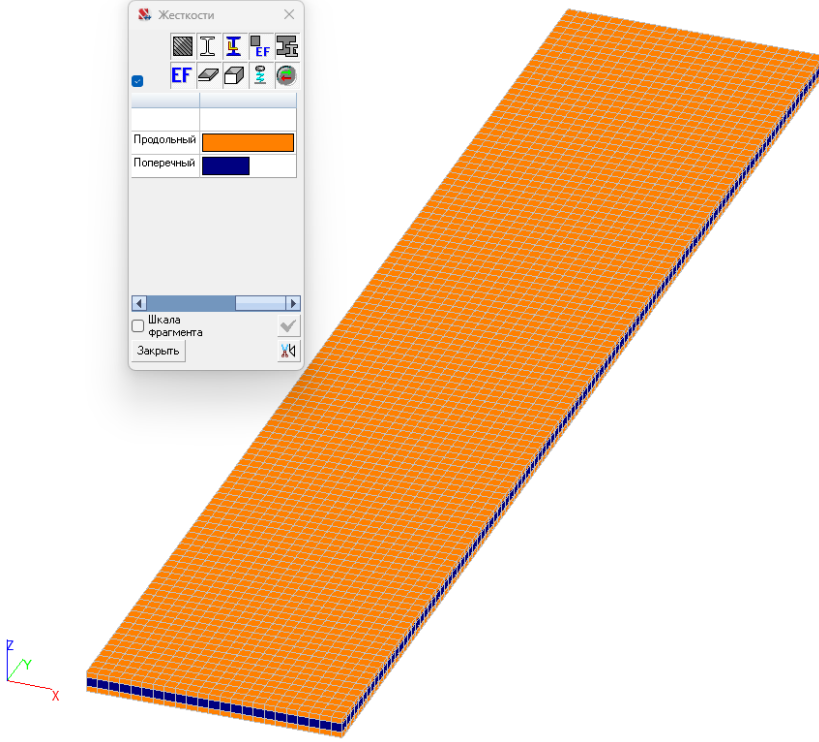
- 2) Изменяемая толщина поперечных слоев.
- 3) Шаг в поперечных слоях (воздушные зазоры).

Для исследования построены объемные конечно-элементные модели (таблица 2.3). Расчетная схема определена как система общего вида и ее основные неизвестные представлены линейными перемещениями узловых точек вдоль осей X, Y, Z и поворотами вокруг этих осей [120].

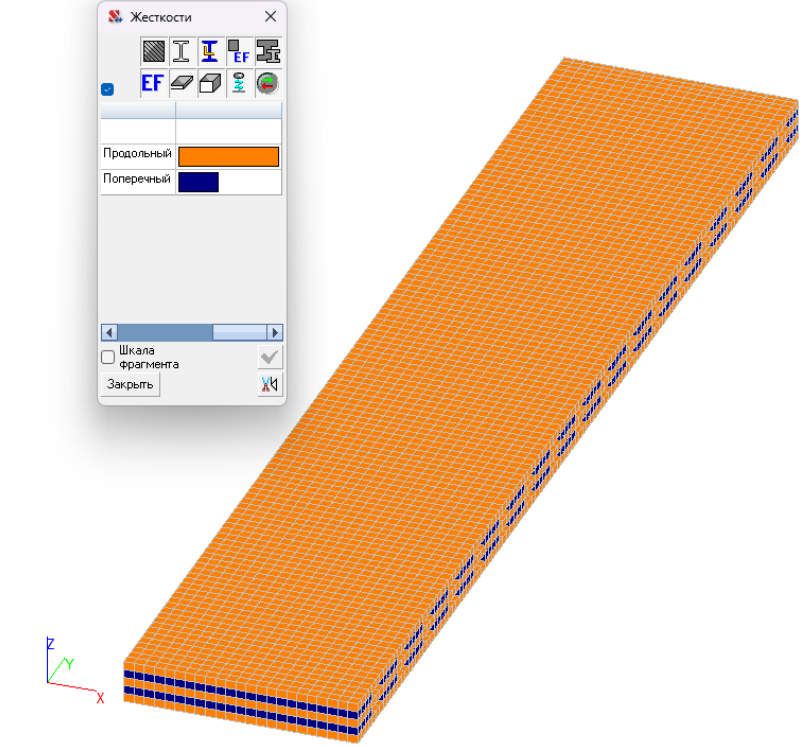
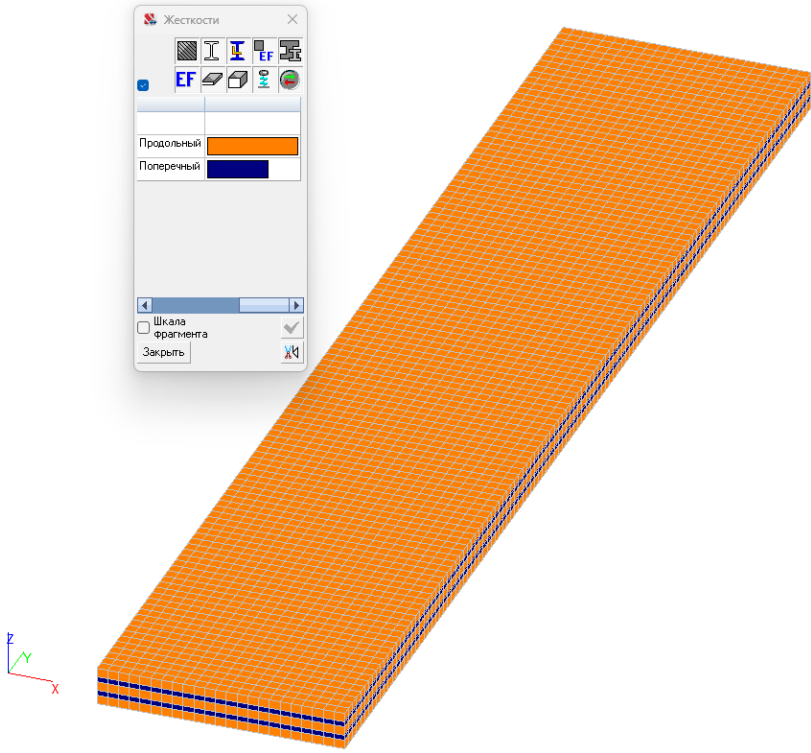
Таблица 2.3 – Конечно-элементные модели

Конфигурация	Общий вид КЭ-модели
<p style="text-align: center;">Трехслойная плита перекрытия с шагом в поперечных слоях</p>	 <p>The image shows a 3D perspective view of a rectangular slab model. The slab is composed of three distinct layers, with the top and bottom layers being blue and the middle layer being orange. A fine mesh of orange quadrilateral elements is overlaid on the entire surface of the slab. In the foreground, there is a small 3D coordinate system with red (X), green (Y), and blue (Z) axes. To the left of the slab, the letter 'a)' is written. A software window titled 'Жесткости' (Stiffness) is open in the upper left, showing a toolbar with various icons and a list of properties for 'Поперечный' (Transverse) and 'Продольный' (Longitudinal) directions. The 'Продольный' direction is highlighted in orange. The window also includes a 'Шкала фрагмента' (Fragment scale) checkbox and a 'Закреть' (Close) button.</p>

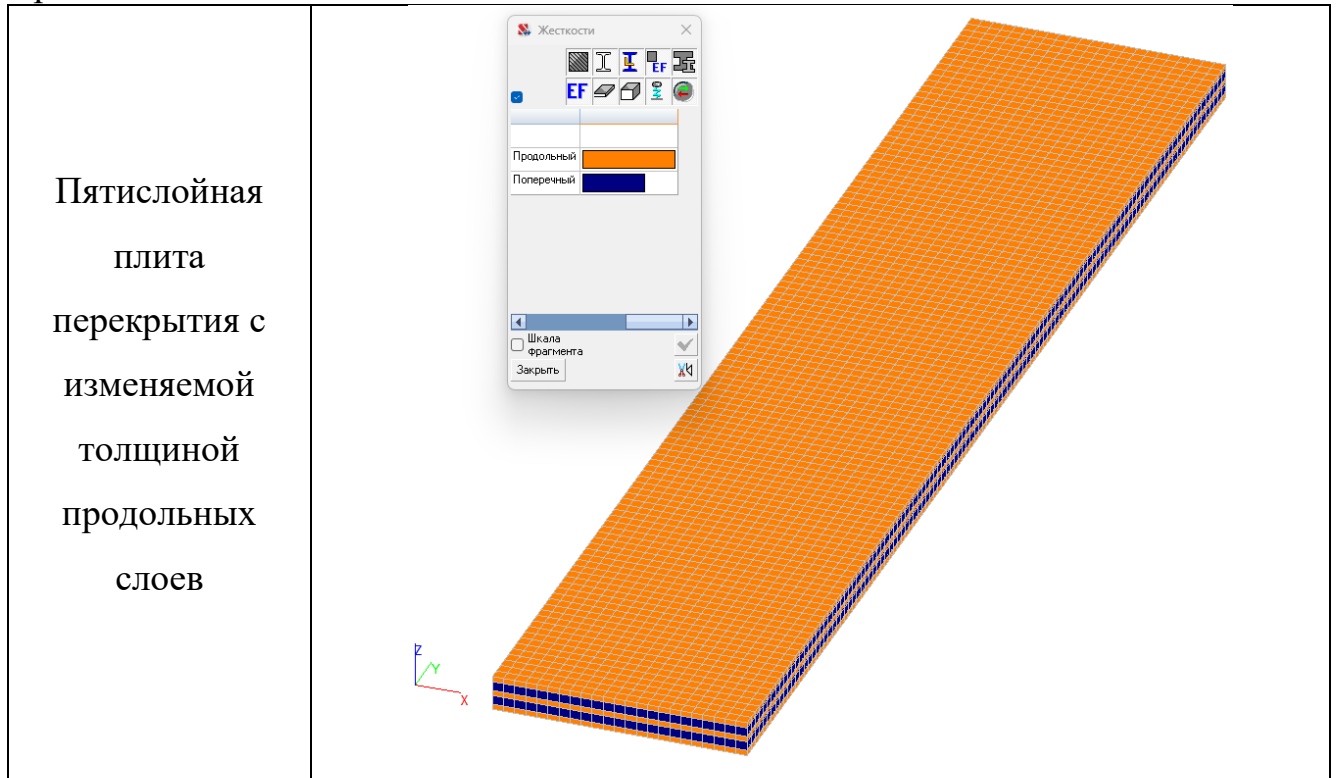
Продолжение таблицы 2.3

<p>Трехслойная плита перекрытия с изменяемой толщиной поперечного слоя</p>	
<p>Трехслойная плита перекрытия с изменяемой толщиной продольных слоев</p>	

Продолжение таблицы 2.3

<p>Пятислойная плита перекрытия с шагом в поперечных слоях</p>	
<p>Пятислойная плита перекрытия с изменяемой толщиной поперечных слоев</p>	

Продолжение таблицы 2.3



Слоям назначены конечные элементы типа 36 «8-ти узловой изопараметрический КЭ (параллелепипед) (изопараметрический)» размером 50x50x42 мм с объемным весом 5 кН/м³.

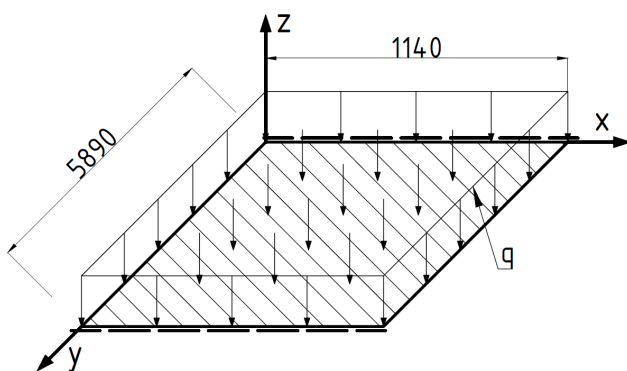
Упругие характеристики заданы с учетом ортотропных свойств древесины и одинаковы для каждой конфигурации. Таким образом, в исследованиях рассмотрена только геометрическая неоднородность сечения. Значения модуля упругости E , модуля сдвига G и коэффициента Пуассона ν выбраны в соответствии с нормативной документацией ГОСТ Р 56706-2022 «Плиты клееные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Технические условия» [18] и СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80» [80] и составляют для слоев:

1) с продольным направлением волокон: $E_x=4 \times 10^5$ кН/м², $E_y=1 \times 10^7$ кН/м², $E_z=4 \times 10^5$ кН/м², $G_{xy}=5 \times 10^5$ кН/м², $G_{xz}=5 \times 10^4$ кН/м², $G_{yz}=5 \times 10^5$ кН/м², $\nu_{yx}=0,45$, $\nu_{xy}=0,018$, $\nu_{xz}=0,018$;

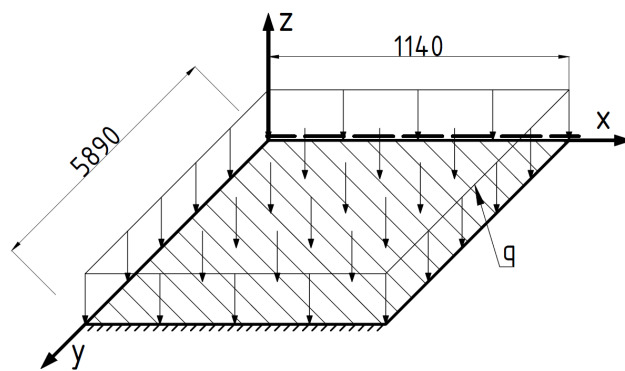
2) с поперечным направлением волокон: $E_{x90}=1\times 10^7$ кН/м², $E_{y90}=4\times 10^5$ кН/м², $E_{z90}=4\times 10^5$ кН/м², $G_{xy90}=5\times 10^5$ кН/м², $G_{xz90}=5\times 10^5$ кН/м², $G_{yz90}=5\times 10^4$ кН/м², $\nu_{yx90}=0,018$, $\nu_{xy90}=0,45$, $\nu_{xz90}=0,018$.

Во всех исследованиях плиты закреплены по нижнему слою с двух противоположных сторон связями, обеспечивающими три вида условий опирания: шарнирное опирание по двум сторонам исследуемой конструкции (Ш+Ш); шарнирное опирание с одной стороны и жёсткое защемление – с другой (Ш+Ж); жёсткое защемление с обеих сторон (Ж+Ж) (рисунок 2.4).

а)



б)



в)

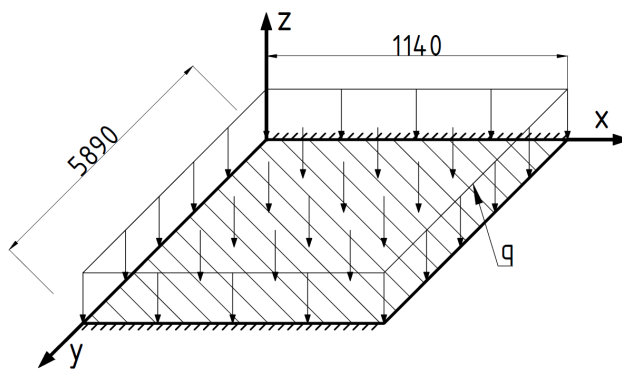


Рисунок 2.4 – Схемы плит перекрытия из ДПК
(а – шарнирное опирание; б – жесткое защемление и шарнир; в – жесткое защемление)

Как отмечалось в главе 1, в реальных конструкциях узлы примыкания всегда обладают определённой податливостью. Тем не менее, моделирование предельных схем позволяет рассмотреть весь диапазон возможного поведения конструкции, обеспечить сопоставимость результатов, а также упростить интерпретацию влияния геометрических параметров слоёв на динамические и статические

характеристики плиты без введения дополнительных неопределённых параметров (конечной жёсткости узлов).

При построении расчётной схемы и проведении анализа напряжённо-деформированного состояния конструкций из древесины перекрёстно-клееной (ДПК) приняты следующие *допущения*:

- 1) Материал конструкции работает в пределах линейно-упругой стадии, т.е. зависимость между напряжениями и деформациями описывается законом Гука, а остаточные деформации отсутствуют.
- 2) Физическая нелинейность материала не учитывается.
- 3) Материал каждого слоя считается ортотропным и однородным в пределах слоя.
- 4) Влияние ползучести не учитывается, поскольку анализ проводится для кратковременного действия статической нагрузки.
- 5) Возможные начальные несовершенства геометрии пренебрегаются, конструкция считается идеально прямолинейной и симметричной.
- 6) Не учитывается величина податливости узлов опирания плиты перекрытия.

В рамках линейно-упругого расчёта напряжения рассматриваются не с целью достижения предельных значений, а как необходимый компонент напряжённо-деформированного состояния, позволяющий оценить влияние геометрических параметров слоёв и условий опирания на распределение внутренних усилий.

Нагрузка для исследований принимается таким образом, чтобы однозначно обеспечить работу конструкции в линейно-упругой области и в рамках теории малых прогибов. Для этого достигался прогиб, не превышающий допускаемых значений на перекрытия общественных и жилых зданий в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Для сопоставимости конфигураций для изменяемой толщины задавалась одна величина нагрузки, а для шага ламелей – кратная ей.

Ввиду большого количества выходных данных результатов исследований, в настоящей главе рассмотрены наибольшие значения максимальных нормальных

растягивающих и сжимающих напряжений, направленных вдоль пролета плиты σ_y , а также максимальные прогибы в центре плиты W_0 .

2.3 Исследование влияния геометрических параметров сечения и условий опирания на несущую способность и деформативность плит перекрытия из древесины перекрестноклееной

2.3.1 Влияние шага ламелей в поперечном слое на деформации и напряжения в трехслойных плитах перекрытия

Исследованы трехслойные плиты перекрытия из ДПК с продольным расположением волокон в наружных слоях (порядковые номера – 1, 3) и поперечным расположением волокон во внутреннем слое (порядковый номер – 2). Шаг ламелей c в поперечном слое изменялся ступенями по 50 мм и равен 190 мм (сплошное сечение), 240 мм, 290 мм и 340 мм. Толщина всех слоев принята $t_{11}=t_{12}=42$ мм. Нагружение плиты задано равномерно распределенной нагрузкой на грани объемных элементов верхнего слоя, равной $2,5 \text{ кН/м}^2$.

Пример плиты с шагом ламелей $c=340$ мм в поперечном слое изображен на рисунке 2.5.

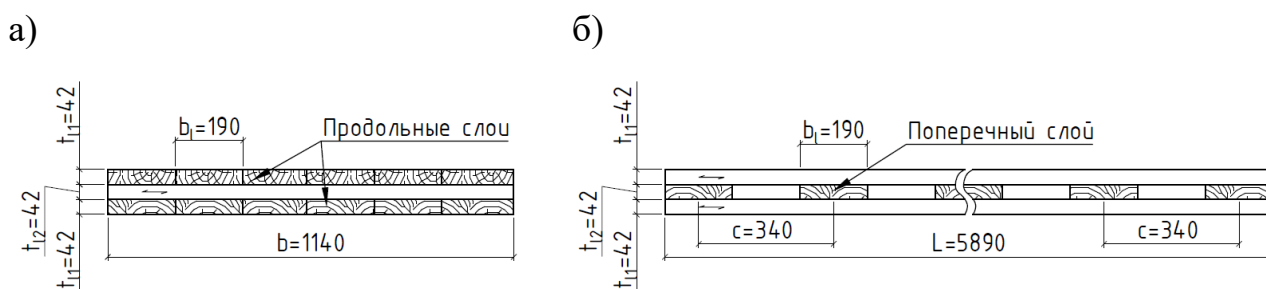


Рисунок 2.5 – Трехслойная плита перекрытия из ДПК с шагом в поперечном слое $c=340$ мм

(а – поперечное сечение; б – продольное сечение)

В таблице 2.4 приведены основные результаты исследования трехслойной плиты перекрытия из ДПК с шагом ламелей в поперечном слое.

Таблица 2.4 – Результаты численных исследований зависимости прогибов и напряжений трехслойной плиты перекрытия из ДПК от шага ламелей в поперечном слое при различных условиях опирания

Параметр	Слои	Опирание	Шаг ламелей в поперечном слое, мм			
			190	240	290	340
Максимальный прогиб W_0 (мм) при условии опирания:	1,2,3	Ш+Ш	25,53	25,89	26,24	26,61
		Ш+Ж	9,45	9,77	10,09	10,45
		Ж+Ж	5,96	6,26	6,56	6,88
Нормальные растягивающие напряжения $\sigma_{ураст}$ (кН/м ²) при условии опирания:	1,3	Ш+Ш	2846,6	2852,0	2856,2	2857,1
		Ш+Ж	2975,7	2973,2	2971,1	2962,4
		Ж+Ж	1969,8	1969,1	1968,0	1965,2
	2	Ш+Ш	14,7	23,2	33,4	43,1
		Ш+Ж	58,8	59,2	59,4	59,4
		Ж+Ж	39,1	39,5	39,6	41,6
Нормальные сжимающие напряжения $\sigma_{усжат}$ (кН/м ²) при условии опирания:	1,3	Ш+Ш	-2847,4	-2853,7	-2855,8	-2859,0
		Ш+Ж	-2691,9	-2695,4	-2695,7	-2689,9
		Ж+Ж	-1969,7	-1924,6	-2008,5	-1917,5
	2	Ш+Ш	-15,7	-24,0	-34,4	-43,2
		Ш+Ж	-11,6	-17,6	-25,1	-31,3
		Ж+Ж	-39,1	-42,2	-35,8	-65,4

Построены графики выявленных зависимостей максимального прогиба и напряжений от шага ламелей в поперечном слое (рисунки 2.6-2.7). Ввиду того, что напряжения σ_y в продольных слоях (1 и 3) значительно превышают напряжения в поперечном слое (2), график напряжений построен только для продольных слоев.

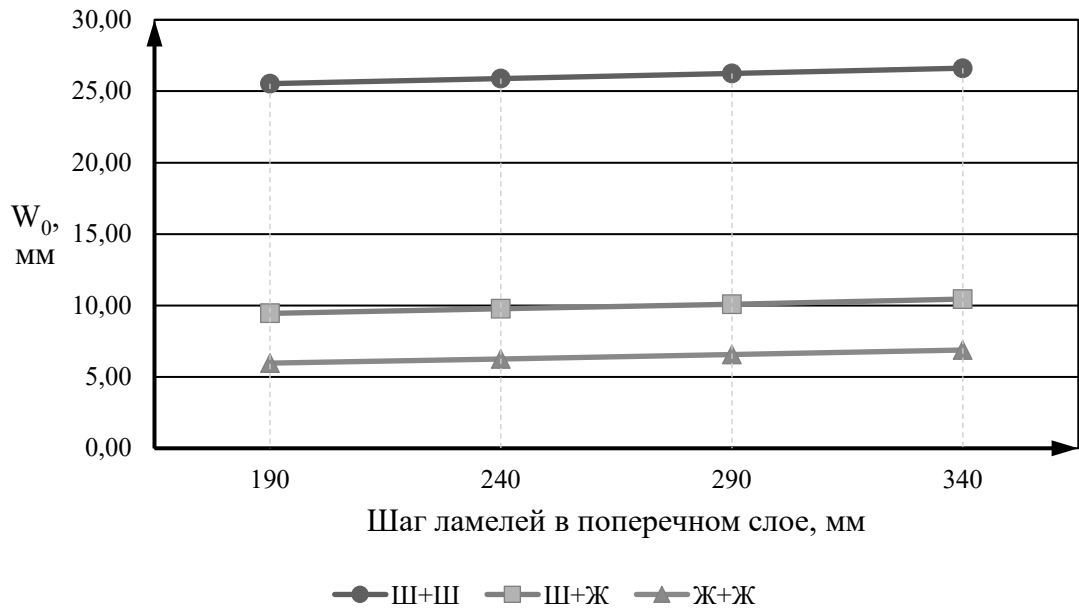


Рисунок 2.6 – Зависимость максимального прогиба от шага ламелей в поперечном слое трехслойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания



Рисунок 2.7 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_y от шага ламелей в поперечном слое трехслойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- наибольшие прогибы возникают в плите при шарнирном опирании при максимальном шаге ламелей в среднем слое;

- наибольшее значение нормальных напряжений σ_y достигается при жестком защемлении с одной стороны и шарнире с другой стороны плиты при максимальном шаге ламелей в среднем слое;
- при увеличении шага ламелей увеличивается прогиб конструкции. При этом разница между наименьшим и наибольшим зазором для шарнирного опирания составляет 4 %, что подтверждает несущественность влияния межслойного сдвига для плит перекрытия из ДПК малой толщины;
- чем жестче защемлена конструкция, тем более существенно шаг ламелей влияет на прогиб конструкции. Так, для жесткого защемления отклонение составляет 15 %, что свидетельствует о большем влиянии межслойного сдвига на деформативность конструкции;
- шаг в поперечном слое трехслойной плиты из ДПК оказывает незначительное влияние на изменение нормальных напряжений σ_y , как в наружных (~1 %), так и во внутреннем (~3 %) слоях. При этом, значения напряжений в продольных слоях значительно выше, чем в поперечном.

2.3.2 Влияние толщины поперечного и продольных слоев на деформации и напряжения в трехслойных плитах перекрытия

Исследованы трехслойные плиты перекрытия из ДПК с продольным расположением ламелей в наружных слоях (порядковые номера слоёв – 1, 3) и поперечным расположением ламелей во внутреннем слое (порядковый номер слоя – 2) с изменяемой толщиной продольных слоев t_{11} , равной 9 мм, 12 мм, 18 мм, 25 мм, 32 мм и 42 мм и неизменной толщиной поперечного слоя $t_{12}=42$ мм; с изменяемой толщиной поперечного слоя t_{12} , равной 9 мм, 12 мм, 18 мм, 25 мм, 32 мм и 42 мм и неизменной толщиной продольных слоев $t_{11}=42$ мм.

Пример плиты перекрытия с толщиной поперечного слоя $t_{12}=18$ мм изображен на рисунке 2.8.

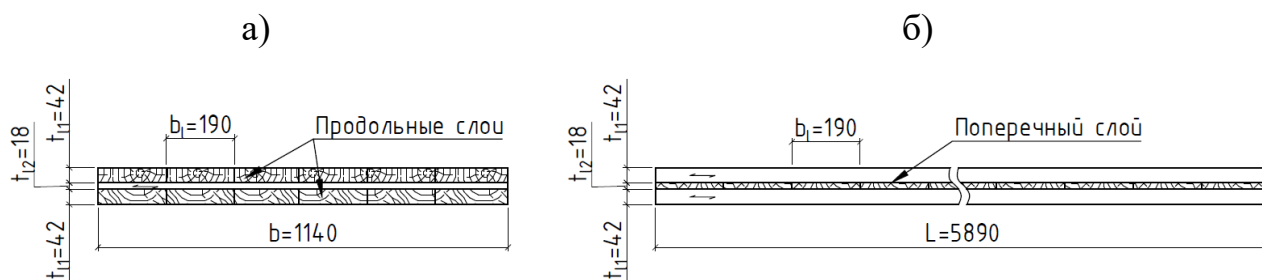


Рисунок 2.8 – Трехслойная плита перекрытия из ДПК с толщиной поперечного слоя $t_{12}=18$ мм
(а – поперечное сечение; б – продольное сечение)

Нагружение плиты задано равномерно распределенной нагрузкой $0,25 \text{ кН/м}^2$. Результаты исследований влияния толщины поперечного слоя на деформации и напряжения в трехслойной плите перекрытия приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты численных исследований зависимости деформаций и напряжений трехслойной плиты перекрытия из ДПК от толщины поперечного слоя при различных условиях опирания

Параметр	Слой	Опираение	Толщина поперечного слоя, мм					
			9	12	18	25	32	42
Максимальный прогиб W_0 (мм) при условии опирания:	1,2,3	Ш+Ш	5,91	5,34	4,54	3,78	3,19	2,55
		Ш+Ж	1,98	1,86	1,60	1,35	1,16	0,94
		Ж+Ж	1,23	1,16	1,00	0,85	0,73	0,60
Нормальные растягивающие напряжения $\sigma_{ураст}$ (кН/м ²) при условии опирания:	1,3	Ш+Ш	416,1	400,9	372,5	342,8	316,7	284,7
		Ш+Ж	450,6	432,7	399,3	364,6	334,3	297,6
		Ж+Ж	298,4	286,5	264,4	241,4	221,3	197,0
	2	Ш+Ш	2,2	2,1	1,9	1,7	1,6	1,5
		Ш+Ж	8,1	7,9	7,5	7,0	6,5	5,9
		Ж+Ж	5,4	5,3	5,0	4,6	4,3	3,9
Нормальные сжимающие напряжения $\sigma_{усжат}$ (кН/м ²) при условии опирания:	1,3	Ш+Ш	-416,4	-401,2	-372,8	-343,0	-316,8	-284,7
		Ш+Ж	-394,2	-379,5	-352,2	-323,8	-299,1	-269,2
		Ж+Ж	-298,4	-286,5	-264,4	-241,4	-221,3	-197,0
	2	Ш+Ш	-2,0	-2,0	-1,9	-1,8	-1,7	-1,6
		Ш+Ж	-1,4	-1,4	-1,4	-1,3	-1,3	-1,2
		Ж+Ж	-5,4	-5,3	-5,0	-4,6	-4,3	-3,9

Построены графики выявленных зависимостей максимального прогиба и напряжений от толщины поперечного слоя (рисунки 2.9-2.10). График напряжений построен только для продольных слоев (1 и 3).

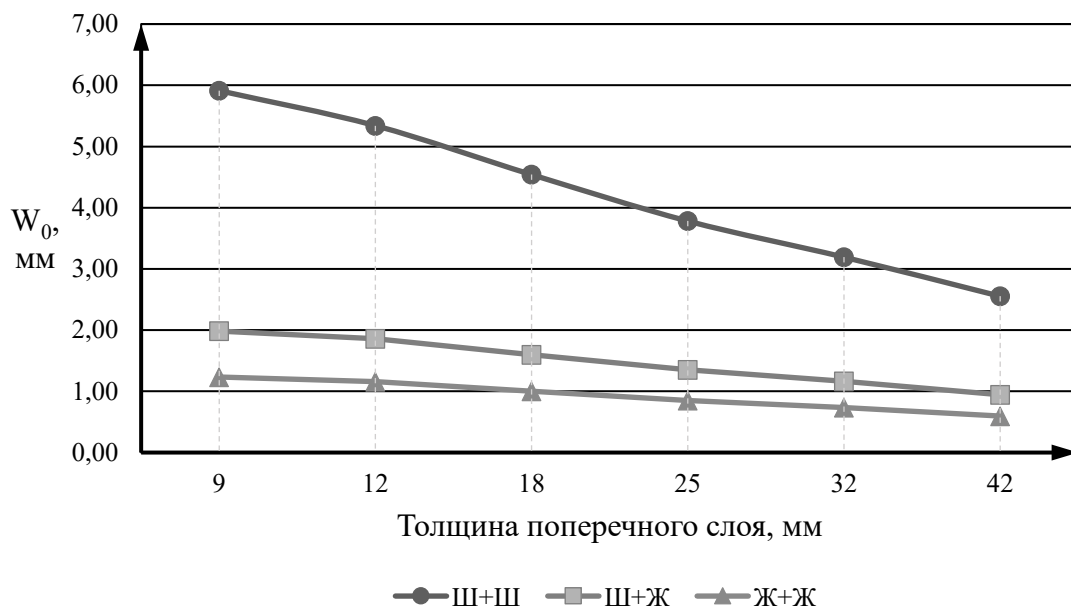


Рисунок 2.9 – Зависимость максимального прогиба от толщины поперечного слоя в трехслойной плите перекрытия из ДПК

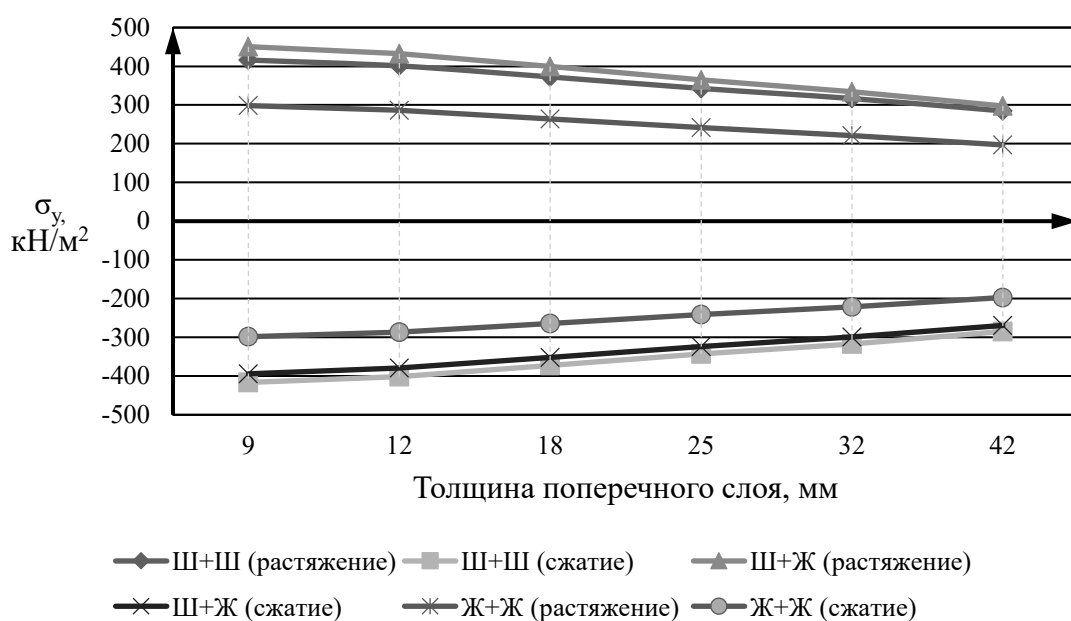


Рисунок 2.10 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_y от толщины поперечного слоя в трехслойной плите перекрытия из ДПК

Результаты исследований влияния толщины продольных слоев на деформации и напряжения в трехслойной плите перекрытия из ДПК приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты численных исследований зависимости деформаций и напряжений трехслойной плиты перекрытия из ДПК от толщины поперечного слоя при различных условиях опирания

Параметр	Слои	Опирание	Толщина продольных слоев, мм					
			9	12	18	25	32	42
Максимальный прогиб W_0 (мм) при условии опирания:	1,2,3	Ш+Ш	31,94	21,64	11,75	6,78	4,34	2,55
		Ш+Ж	11,64	7,91	4,31	2,50	1,60	0,94
		Ж+Ж	6,66	4,62	2,57	1,52	0,99	0,60
Нормальные растягивающие напряжения $\sigma_{ураст}$ (кН/м ²) при условии опирания:	1,3	Ш+Ш	2294,5	1626,9	969,9	617,9	431,6	284,7
		Ш+Ж	2606,1	1825,2	1069,8	670,3	460,7	297,6
		Ж+Ж	1726,1	1208,8	708,3	443,8	305,0	197,0
	2	Ш+Ш	4,7	3,9	3,0	2,3	1,8	1,5
		Ш+Ж	56,0	40,5	23,7	14,3	9,5	5,9
		Ж+Ж	37,4	27,0	15,8	9,6	6,3	3,9
Нормальные сжимающие напряжения $\sigma_{усжат}$ (кН/м ²) при условии опирания:	1,3	Ш+Ш	-2294,5	-1627,0	-970,0	-617,9	-431,6	-284,7
		Ш+Ж	-2155,2	-1519,1	-893,2	-568,4	-403,1	-269,2
		Ж+Ж	-1726,1	-1208,8	-708,3	-443,8	-305,0	-197,0
	2	Ш+Ш	-4,9	-4,1	-3,2	-2,5	-2,0	-1,6
		Ш+Ж	-17,6	-13,4	-7,5	-3,8	-2,0	-1,2
		Ж+Ж	-37,4	-27,0	-15,8	-9,6	-6,3	-3,9

Построены графики выявленных зависимостей максимального прогиба и напряжений от толщины продольных слоев (рисунки 2.11-2.12).

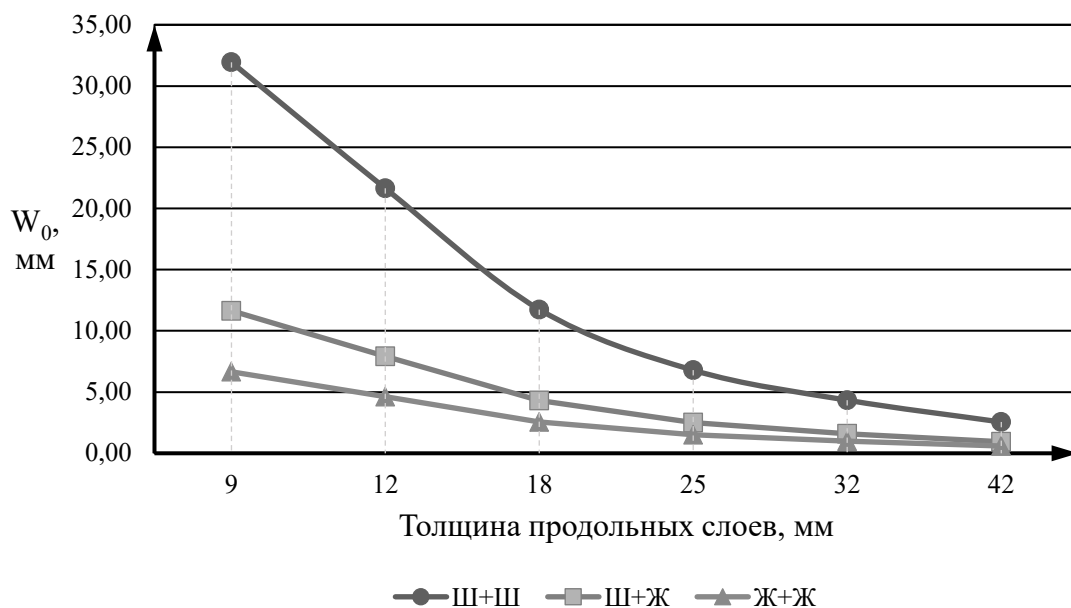


Рисунок 2.11 – Зависимость максимального прогиба от толщины продольных слоев в трехслойной плите перекрытия из ДПК

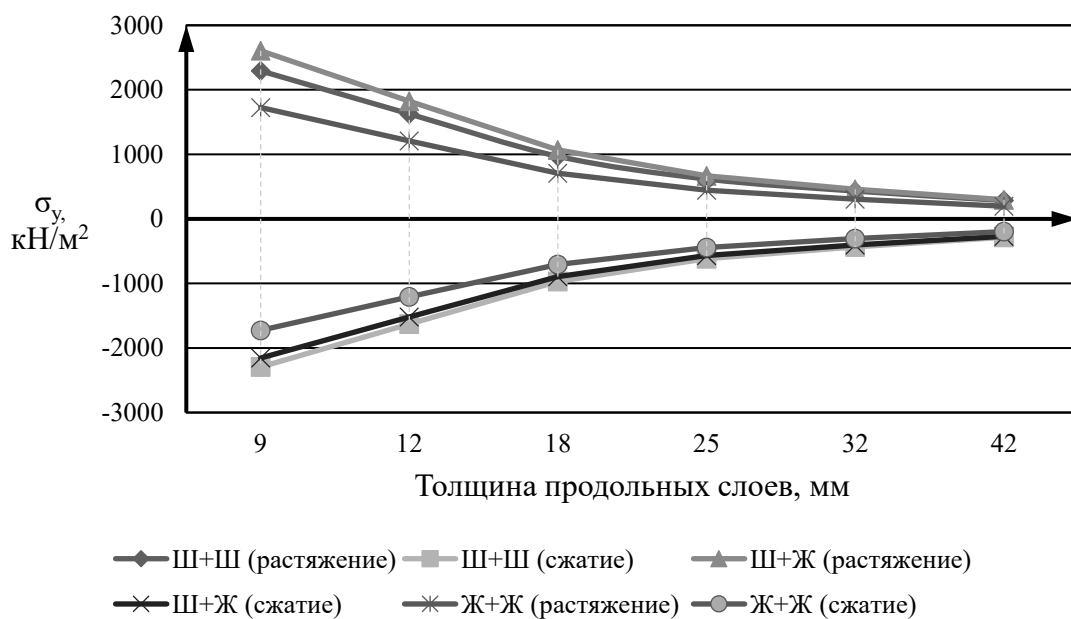


Рисунок 2.12 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_y от толщины продольных слоев в трехслойной плите перекрытия из ДПК

Анализ напряжённо-деформированного состояния трехслойных плит перекрытия из ДПК при варьировании толщины продольных и поперечных слоёв показал:

– уменьшение толщины наружных продольных слоёв с 42 мм до 9 мм приводит к значительному увеличению максимального прогиба – более чем в 13

раз (рост на ~1200 %), что свидетельствует о резком снижении изгибной жёсткости. Наибольшее значение прогиба достигается при шарнирном опирании по двум сторонам, что объясняется минимальным сопротивлением повороту конструкции на опорах;

- уменьшение толщины поперечного слоя от 42 мм до 9 мм приводит к увеличению максимального прогиба на 130 %.

- внутренний поперечный слой также испытывает увеличение нормальных напряжений при утончении продольных слоёв: их величина возрастает на ~860 % при жёстком защемлении, на ~850 % при комбинированном опирании и на ~220 % при шарнирном опирании. Однако абсолютные значения напряжений в поперечном слое остаются существенно ниже, чем в крайних продольных слоях, и не являются определяющими для общей несущей способности плиты перекрытия.

2.3.3 Влияние шага ламелей в поперечных слоях на деформации и напряжения в пятислойных плитах перекрытия

Исследованы пятислойные плиты из ДПК с продольным расположением волокон в наружных и среднем слоях (порядковые номера – 1, 3, 5) и поперечным расположением волокон во внутренних слоях (порядковые номера – 2, 4). Зазоры ламелей c в поперечных слоях изменялись с шагом 50 мм – 190 мм (сплошное сечение), 240 мм, 290 мм и 340 мм. Пример плиты с шагом ламелей $c=340$ мм в поперечном слое изображен на рисунке 2.13.

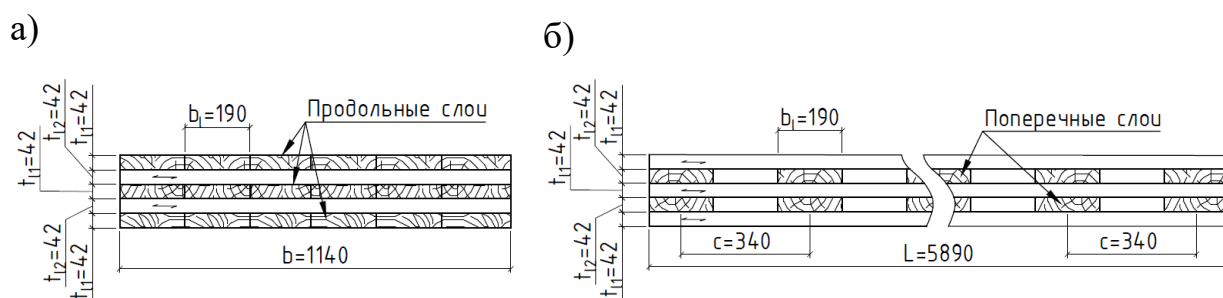


Рисунок 2.13 – Пятислойная плита перекрытия из ДПК с шагом в поперечном слое $c=340$ мм
(а – поперечное сечение; б – продольное сечение)

Нагружение плиты задано равномерно распределенной нагрузкой на грани объемных элементов верхнего слоя, равной $2,5 \text{ кН/м}^2$. Результаты исследований приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Результаты численных исследований зависимости прогибов и напряжений пятислойной плиты перекрытия из ДПК от шага ламелей в поперечных слоях при различных условиях опирания

Параметр	Слои	Опирание	Шаг ламелей в поперечных слоях, мм			
			190	240	290	340
Максимальный прогиб W_0 (мм) при условии опирания:	1-5	Ш+Ш	7,01	7,27	7,49	7,64
		Ш+Ж	2,80	2,99	3,17	3,39
		Ж+Ж	1,88	2,13	2,22	2,43
Нормальные растягивающие напряжения $\sigma_{ураст}$ (кН/м^2) при условии опирания:	1,5	Ш+Ш	1477,3	1493,4	1496,1	1499,5
		Ш+Ж	1402,9	1423,0	1436,5	1448,1
		Ж+Ж	962,3	1014,3	952,5	1128,7
	2,4	Ш+Ш	29,0	29,5	30,5	32,9
		Ш+Ж	38,7	41,4	48,7	55,6
		Ж+Ж	25,8	29,0	34,7	40,2
	3	Ш+Ш	78,2	66,8	81,0	103,0
		Ш+Ж	495,6	494,8	495,2	494,4
		Ж+Ж	335,7	335,5	336,3	336,9

Продолжение таблицы 2.7

Нормальные сжимающие напряжения $\sigma_{сж\text{жат}}$ (кН/м ²) при условии опирания:	1,5	Ш+Ш	-1477,4	-1492,0	-1494,7	-1500,6
		Ш+Ж	-1473,6	-1465,2	-1458,5	-1447,1
		Ж+Ж	-962,5	-958,2	-955,4	-951,9
	2,4	Ш+Ш	-29,0	-29,5	-30,5	-32,9
		Ш+Ж	-27,5	-30,0	-32,0	-33,9
		Ж+Ж	-25,8	-32,8	-36,4	-41,9
	3	Ш+Ш	-85,7	-123,0	-136,7	-148,9
		Ш+Ж	-63,7	-91,2	-101,3	-109,9
		Ж+Ж	-335,8	-337,0	-349,6	-347,3

Построены графики выявленных зависимостей максимального прогиба и напряжений от шага ламелей в поперечных слоях пятислойной плиты перекрытия из ДПК (рисунки 2.14-2.16). Графики напряжений построены для продольных слоев (1, 3 и 5).

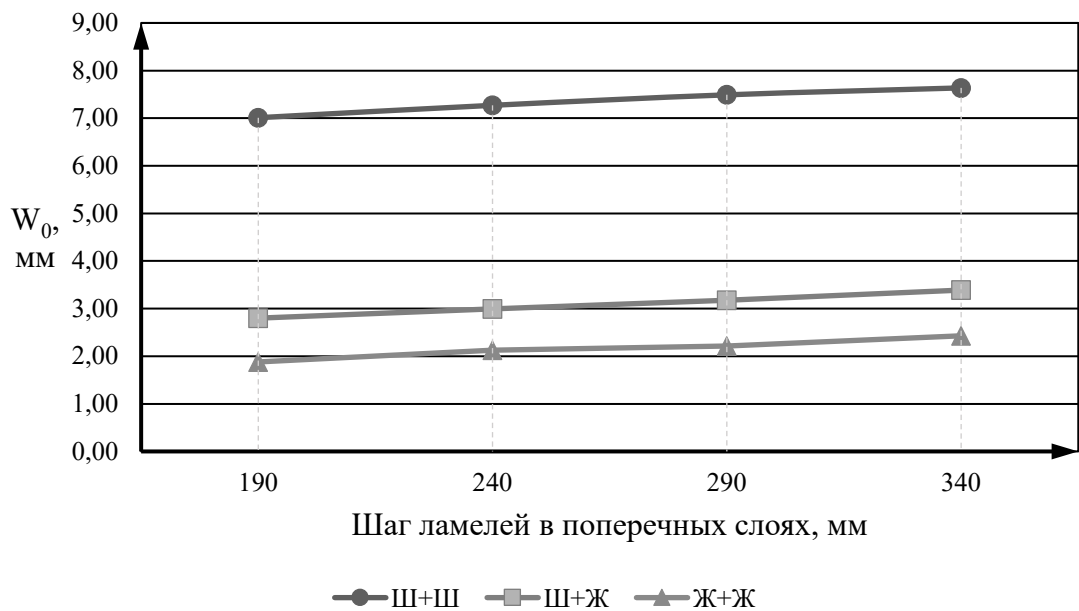


Рисунок 2.14 – Зависимость максимального прогиба от шага ламелей в поперечных слоях пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

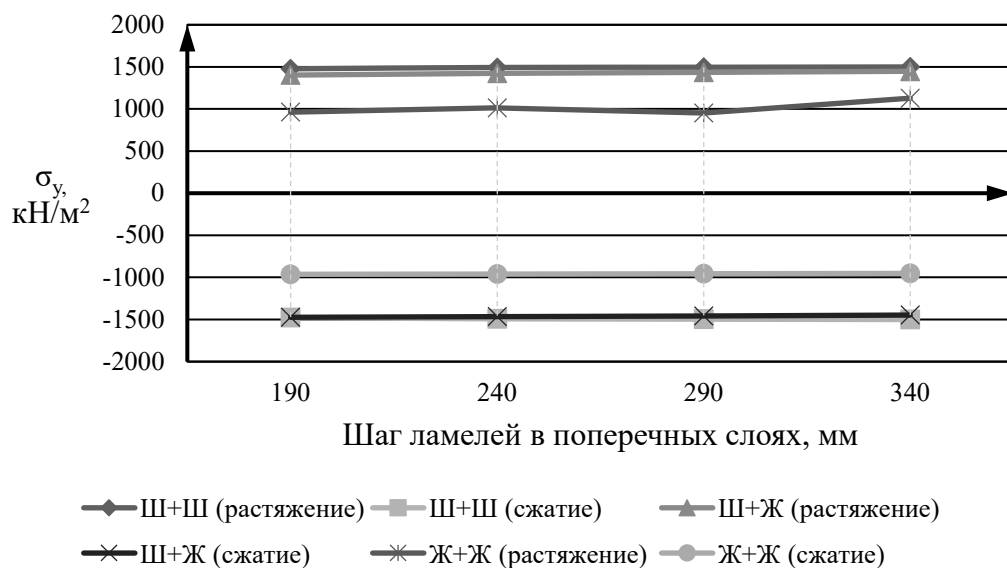


Рисунок 2.15 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_y в наружных продольных слоях (1, 5) от шага ламелей в поперечных слоях пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

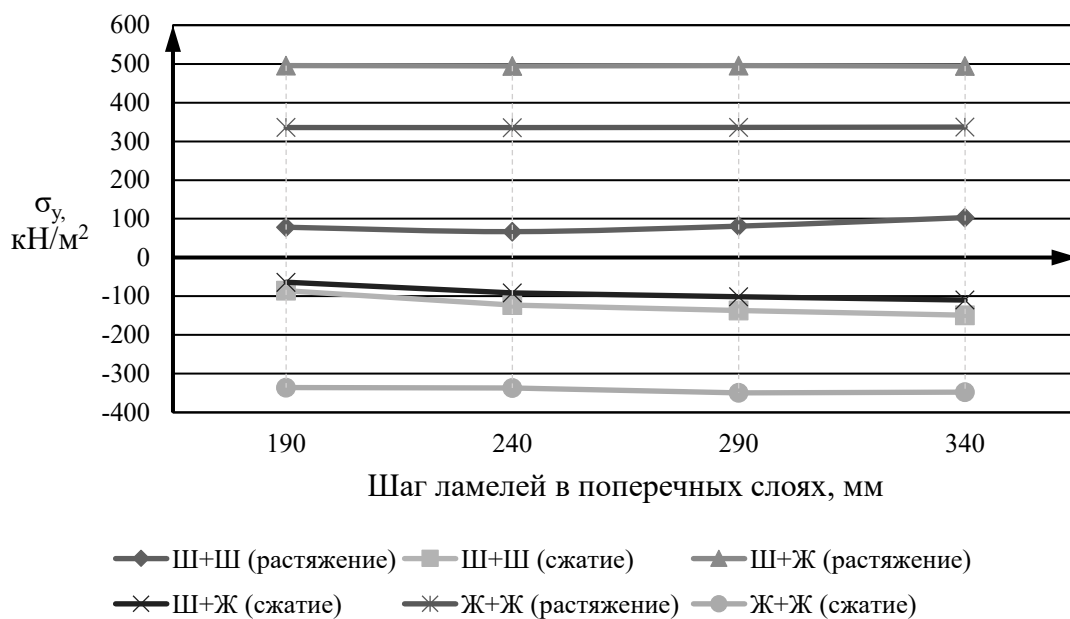


Рисунок 2.16 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_y в центральном продольном слое (3) от шага ламелей в поперечных слоях пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Полученные результаты показывают, что при увеличении числа слоёв с трёх до пяти при сохранении шага ламелей наблюдается, что характер распределения напряжений остается аналогичным, что свидетельствует о сохранении общих

закономерностей напряжённно-деформированного состояния для плит перекрытия из ДПК.

Однако величина прогибов возрастает с большей скоростью: для шарнирного опирания разница 9 %, для комбинированного – 21 %, для жесткого защемления с двух сторон – 29 %. Это связано с тем, что с увеличением слоев изменяется отношение длины пролета к толщине плиты перекрытия L/h , что ведет к возрастанию влияния межслойного сдвига на общую деформативность плиты перекрытия.

2.3.4 Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформации и напряжения в пятислойных плитах перекрытия

Исследованы пятислойные плиты перекрытия из ДПК с продольным расположением ламелей в наружных и центральном внутреннем слое (порядковые номера – 1, 3, 5) и поперечным расположением ламелей во внутренних слоях (порядковые номера – 2, 4) с изменяемой толщиной продольных слоев t_{l1} , равной 9 мм, 12 мм, 18 мм, 25 мм, 32 мм и 42 мм и неизменной толщиной поперечного слоя $t_{l2}=42$ мм; с изменяемой толщиной поперечного слоя t_{l2} , равной 9 мм, 12 мм, 18 мм, 25 мм, 32 мм и 42 мм и неизменной толщиной продольных слоев $t_{l1}=42$ мм. Нагружение плиты задано равномерно распределенной нагрузкой равной $0,25 \text{ кН/м}^2$

Пример плиты с толщиной поперечных слоев $t_{l2}=18$ мм изображен на рисунке 2.17.

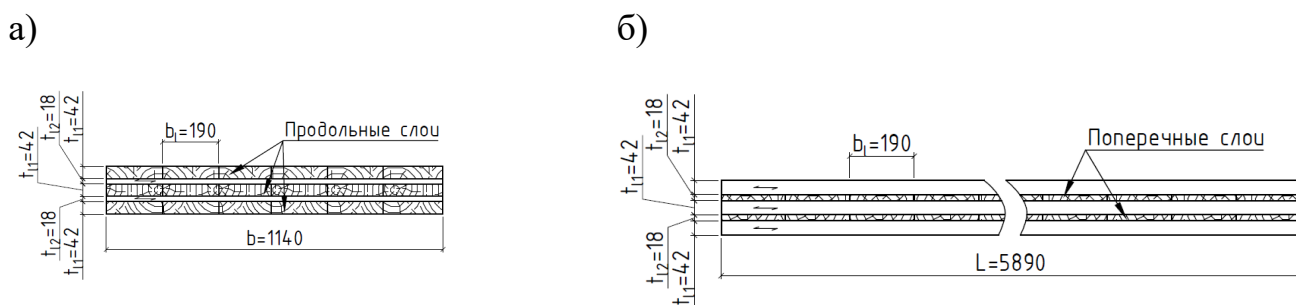


Рисунок 2.17 – Пятислойная плита перекрытия из ДПК с толщиной поперечных слоев $t_2=18$ мм
(а – поперечное сечение; б – продольное сечение)

Результаты исследований влияния толщины поперечных слоев на деформации и напряжения в пятислойной плите перекрытия из ДПК приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.8 – Результаты численных исследований зависимости деформаций и напряжений пятислойной плиты перекрытия из ДПК от толщины поперечных слоев при различных условиях опирания

Параметр	Слой	Опирание	Толщина поперечных слоев, мм					
			9	12	18	25	32	42
Максимальный прогиб W_0 (мм) при условии опирания:	1-5	Ш+Ш	1,70	1,53	1,28	1,05	0,88	0,70
		Ш+Ж	0,59	0,55	0,47	0,40	0,34	0,28
		Ж+Ж	0,37	0,36	0,31	0,26	0,23	0,19
Нормальные растягивающие напряжения $\sigma_{урст}$ (кН/м ²) при условии опирания:	1,5	Ш+Ш	233,80	222,40	202,40	183,00	166,70	147,70
		Ш+Ж	229,30	217,40	196,50	176,50	159,80	140,30
		Ж+Ж	150,80	143,10	130,50	118,30	108,10	96,20
	2, 4	Ш+Ш	4,50	4,30	3,90	3,60	3,30	2,90
		Ш+Ж	6,20	5,90	5,40	4,80	4,40	3,90
		Ж+Ж	4,10	3,90	3,60	3,20	2,90	2,60
	3	Ш+Ш	13,90	13,00	11,50	10,20	9,10	7,80
		Ш+Ж	77,20	73,90	67,90	61,70	56,20	49,60
		Ж+Ж	51,50	49,40	45,40	41,30	37,80	33,60

Продолжение таблицы 2.8

Нормальные сжимающие напряжения $\sigma_{сжат}$ (кН/м ²) при условии опирания:	1,5	Ш+Ш	-233,90	-222,40	-202,40	-183,00	-166,70	-147,70
		Ш+Ж	-230,60	-219,50	-200,20	-181,40	-165,70	-147,40
		Ж+Ж	-150,80	-143,10	-130,60	-118,30	-108,20	-96,30
	2, 4	Ш+Ш	-4,50	-4,30	-3,90	-3,60	-3,30	-2,90
		Ш+Ж	-4,30	-4,10	-3,80	-3,40	-3,10	-2,80
		Ж+Ж	-4,10	-3,90	-3,60	-3,20	-2,90	-2,60
	3	Ш+Ш	-14,90	-13,90	-12,20	-10,80	-9,70	-8,60
		Ш+Ж	-11,00	-10,20	-9,10	-8,00	-7,20	-6,40
		Ж+Ж	-51,50	-49,40	-45,40	-41,30	-37,80	-33,60

Построены графики выявленных зависимостей максимального прогиба и напряжений от толщины поперечных слоев в пятислойной плите перекрытия из ДПК (рисунки 2.18-2.20). Графики напряжений построены для продольных слоев (1, 3 и 5).

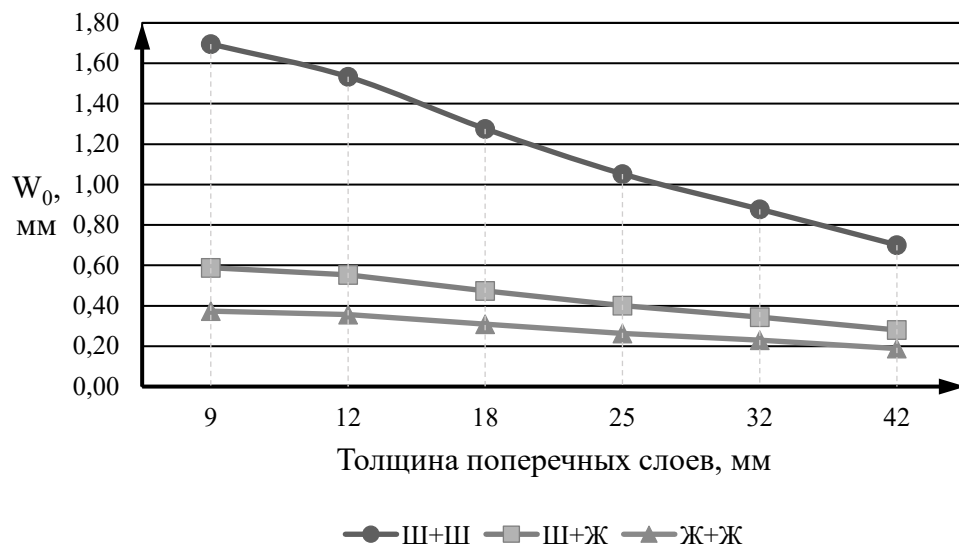


Рисунок 2.18 – Зависимость максимального прогиба от толщины поперечных слоев ламелей пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

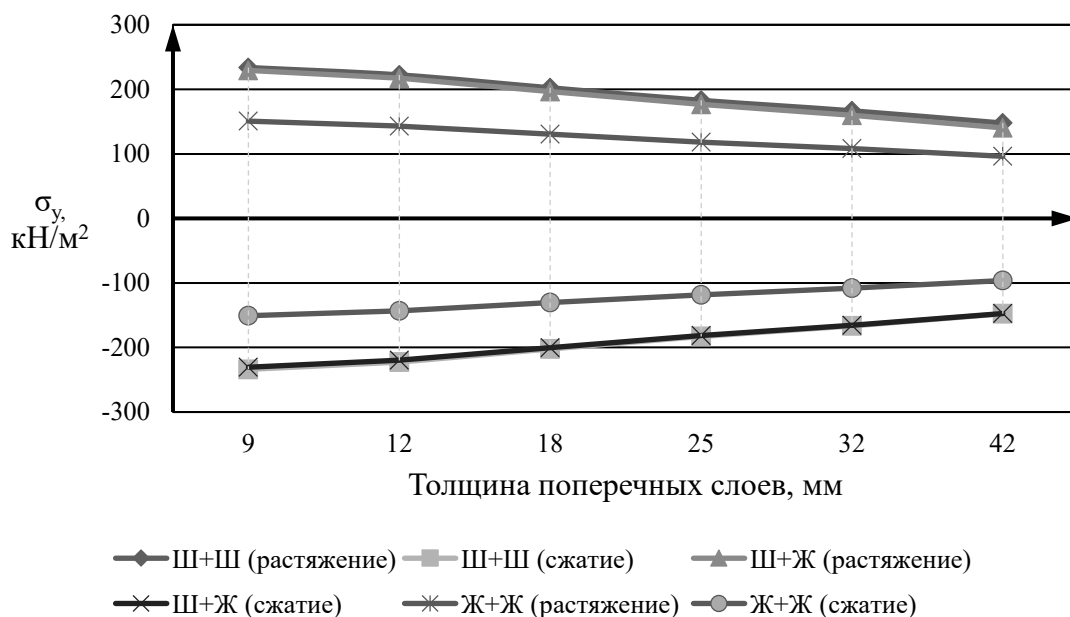


Рисунок 2.19 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_y в наружных продольных слоях (1, 5) от толщины поперечных слоев пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

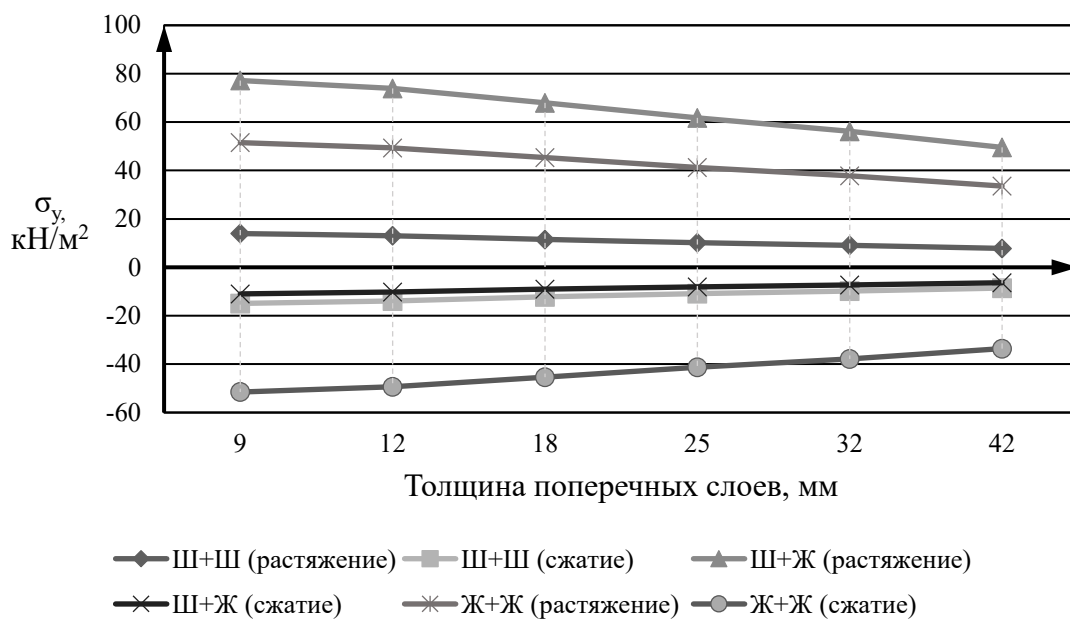


Рисунок 2.20 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_y в среднем продольном слое (3) от толщины поперечных слоев пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Результаты исследований влияния толщины продольных слоев на деформации и напряжения в пятислойной плите перекрытия из ДПК приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты численных исследований зависимости деформаций и напряжений пятислойной плиты перекрытия из ДПК от толщины продольных слоев при различных условиях опирания

Параметр	Слои	Опираение	Толщина продольных слоев, мм					
			9	12	18	25	32	42
Максимальный прогиб W_0 (мм) при условии опирания:	1-5	Ш+Ш	7,96	5,49	3,05	1,80	1,17	0,70
		Ш+Ж	2,88	2,03	1,15	0,69	0,46	0,28
		Ж+Ж	1,73	1,25	0,73	0,45	0,30	0,19
Нормальные растягивающие напряжения $\sigma_{ураст}$ (кН/м ²) при условии опирания:	1,5	Ш+Ш	1115,1	799,6	484,3	312,8	221,0	147,7
		Ш+Ж	1206,8	848,2	497,7	312,3	215,5	140,3
		Ж+Ж	791,7	556,7	326,8	205,2	141,7	96,2
	2, 4	Ш+Ш	22,1	15,8	9,6	6,2	4,4	2,9
		Ш+Ж	32,8	23,1	13,5	8,3	5,7	3,9
		Ж+Ж	21,7	15,3	8,9	5,5	3,8	2,6
	3	Ш+Ш	43,5	32,6	21,2	14,7	11,0	7,8
		Ш+Ж	434,9	314,4	192,1	119,8	80,2	49,6
		Ж+Ж	291,1	211,3	129,0	80,4	53,8	33,6
Нормальные сжимающие напряжения $\sigma_{усжат}$ (кН/м ²) при условии опирания:	1,5	Ш+Ш	-1115,2	-799,6	-484,3	-312,9	-221,0	-147,7
		Ш+Ж	-946,2	-697,7	-442,3	-296,9	-215,4	-147,4
		Ж+Ж	-791,7	-556,7	-326,8	-205,2	-141,7	-96,3
	2, 4	Ш+Ш	-22,1	-15,8	-9,6	-6,2	-4,4	-2,9
		Ш+Ж	-22,2	-16,2	-9,9	-6,3	-4,3	-2,8
		Ж+Ж	-21,7	-15,3	-8,9	-5,5	-3,8	-2,6
	3	Ш+Ш	-43,4	-32,8	-21,6	-15,2	-11,6	-8,6
		Ш+Ж	-39,3	-25,0	-16,1	-11,3	-8,7	-6,4
		Ж+Ж	-291,1	-211,3	-129,0	-80,4	-53,9	-33,6

Построены графики выявленных зависимостей максимального прогиба и напряжений от толщины продольных слоев в пятислойной плите перекрытия из ДПК (рисунки 2.21-2.23). Графики напряжений построены для продольных слоев (1, 3 и 5).

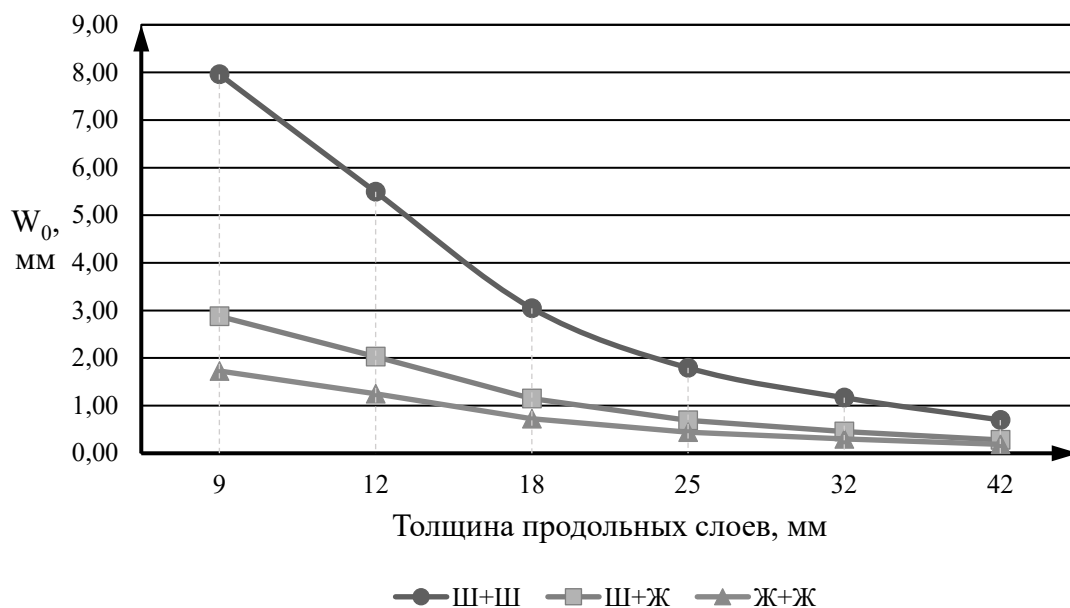


Рисунок 2.21 – Зависимость максимального прогиба от толщины продольных слоев ламелей пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

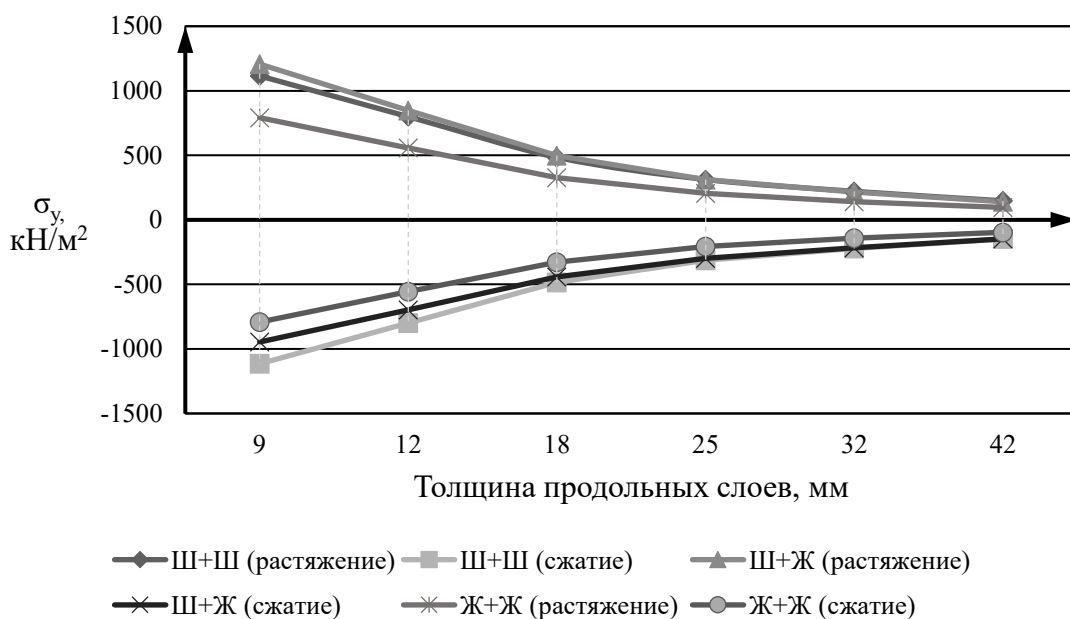


Рисунок 2.22 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_y в наружных продольных слоях (1, 5) от толщины продольных слоев пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

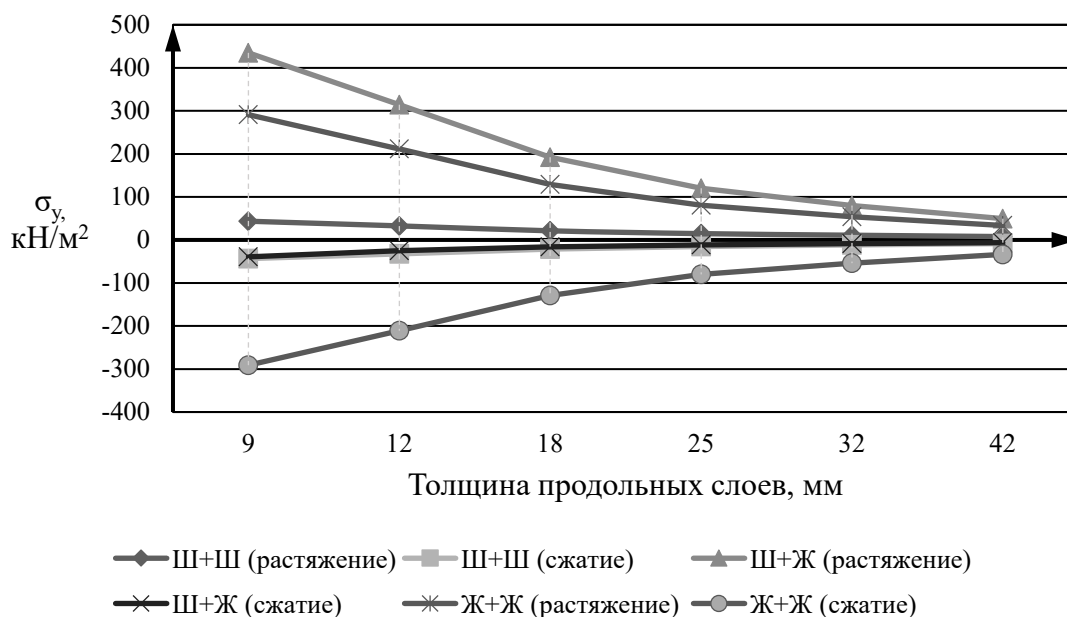


Рисунок 2.23 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_y в среднем продольном слое (3) от толщины продольных слоев пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Полученные результаты показывают:

- уменьшение толщины продольных слоев является ключевым фактором, определяющим деформативность плиты. Этот параметр вызывает наиболее значительное снижение общей жесткости сечения, что приводит к росту максимального прогиба в 11 раз;
- влияние толщины поперечных слоев остается вспомогательным (прогиб увеличивается в 2,5 раза), подтверждая их основную роль в обеспечении межслойной сдвиговой связи, а не в формировании изгибной жесткости;
- общий характер распределения напряжений и деформаций, а также их зависимость от условий опирания, согласуется с результатами, полученными для трехслойной плиты перекрытия из ДПК.

2.4 Выводы по второй главе

1. Теоретически установлена закономерность (2.38) для плит перекрытия из древесины перекрестноклееной при линейно-упругой работе конструкции. Доказана возможность выражения этой взаимосвязи через постоянный для заданных условий опирания коэффициент пропорциональности K .

2. Аналитически вычислены значения коэффициента K для различных условий двустороннего опирания. При этом достигнута высокая сходимость полученных результатов с данными Коробко В.И. для изотропных пластин.

3. Установлены зависимости нормальных напряжений и максимального прогиба в плитах перекрытия из ДПК при действии статической нагрузки от изменения геометрических параметров слоев и условий опирания.

4. Показано, что наибольшее влияние на деформативность и несущую способность оказывает толщина продольных слоев. Уменьшение их толщины с 42 мм до 9 мм вызывает наиболее критическое снижение общей жесткости, приводящее к росту прогиба более чем в 10 раз, при этом наибольшее значение напряжений возникает в наружных продольных слоях.

5. Определено, что толщина поперечных слоев оказывает значительное, но вторичное влияние на деформативность и несущую способность плит перекрытия из ДПК. Вклад в изменение максимального прогиба многократно меньше, чем от изменения толщины продольных слоев.

6. Установлено, что шаг в поперечных слоях плит перекрытия из ДПК не оказывает существенного влияния на изгибную жесткость плит перекрытия, но влияет на сопротивление сдвигу. Влияние этих параметров возрастает в конструкциях с меньшим отношением пролета к толщине L/h и при увеличении жесткости узла опирания.

7. Доказано, что полученные зависимости сохраняются при переходе от трехслойной к пятислойной конструкции и при различных условиях двустороннего опирания при отношении пролета к толщине $L/h \approx 30$ и более.

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ МАКСИМАЛЬНОГО ПРОГИБА И ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПЛИТАХ ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗ ДПК

3.1 Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении шага ламелей в поперечном слое в трехслойных плитах перекрытия

Для исследования закономерности (2.38) для трехслойных плит перекрытия из ДПК был выбран параметр шага ламелей в поперечном слое от 190 мм до 340 мм (см. подглава 2.3.1). Остальные геометрические и нагрузочные параметры были зафиксированы.

Результаты исследований взаимосвязи максимального прогиба плиты и частоты собственных колебаний при изменении шага ламелей в трехслойных плитах перекрытия из ДПК приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты численных исследований взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении шага ламелей в поперечном слое в трехслойных плитах перекрытия из ДПК

		Шаг ламелей в поперечном слое, мм			
		190	240	290	340
Максимальный прогиб W_0 (мм) при условии опирания:	Ш+Ш	25,53	25,89	26,24	26,61
	Ш+Ж	9,45	9,77	10,09	10,45
	Ж+Ж	5,96	6,26	6,56	6,88
Частота собственных колебаний ω (рад/с) при условии опирания:	Ш+Ш	44,03	45,34	46,18	46,71
	Ш+Ж	73,03	74,43	75,05	75,12
	Ж+Ж	92,29	93,34	93,42	92,79
Вес 1 м ² плиты (кН/м ²)		0,6300	0,5872	0,5587	0,5391

Продолжение таблицы 3.1

Расчетное $K = \frac{W_0 \cdot \omega^2}{q/m}$ при условии опирания:	Ш+Ш	1,27151	1,27403	1,27470	1,27632
	Ш+Ж	1,29397	1,29559	1,29508	1,29566
	Ж+Ж	1,30460	1,30516	1,30401	1,30208
K , полученное аналитическим способом при условии опирания:	Ш+Ш	1,26835			
	Ш+Ж	1,28549			
	Ж+Ж	1,28420			
Отклонение $K_{расч}$ от $K_{аналит}$ (%) при условии опирания:	Ш+Ш	0,2	0,4	0,5	0,6
	Ш+Ж	0,7	0,8	0,7	0,8
	Ж+Ж	1,6	1,6	1,5	1,4

По данным таблицы построены графики зависимости максимального прогиба и частоты собственных колебаний от шага ламелей в поперечном слое при различных условиях опирания, изображенные на рисунках 3.1-3.2.

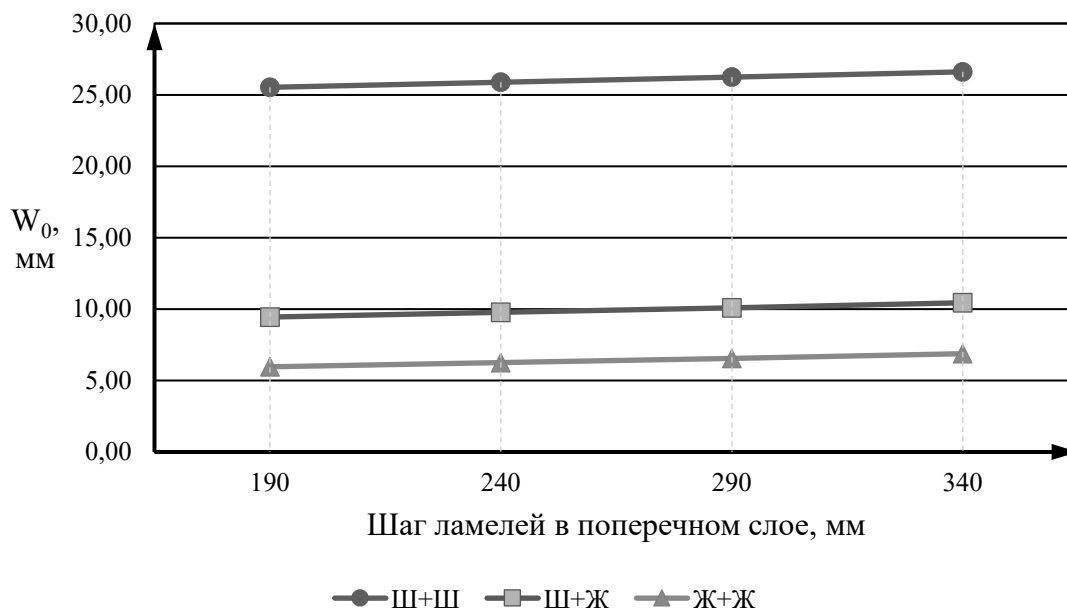


Рисунок 3.1 – Зависимость максимального прогиба от шага ламелей в поперечном слое трехслойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

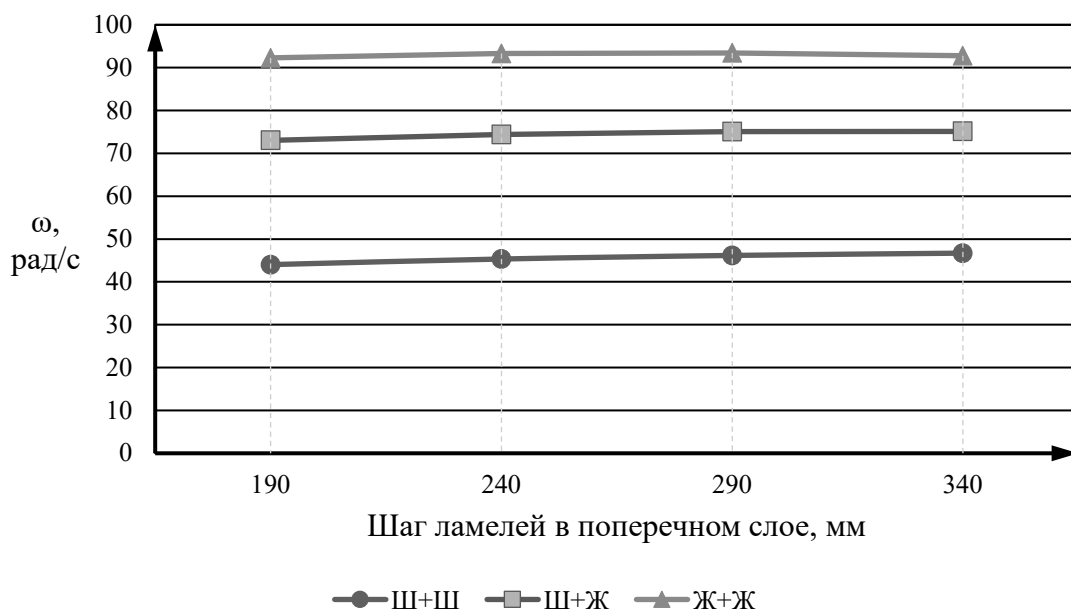


Рисунок 3.2 – Зависимость частоты свободных колебаний от шага ламелей в поперечном слое трехслойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Построен график изменения расчетного коэффициента K при изменении шага в поперечном слое, изображенный на рисунке 3.3.

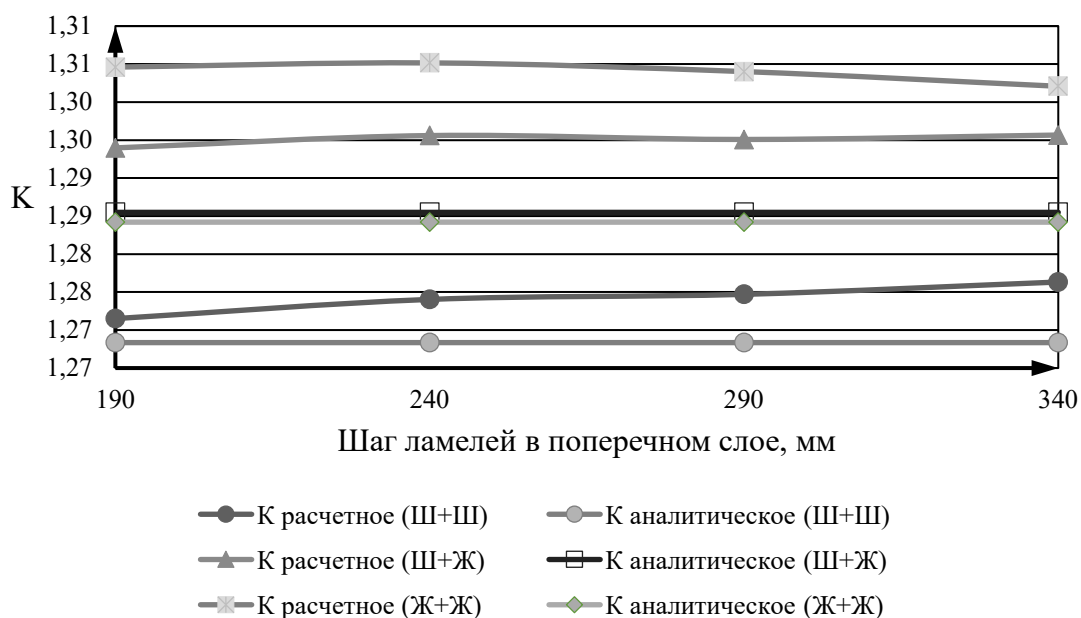


Рисунок 3.3 – Изменение расчетного коэффициента K при изменении шага ламелей в поперечном слое трехслойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- при увеличении шага ламелей в поперечном слое трехслойной плиты перекрытия из ДПК одновременно увеличиваются прогиб (за счёт снижения изгибной жёсткости сечения) и частота собственных колебаний (за счёт снижения веса плиты перекрытия) при всех условиях опирания;
- для всех видов условий опирания сохраняется фундаментальная взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний. При этом, наибольшие значения отклонений возникают при жестком защемлении плиты с двух сторон и изменяются от 1,4 % до 1,6 % по мере увеличения шага в поперечном слое, что является достаточно приближенным к аналитическому значению коэффициента K ;
- для всех видов условий опирания по мере увеличения шага в поперечном слое плиты график зависимости K от величины шага ламелей остается практически параллельным оси абсцисс, что свидетельствует о неизменном значении коэффициента пропорциональности независимо от величины зазоров в поперечном слое.

3.2 Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении толщины продольных и поперечного слоев в трехслойных плитах перекрытия

Исследованы трехслойные плиты перекрытия из ДПК с изменяемой толщиной продольных и поперечного слоев с помощью закономерности (2.38). Статическое нагружение плиты задано равномерно распределенной нагрузкой, равной $0,25 \text{ кН/м}^2$.

Результаты исследований взаимосвязи максимального прогиба плиты и частоты собственных колебаний при изменении толщины поперечного слоя и

неизменной толщине продольных слоев в трехслойной плите перекрытия из ДПК приведены в таблице 3.2.

По данным таблицы построены графики зависимости максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении толщины поперечного слоя для каждого вида опирания, изображенные на рисунках 3.4-3.5.

Таблица 3.2 – Результаты численных исследований взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении толщины поперечного слоя в трехслойных плитах перекрытия из ДПК

		Толщина поперечного слоя, мм					
		9	12	18	25	32	42
Максимальный прогиб W_0 (мм) при условии опирания:	Ш+Ш	5,91	5,34	4,54	3,78	3,19	2,55
	Ш+Ж	1,98	1,86	1,60	1,35	1,16	0,94
	Ж+Ж	1,23	1,16	1,00	0,85	0,73	0,60
Частота собственных колебаний ω (рад/с) при условии опирания:	Ш+Ш	33,80	34,80	36,73	38,93	41,05	44,03
	Ш+Ж	58,95	60,38	63,19	66,23	68,90	73,03
	Ж+Ж	75,13	76,20	79,48	83,36	86,88	92,29
Вес 1 м ² плиты (кН/м ²)		0,4650	0,4800	0,5100	0,5450	0,5800	0,6300
Расчетное $K = \frac{W_0 \cdot \omega^2}{q/t}$ при условии опирания:	Ш+Ш	1,28059	1,27978	1,27378	1,27365	1,27202	1,27139
	Ш+Ж	1,30710	1,30636	1,30613	1,30602	1,30506	1,29397
	Ж+Ж	1,32064	1,31783	1,31408	1,31246	1,30901	1,30468
K , полученное аналитическим способом при условии опирания:	Ш+Ш	1,26835					
	Ш+Ж	1,28549					
	Ж+Ж	1,28420					
Отклонение $K_{расч}$ от $K_{аналит}$ (%) при условии опирания:	Ш+Ш	1,0	0,9	0,4	0,4	0,3	0,2
	Ш+Ж	1,7	1,6	1,6	1,6	1,5	0,7
	Ж+Ж	2,8	2,6	2,3	2,2	1,9	1,6

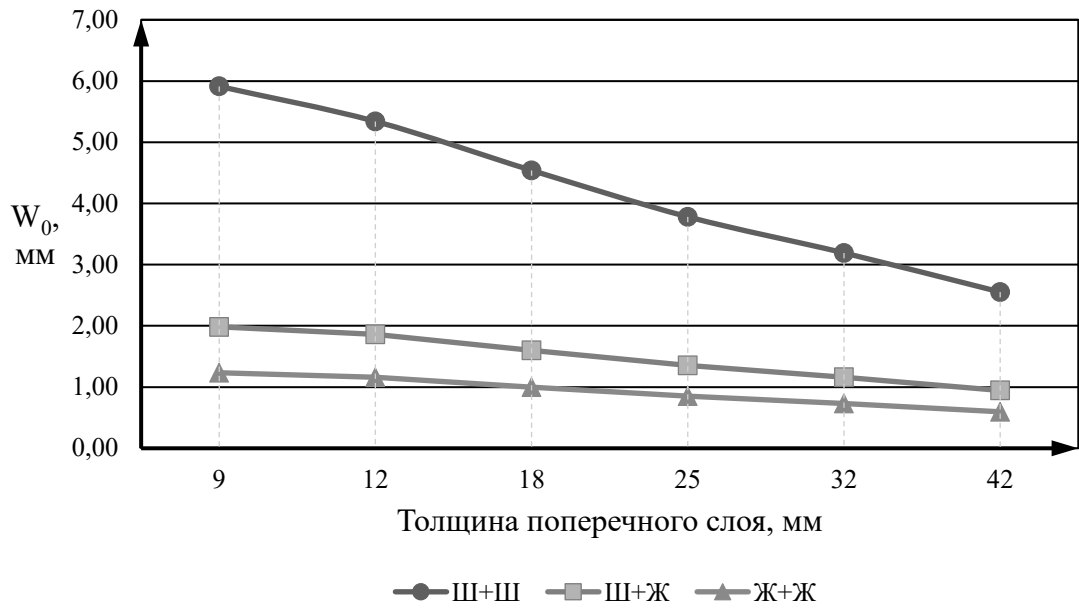


Рисунок 3.4 – Зависимость максимального прогиба от толщины поперечного слоя в трехслойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

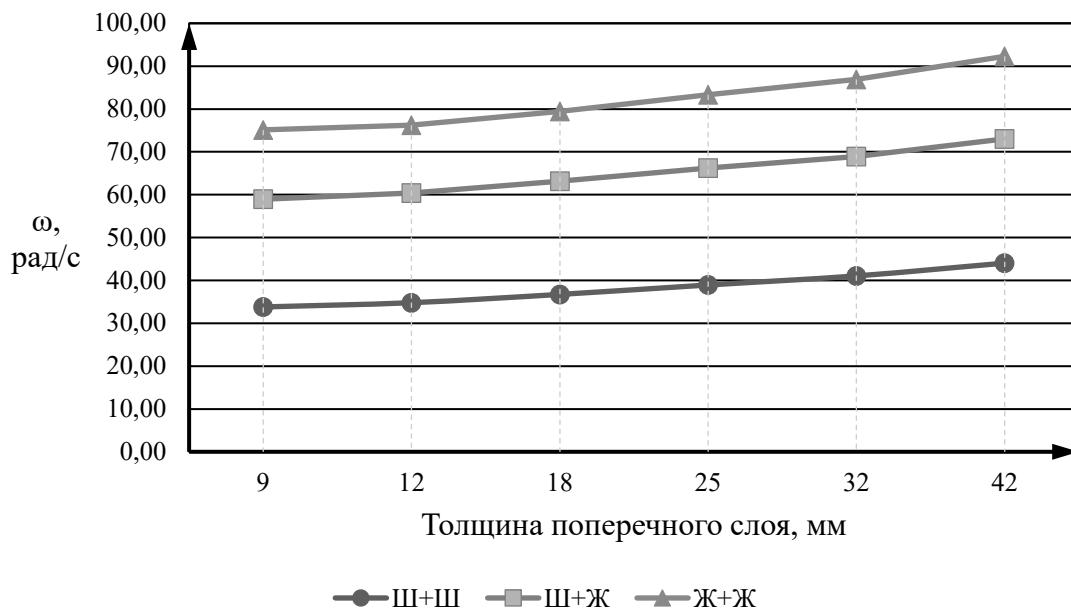


Рисунок 3.5 – Зависимость частоты свободных колебаний от толщины поперечного слоя в трехслойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Построен график изменения расчетного коэффициента K при изменении толщины поперечного слоя в трехслойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания, изображенный на рисунке 3.6.

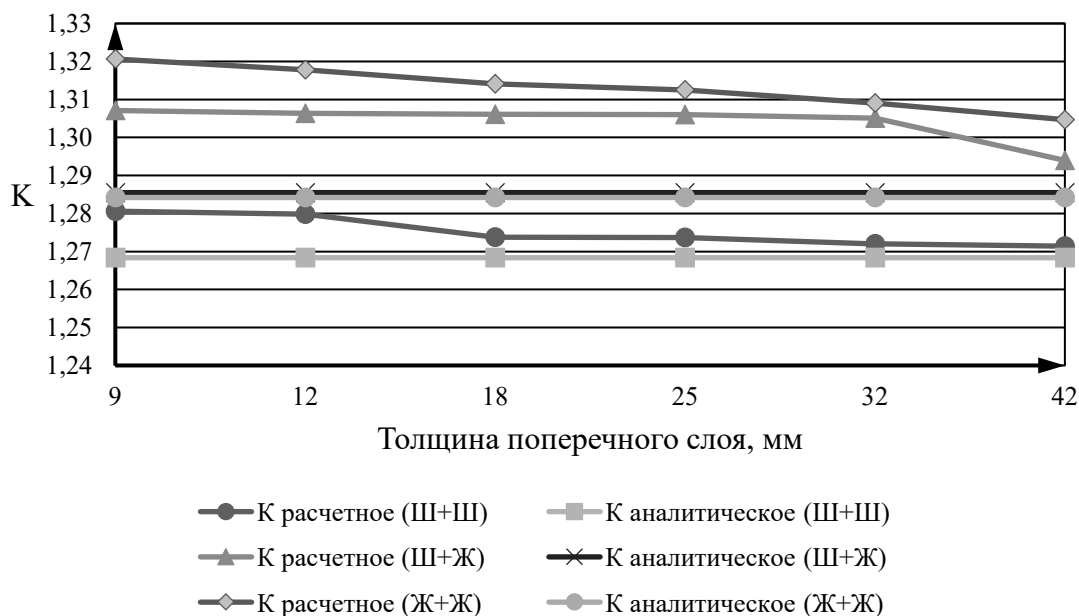


Рисунок 3.6 – Изменение расчетного коэффициента K при изменении толщины поперечного слоя в трехслойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Результаты исследований взаимосвязи максимального прогиба плиты и частоты собственных колебаний при изменении толщины продольных слоев и неизменной толщине поперечного слоя в трехслойной плите перекрытия из ДПК приведены в таблице 3.3. По данным таблицы построены графики зависимости максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении толщины продольного слоя для каждого вида опирания, изображенные на рисунках 3.7-3.8.

Таблица 3.3 – Результаты численных исследований взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении толщины продольных слоев в трехслойных плитах перекрытия из ДПК

		Толщина продольных слоев, мм					
		9	12	18	25	32	42
Максимальный прогиб W_0 (мм) при условии опирания:	Ш+Ш	31,94	21,64	11,75	6,78	4,34	2,55
	Ш+Ж	11,64	7,91	4,31	2,50	1,60	0,94
	Ж+Ж	6,66	4,62	2,57	1,52	0,99	0,60
Частота собственных колебаний ω (рад/с) при условии опирания:	Ш+Ш	18,02	20,88	26,08	31,60	36,83	44,03
	Ш+Ж	30,11	34,83	43,43	52,56	61,10	73,03
	Ж+Ж	40,03	45,78	56,46	67,57	78,00	92,29
Вес 1 м ² плиты (кН/м ²)		0,3000	0,3300	0,3900	0,4600	0,5300	0,6300
Расчетное $K = \frac{W_0 \cdot \omega^2}{q/t}$ при условии опирания:	Ш+Ш	1,26861	1,26922	1,27043	1,27078	1,27161	1,27139
	Ш+Ж	1,29098	1,29154	1,29349	1,29371	1,29359	1,29397
	Ж+Ж	1,30466	1,30392	1,30404	1,30396	1,30422	1,30468
K , полученное аналитическим способом при условии опирания:	Ш+Ш	1,26835					
	Ш+Ж	1,28549					
	Ж+Ж	1,28420					
Отклонение $K_{расч}$ от $K_{аналит}$ (%) при условии опирания:	Ш+Ш	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2
	Ш+Ж	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7
	Ж+Ж	1,6	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6

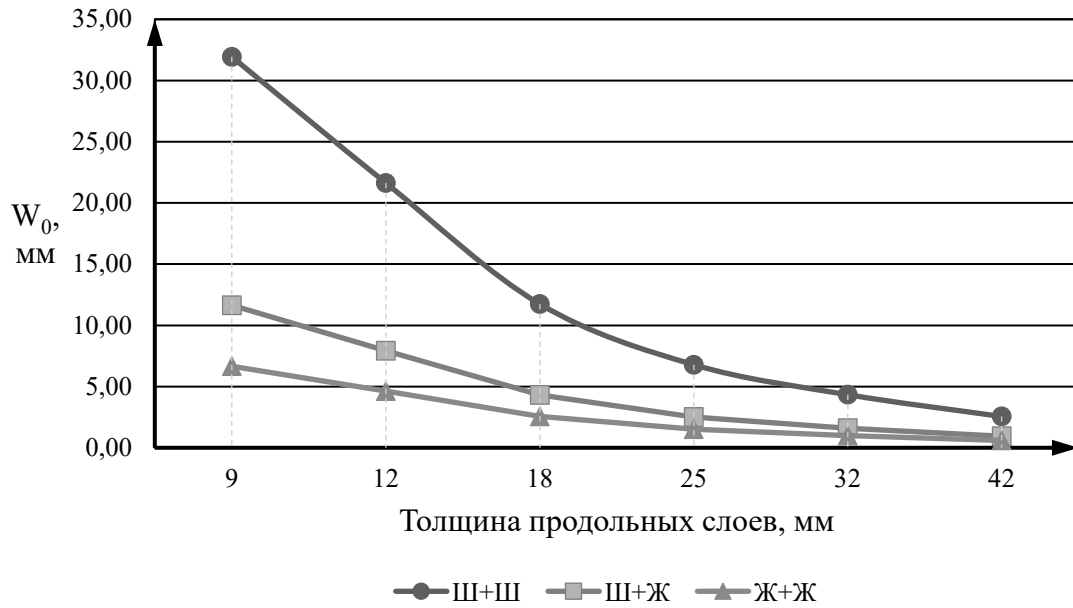


Рисунок 3.7 – Зависимость максимального прогиба от толщины продольных слоев в трехслойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

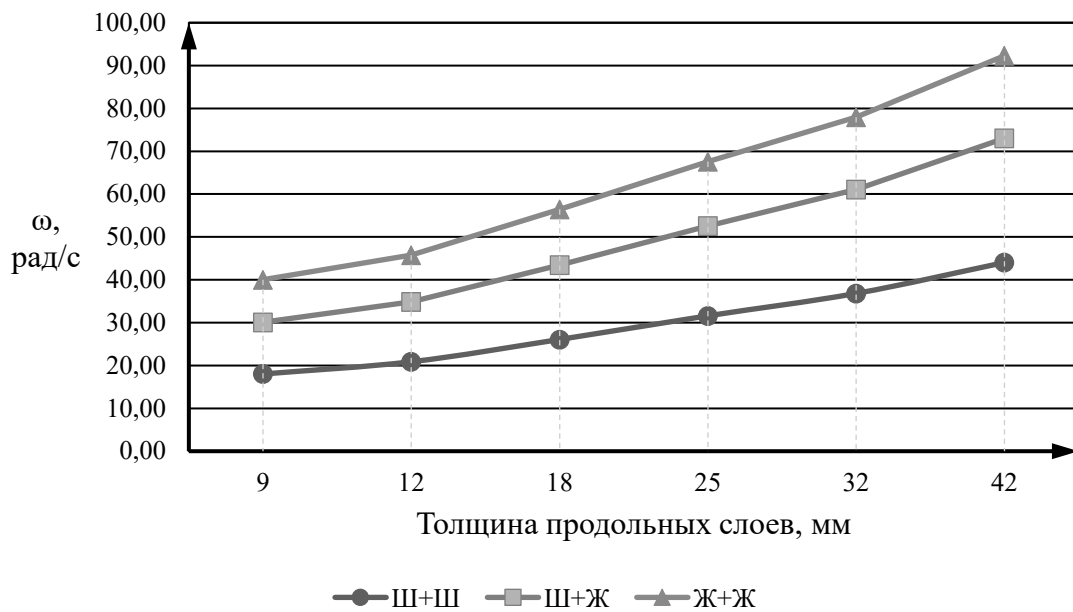


Рисунок 3.8 – Зависимость частоты свободных колебаний от толщины продольных слоев в трехслойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Построен график изменения расчетного коэффициента K при изменении толщины продольных слоев в трехслойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания, изображенный на рисунке 3.9.

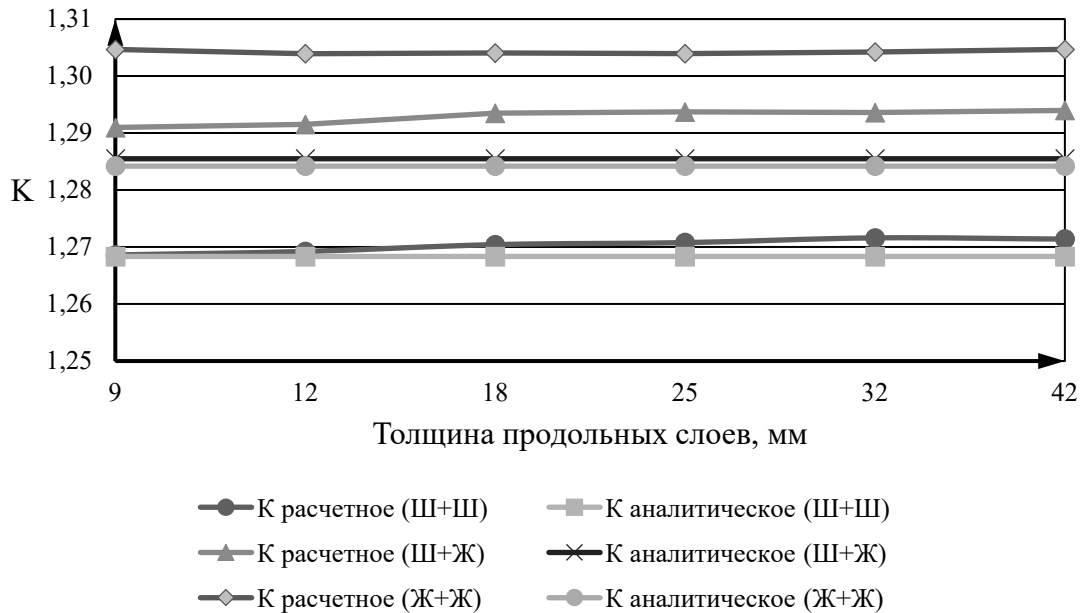


Рисунок 3.9 – Изменение расчетного коэффициента K при изменении толщины продольных слоев в трехслойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- для всех видов условий опирания сохраняется фундаментальная взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний. Наибольшие отклонения от аналитического значения K возникают при изменении толщины поперечного слоя при жестком защемлении плиты и варьируются от 1,6 % до 2,8 %;

- при увеличении толщины продольных слоев незначительно возрастает значение коэффициента K для всех видов опирания. При увеличении толщины поперечного слоя – наоборот.

3.3 Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении шага ламелей в поперечных слоях в пятислойных плитах перекрытия

Исследованы пятислойные плиты из ДПК с шагом с продольным расположением волокон в наружных и среднем слоях (порядковые номера – 1, 3, 5) и поперечным расположением волокон во внутренних слоях (порядковые номера – 2, 4). Шаг ламелей s в поперечных слоях изменялся с ступенями по 50 мм – 190 мм (сплошное сечение), 240 мм, 290 мм и 340 мм.

Статическое нагружение плиты задано равномерно распределенной нагрузкой 2,5 кН/м². Результаты исследований взаимосвязи максимального прогиба плиты и частоты собственных колебаний при изменении шага ламелей в поперечных слоях в пятислойной плите перекрытия из ДПК приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты численных исследований взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении шага ламелей в поперечных слоях в пятислойных плитах перекрытия из ДПК

		Шаг ламелей в поперечных слоях, мм			
		190	240	290	340
Максимальный прогиб W_0 (мм) при условии опирания:	Ш+Ш	7,01	7,27	7,49	7,64
	Ш+Ж	2,80	2,99	3,17	3,39
	Ж+Ж	1,88	2,13	2,22	2,43
Частота собственных колебаний ω (рад/с) при условии опирания:	Ш+Ш	64,78	66,45	67,52	68,41
	Ш+Ж	103,41	104,59	104,40	103,31
	Ж+Ж	126,44	126,44	124,89	122,31
Вес 1 м ² плиты (кН/м ²)		1,0500	0,9644	0,9074	0,8682
Расчетное $K = \frac{W_0 * \omega^2}{q/m}$ при условии опирания:	Ш+Ш	1,25945	1,26237	1,26337	1,26510
	Ш+Ж	1,28193	1,28153	1,28027	1,28049
	Ж+Ж	1,28679	1,28888	1,28681	1,28627

Продолжение таблицы 3.4

K , полученное аналитическим способом при условии опирания:	Ш+Ш	1,26835			
	Ш+Ж	1,28549			
	Ж+Ж	1,28420			
Отклонение $K_{расч}$ от $K_{аналит}$ (%) при условии опирания:	Ш+Ш	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3
	Ш+Ж	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4
	Ж+Ж	0,2	0,4	0,2	0,2

По данным таблицы построены графики зависимости максимального прогиба и частоты собственных колебаний для каждого вида опирания, изображенные на рисунках 3.10-3.11.

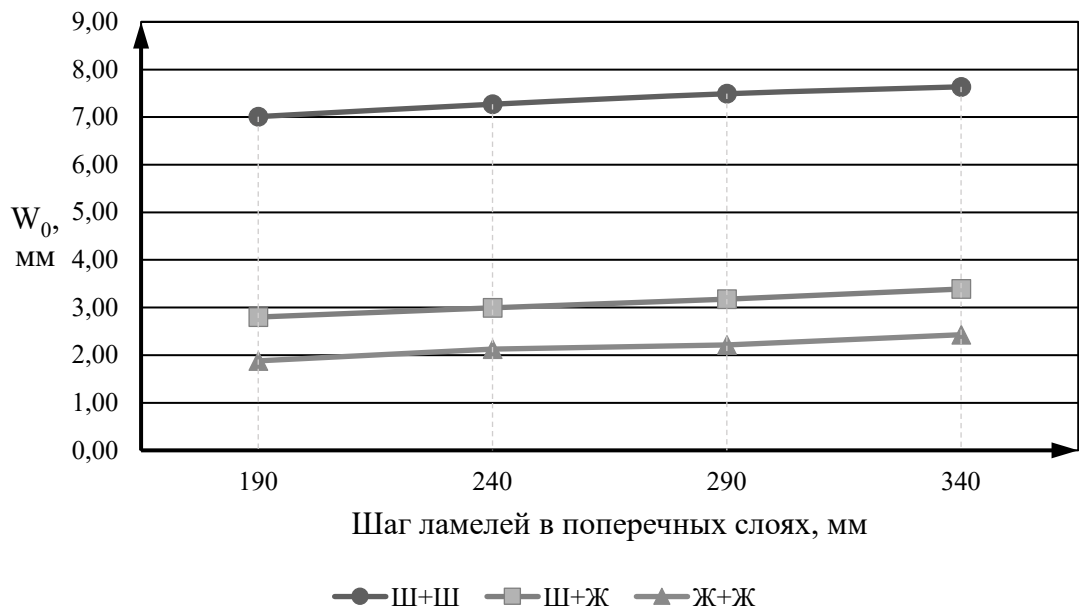


Рисунок 3.10 – Зависимость максимального прогиба от шага ламелей в поперечных слоях пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

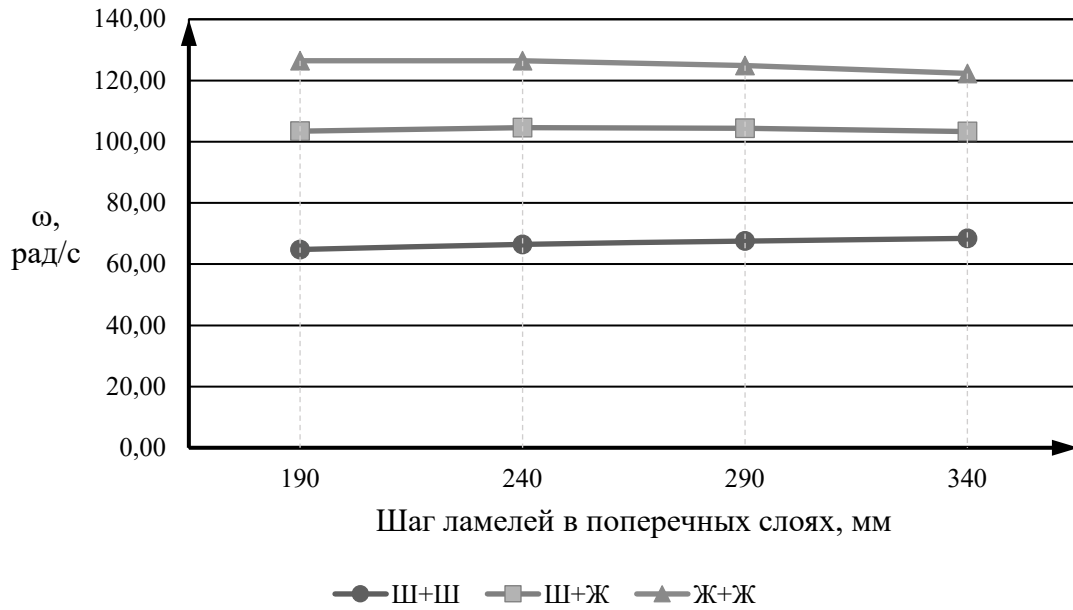


Рисунок 3.11 – Зависимость частоты свободных колебаний от шага ламелей в поперечных слоях пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Построен график изменения расчетного коэффициента K при изменении шага в поперечных слоях пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания, изображенный на рисунке 3.12.

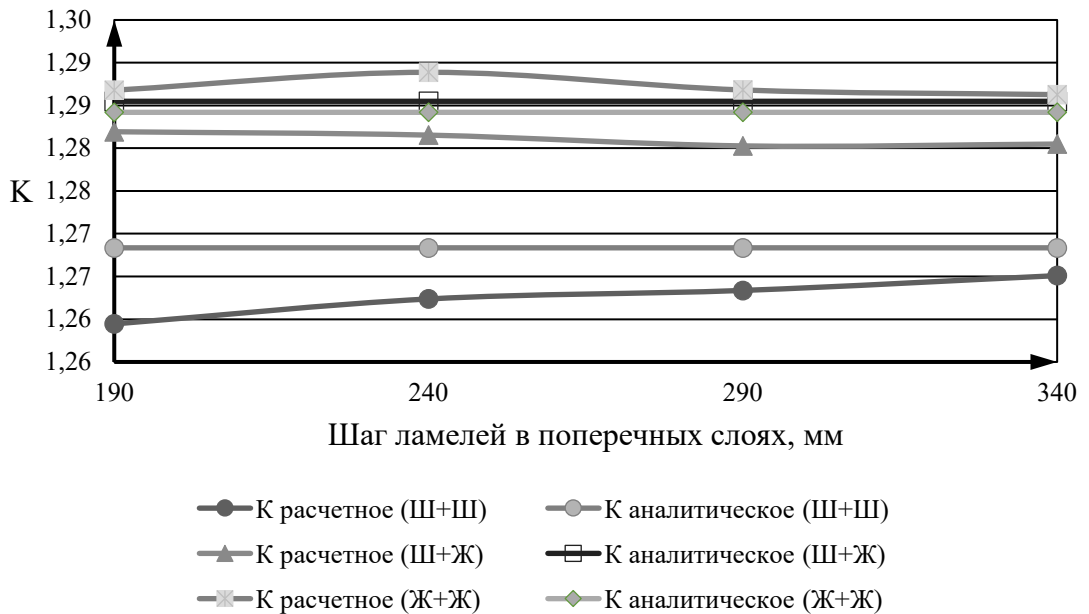


Рисунок 3.12 – Изменение расчетного коэффициента K при изменении шага ламелей в поперечных слоях пятислойной плиты перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- для всех видов условий опирания при изменении шага в поперечных слоях пятислойной плите перекрытия из ДПК сохраняется фундаментальная взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний по закономерности (2.38). При этом сходимость расчетного и аналитического значений K возрастает по сравнению с такой же конфигурацией трехслойной плиты перекрытия. При шарнирном опирании и при жестком защемлении с шарниром отклонения составляют менее 1 %;
- для всех видов условий опирания по мере увеличения шага в поперечных слоях пятислойной плите перекрытия из ДПК возрастает расчетное значение коэффициента K .

3.4 Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении толщины продольных и поперечных слоев в пятислойных плитах перекрытия

Исследованы пятислойные плиты перекрытия из ДПК с продольным расположением ламелей в наружных и центральном внутреннем слое (порядковые номера – 1, 3, 5) и поперечным расположением ламелей во внутренних слоях (порядковые номера – 2, 4) с изменяемой толщиной продольных слоев и с изменяемой толщиной поперечного слоя. Конфигурация аналогична исследованной в подглаве 2.3.4 Нагружение плиты задано равномерно распределенной нагрузкой, равной $0,25 \text{ кН/м}^2$.

Результаты исследований взаимосвязи максимального прогиба плиты и частоты собственных колебаний при изменении толщины поперечных слоев в пятислойной плите перекрытия из ДПК приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты численных исследований взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении толщины поперечных слоев в пятислойных плитах перекрытия из ДПК

		Толщина поперечных слоев, мм					
		9	12	18	25	32	42
Максимальный прогиб W_0 (мм) при условии опирания:	Ш+Ш	1,70	1,53	1,28	1,05	0,88	0,70
	Ш+Ж	0,59	0,55	0,47	0,40	0,34	0,28
	Ж+Ж	0,37	0,36	0,31	0,26	0,23	0,19
Частота собственных колебаний ω (рад/с) при условии опирания:	Ш+Ш	50,53	52,08	54,90	57,94	60,98	64,78
	Ш+Ж	86,65	87,26	90,62	94,51	98,04	103,41
	Ж+Ж	109,29	109,32	112,80	116,91	120,57	126,44
Вес 1 м ² плиты (кН/м ²)		0,7200	0,7500	0,8100	0,8800	0,9500	1,0500
Расчетное $K = \frac{W_0 * \omega^2}{q/m}$ при условии опирания:	Ш+Ш	1,27085	1,27171	1,27036	1,26795	1,26480	1,25945
	Ш+Ж	1,29685	1,28941	1,28621	1,28408	1,28265	1,28193
	Ж+Ж	1,30891	1,30100	1,29668	1,29298	1,28976	1,28679
K , полученное аналитическим способом при условии опирания:	Ш+Ш	1,26835					
	Ш+Ж	1,28549					
	Ж+Ж	1,28420					
Отклонение $K_{расч}$ от $K_{аналит}$ (%) при условии опирания:	Ш+Ш	0,2	0,3	0,2	0,0	-0,3	-0,7
	Ш+Ж	0,9	0,3	0,1	-0,1	-0,2	-0,3
	Ж+Ж	1,9	1,3	1,0	0,7	0,4	0,2

По данным таблицы построены графики зависимости максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении толщины поперечных слоев для каждого вида опирания, изображенные на рисунках 3.13-3.14.

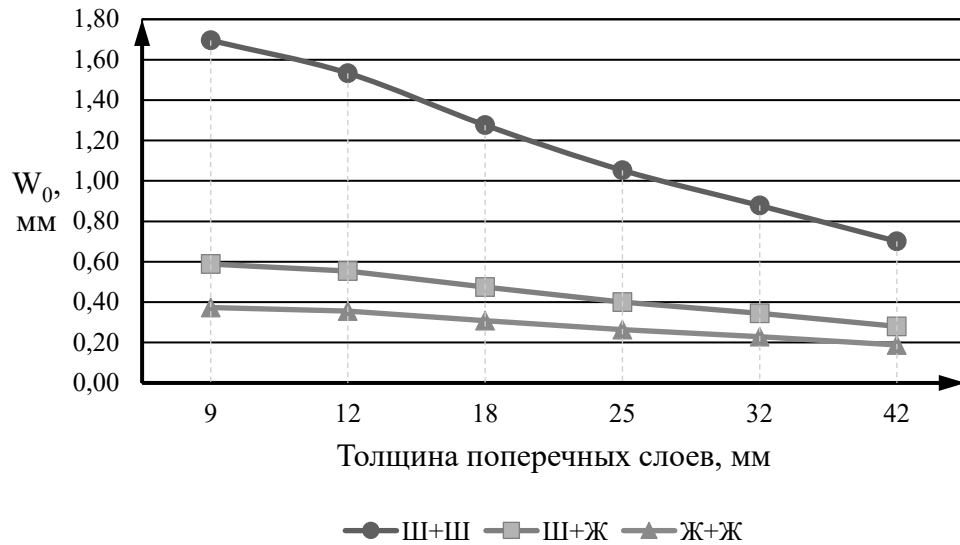


Рисунок 3.13 – Зависимость максимального прогиба от толщины поперечных слоев в пятислойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

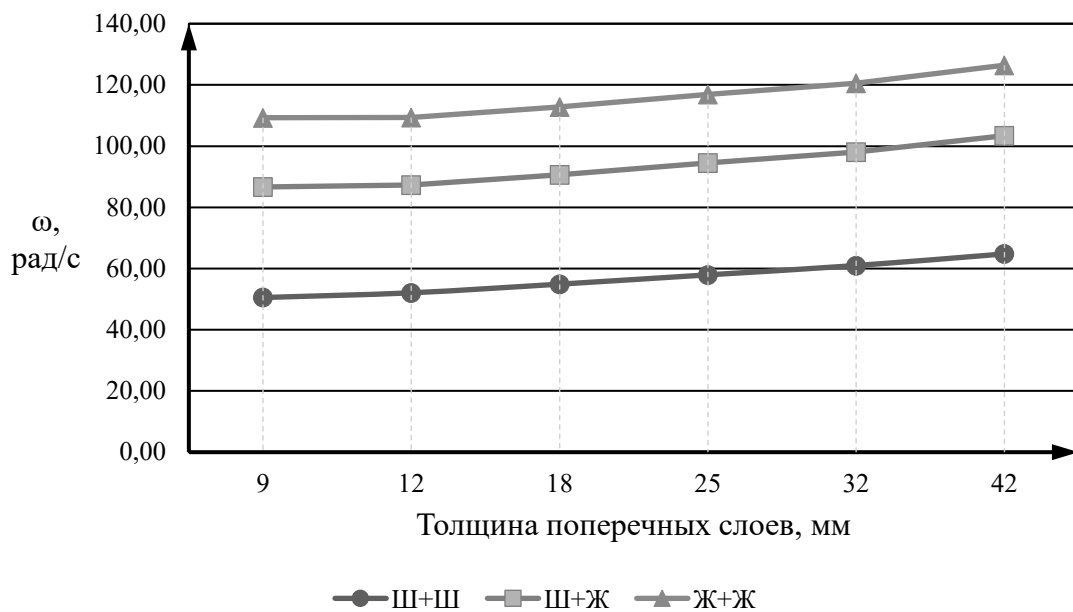


Рисунок 3.14 – Зависимость частоты свободных колебаний от толщины поперечных слоев в пятислойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Построен график изменения расчетного коэффициента K при изменении толщины поперечных слоев в пятислойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания, изображенный на рисунке 3.15.

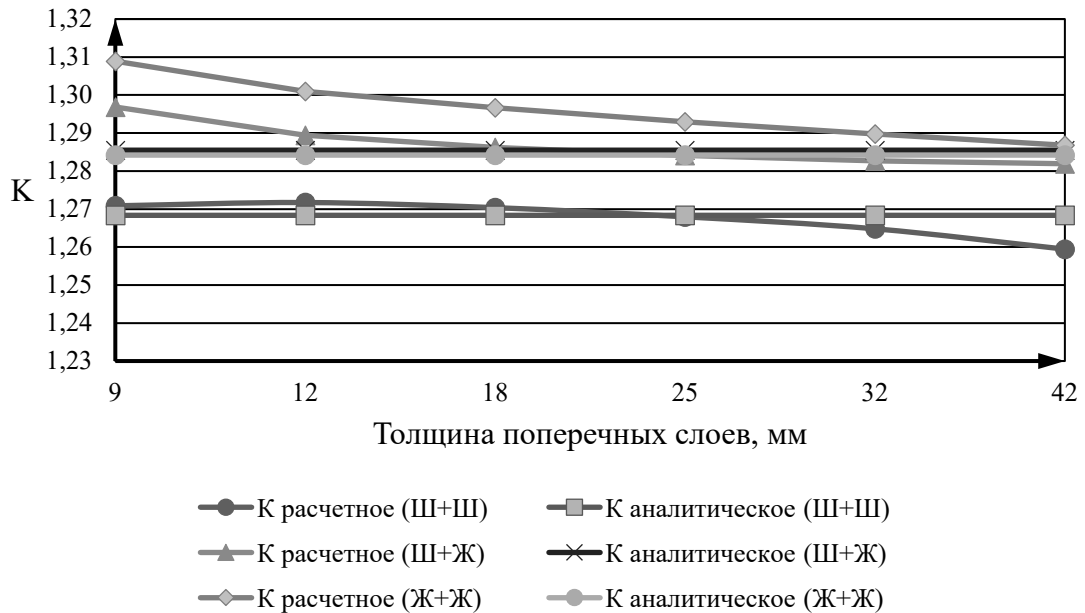


Рисунок 3.15 – Изменение расчетного коэффициента K при изменении толщины поперечных слоев в пятислойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Результаты исследований взаимосвязи максимального прогиба плиты и частоты собственных колебаний при изменении толщины продольных слоев в пятислойной плите перекрытия из ДПК приведены в таблице 3.6. По данным таблицы построен график взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении толщины продольных слоев для каждого вида опирания, изображенные на рисунках 3.16-3.17.

Таблица 3.6 – Результаты численных исследований взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении толщины продольных слоев в пятислойных плитах перекрытия из ДПК

		Толщина продольных слоев, мм					
		9	12	18	25	32	42
Максимальный прогиб W_0 (мм) при условии опирания:	Ш+Ш	7,96	5,49	3,05	1,80	7,96	5,49
	Ш+Ж	2,88	2,03	1,15	0,69	2,88	2,03
	Ж+Ж	1,73	1,25	0,73	0,45	1,73	1,25
Частота собственных колебаний ω (рад/с) при условии опирания:	Ш+Ш	26,51	30,70	38,41	46,60	26,51	30,70
	Ш+Ж	44,49	50,93	63,05	75,74	44,49	50,93
	Ж+Ж	57,65	65,14	79,59	94,52	57,65	65,14
Вес 1 м ² плиты (кН/м ²)		0,5550	0,6000	0,6900	0,7950	0,9000	1,0500
Расчетное $K = \frac{W_0 \cdot \omega^2}{q/t}$ при условии опирания:	Ш+Ш	1,26608	1,26572	1,26489	1,26361	1,26210	1,25945
	Ш+Ж	1,28857	1,28664	1,28563	1,28448	1,28324	1,28193
	Ж+Ж	1,30054	1,29733	1,29369	1,29125	1,28937	1,28679
K , полученное аналитическим способом при условии опирания:	Ш+Ш	1,26835					
	Ш+Ж	1,28549					
	Ж+Ж	1,28420					
Отклонение $K_{расч}$ от $K_{аналит}$ (%) при условии опирания:	Ш+Ш	-0,2	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,7
	Ш+Ж	0,2	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,3
	Ж+Ж	1,3	1,0	0,7	0,5	0,4	0,2

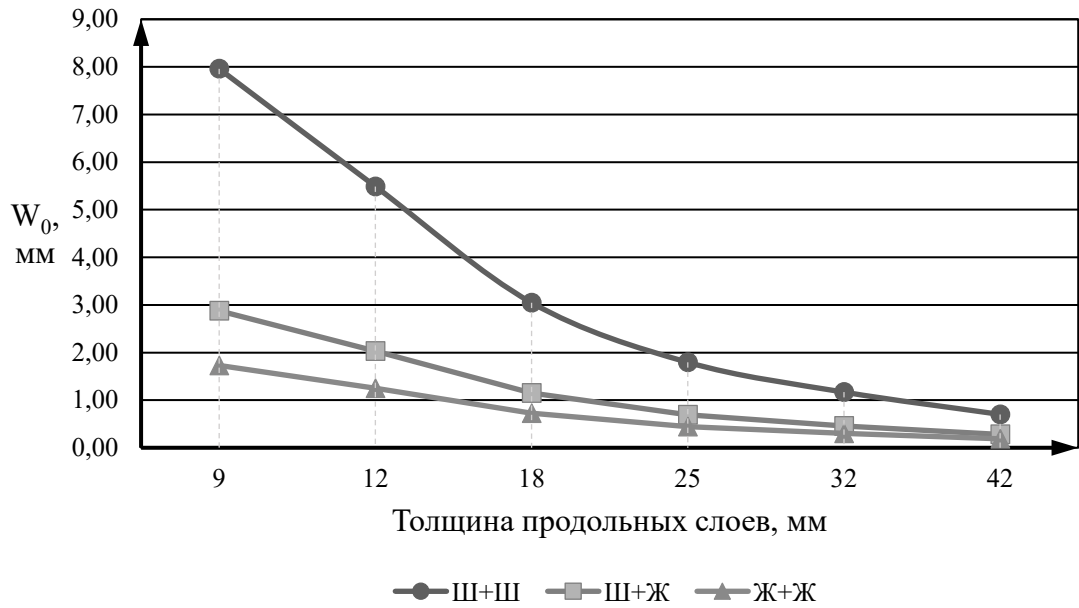


Рисунок 3.16 – Зависимость максимального прогиба от толщины продольных слоев в пятислойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

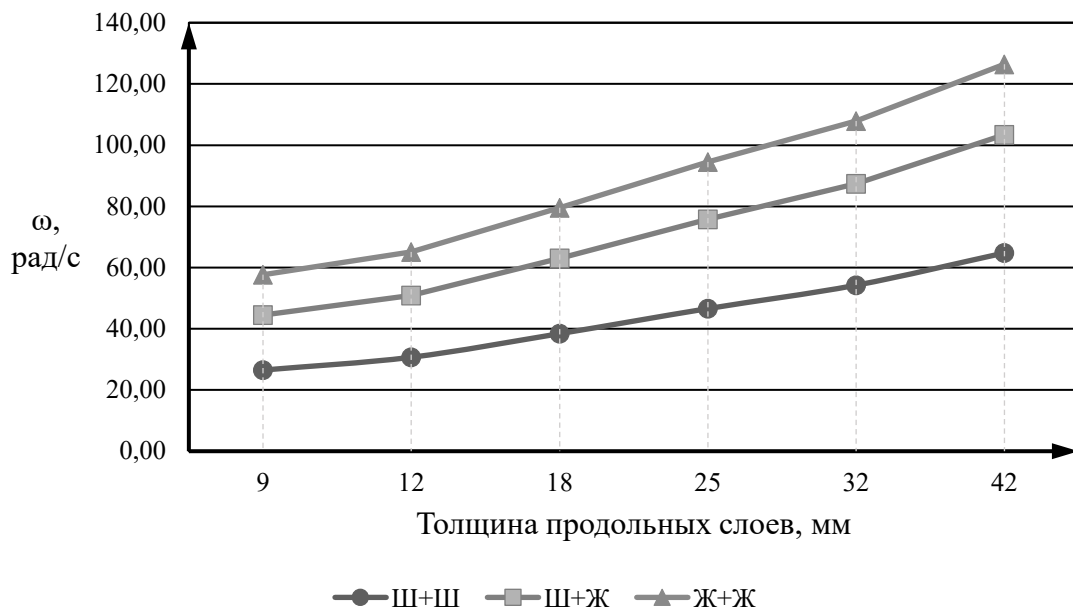


Рисунок 3.17 – Зависимость частоты свободных колебаний от толщины продольных слоев в пятислойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Построен график изменения расчетного коэффициента K при изменении толщины продольных слоев в пятислойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания, изображенный на рисунке 3.18.

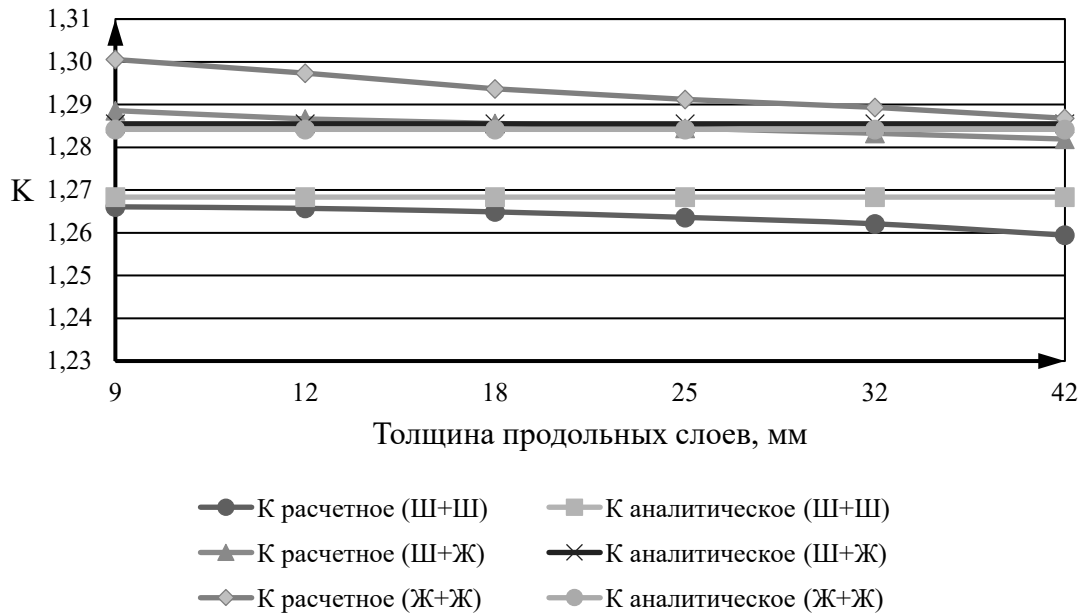


Рисунок 3.18 – Изменение расчетного коэффициента K при изменении толщины продольных слоев в пятислойной плите перекрытия из ДПК при различных условиях опирания

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- при уменьшении толщины продольных и поперечных слоев пятислойной плиты перекрытия из ДПК увеличивается максимальный прогиб и уменьшается частота собственных колебаний при всех видах опирания, как и в случае с трехслойной плитой;
- наибольшие значения отклонений возникают при уменьшении толщины поперечных слоев при жестком защемлении плиты и изменяются от 0,2 % до 1,9 %;
- для пятислойной плиты перекрытия из ДПК сохраняются те же закономерности, что и для трехслойной.

3.5 Выводы по третьей главе

1. Доказано численно, что произведение максимального прогиба на квадрат частоты основного тона собственных колебаний плит перекрытия из ДПК с варьируемыми геометрическими параметрами слоев при различных условиях двустороннего опирания является постоянной величиной, выраженной через коэффициент пропорциональности K .

2. Достигнута высокая сходимость расчетного и аналитического значений коэффициента K (отклонение не выше 3 %). Малое отклонение показывает, что для всех видов двустороннего опирания плит перекрытия из ДПК возможно использовать значения K , с высокой точностью полученные аналитически для изотропных пластин.

3. Во всех исследованиях график значений коэффициента K практически параллелен оси абсцисс, представляющей собой величину геометрического параметра (толщина слоев или шаг ламелей). Это свидетельствует о том, что значение K остается инвариантным при заданных условиях опирания независимо от геометрической конфигурации сечения. При этом значение остается постоянным и для различного количества слоев (рассматривались трех- и пятислойные плиты перекрытия). Практическая ценность заключается в том, что установленное значение K позволяет на основе измеренной в натурных условиях основной частоты собственных колебаний оперативно определять прогиб плиты перекрытия и связанные с ним физико-механические интегральные характеристики

4. Полученные результаты создают основу для разработки методов оценки несущей способности и деформативности плит перекрытия из ДПК по динамическим параметрам в условиях строительного производства и эксплуатационного мониторинга.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗ ДПК

4.1 Испытательный стенд и экспериментальные конструкции для проведения исследований

Ввиду значительного разнообразия рассмотренных ранее конфигураций плит создание экспериментальных образцов, полностью идентичных численным моделям, было практически нереализуемым. В целях обеспечения сопоставимости результатов и сохранения репрезентативности исследуемого поведения конструкций были внесены обоснованные упрощения. Для количественного сопоставления расчетных и экспериментальных данных для каждого образца построены собственные конечно-элементы модели по аналогии с предыдущими главами. Для увеличения точности толщина слоев, используемая в конечно-элементной модели, была измерена штангенциркулем с точностью 0,1 мм.

Для проведения экспериментальных исследований были самостоятельно изготовлены 5 конфигураций плит перекрытия из ДПК с параметрами, приведёнными в таблице 4.1. Габаритные размеры всех образцов в плане составляют 2000x400 мм (длина x ширина). Ламели продольных слоев имеют длину 2000 мм, ширину 100 мм и толщину 10 мм; поперечных слоев – длину 400 мм, ширину 100 мм и толщину 10 мм. При исследовании конфигураций с различной геометрией слоев их толщина увеличивалась путём приклеивания дополнительных досок. Таким образом, сонаправленно склеенные слои учитываются как единый слой. Все ламели выполнены из древесины сосны обыкновенной. Слои соединены с помощью полиуретанового клея (PUR). Влажность досок при склеивании составляла 12 % [18].

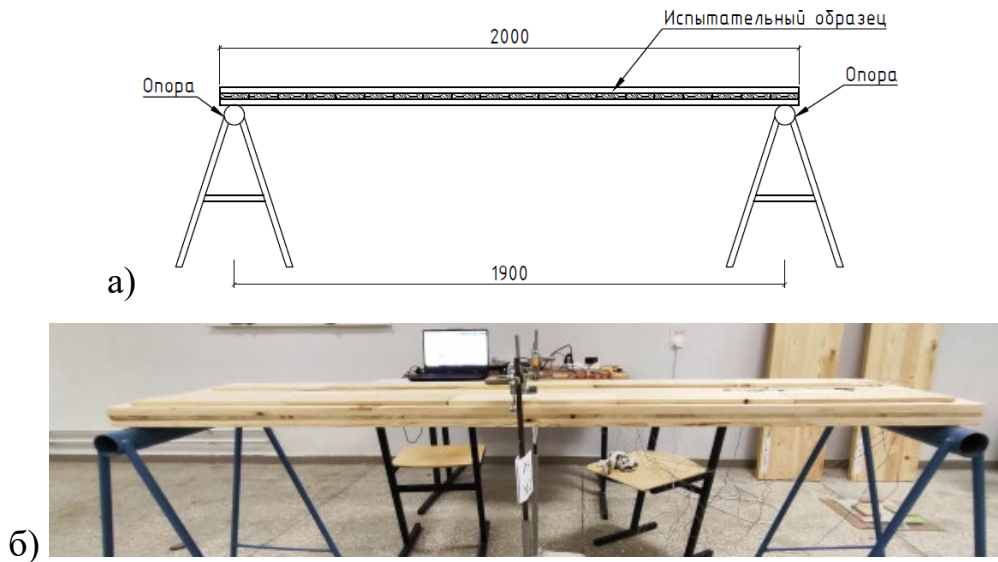


Рисунок 4.1 – Испытательный стенд
(а – схема испытательного стенда; б – вид испытательного стенда)

Плиты устанавливались на специально изготовленные опоры (рисунок 4.1). Для предотвращения чрезмерного смятия древесины на опорах диаметр опорной трубы составлял 50 мм. Пролёт всех опытных конструкций составил 1900 мм.

Таблица 4.1 – Типы конфигурации плит из ДПК

№	Описание	Сечения
1	Плита из ДПК размерами ДхШхВ: 2000х400х30 мм (3 слоя)	
2	Плита из ДПК с утолщенными продольными слоями размерами ДхШхВ: 2000х400х50 мм	

Продолжение таблицы 4.1

3	Плита из ДПК с утолщенным поперечным слоем размерами ДхШхВ: 2000х400х40 мм	
4	Плита из ДПК с зазорами в поперечном слое размерами ДхШхВ: 2000х400х30 мм	
5	Плита из ДПК размерами ДхШхВ: 2000х400х50 мм (5 слоев)	

4.2 Методика проведения экспериментальных исследований плит из ДПК

4.2.1 Методика проведения статических испытаний

Для исследования несущей способности и деформативности плит из ДПК экспериментальные образцы загружались равномерно распределенной нагрузкой. Для задания нагрузки использовались силикатные кирпичи, предварительно взвешенные с точностью до 10 г, масса отдельных кирпичей составляла от 4,79 до 5,39 кг. Загружение осуществлялось в несколько ступеней (от 4 до 5), максимальная нагрузка для каждой опытной конструкции выбиралась таким образом, чтобы максимальный прогиб был близок к 1/150 от длины пролета [80]. Кирпичи укладывались на предварительно разложенные короткие доски с целью

исключения повреждения тензорезисторов, наклеенных на поверхность плиты. Интенсивность ступеней испытательной нагрузки для различных типов конфигураций приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Интенсивность нагрузки для опытных образцов

№№ ступеней нагрузки	Интенсивность нагрузки (кН/м ²)				
	1	2	3	4	5
Тип № 1	0,34	0,62	0,95	1,22	-
Тип № 2	0,62	1,22	1,84	2,42	3,02
Тип № 3	0,62	1,22	1,84	2,42	-
Тип № 4	0,34	0,62	0,95	1,22	-
Тип № 5	0,62	1,22	1,84	2,42	3,02

Штучные грузы укладывались вдоль пролета плиты в несколько слоев таким образом, чтобы создавалось равномерное нагружение конструкции. Схемы нагружения и общий вид конструкций под нагрузкой приведены на рисунках 4.2-4.7.

Между каждой ступенью нагружения конструкция выдерживалась не менее 15 минут, чтобы дать возможность нарасти деформациям в плите.

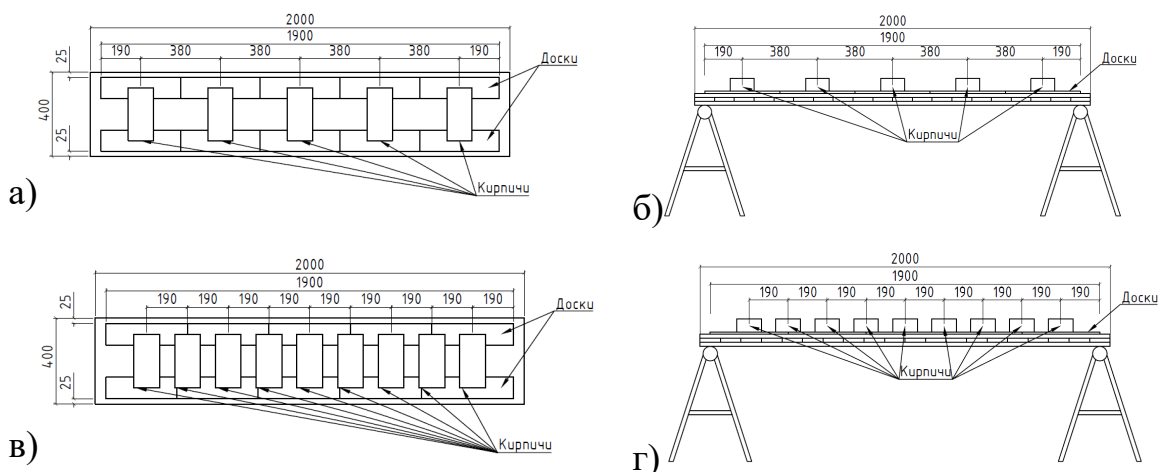


Рисунок 4.2 – Схема приложения нагрузки на тип № 1
(а – нагрузка 1 ступени, вид сверху; б – нагрузка 1 ступени, вид сбоку;
в – нагрузка 2 ступени, вид сверху; г – нагрузка 2 ступени, вид сбоку)

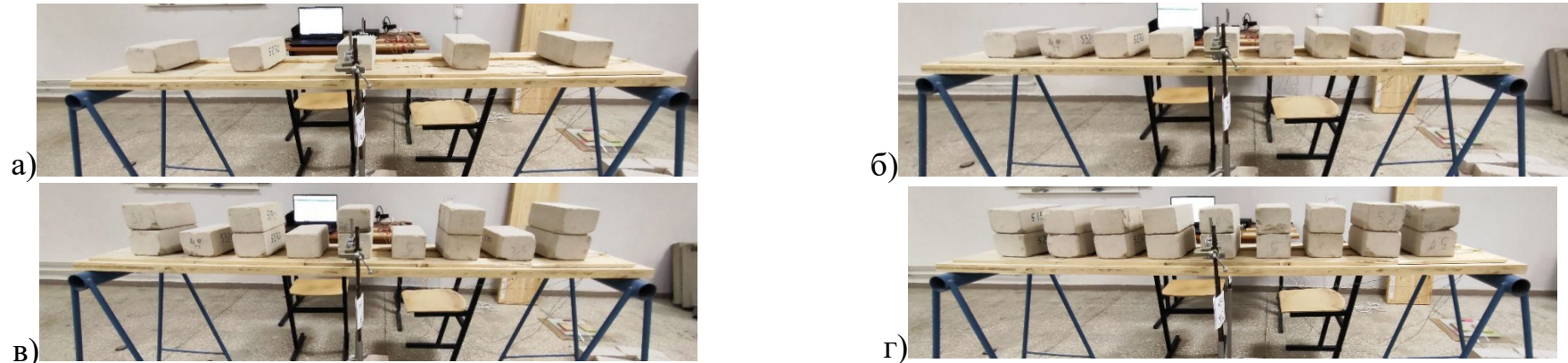


Рисунок 4.3 – Нагружение конфигурации № 1
(а – 1 ступень; б – 2 ступень; в – 3 ступень; г – 4 ступень)

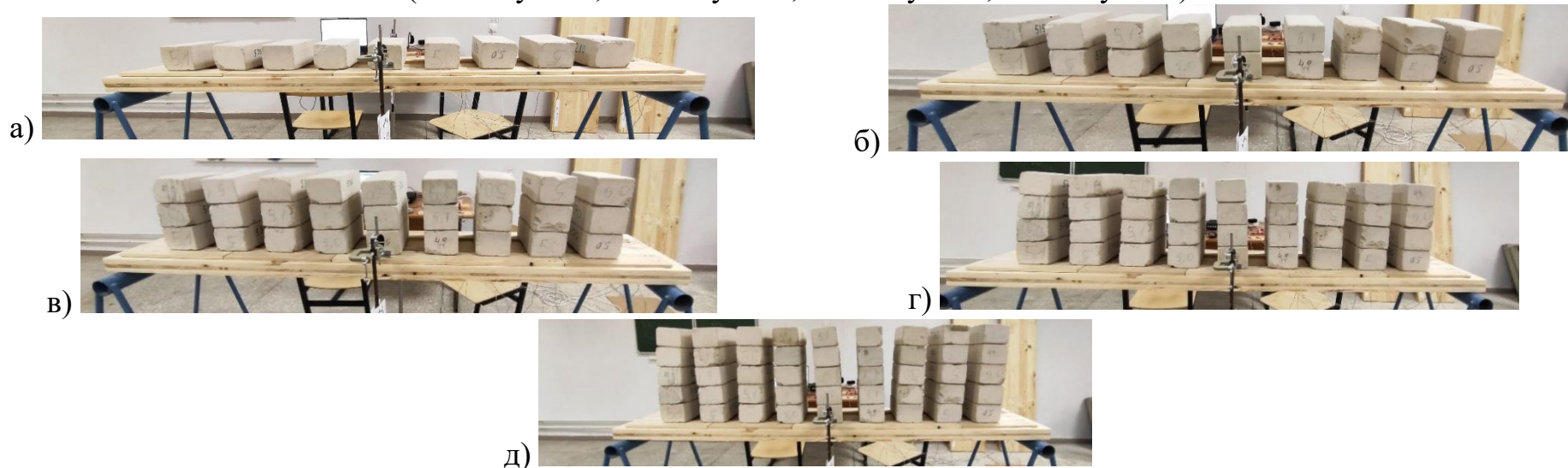


Рисунок 4.4 – Нагружение конфигурации № 2
(а – 1 ступень; б – 2 ступень; в – 3 ступень; г – 4 ступень; д – 5 ступень)



Рисунок 4.5 – Нагружение конфигурации № 3
(а – 1 ступень; б – 2 ступень; в – 3 ступень; г – 4 ступень)



Рисунок 4.6 – Нагружение конфигурации № 4
(а – 1 ступень; б – 2 ступень; в – 3 ступень; г – 4 ступень)

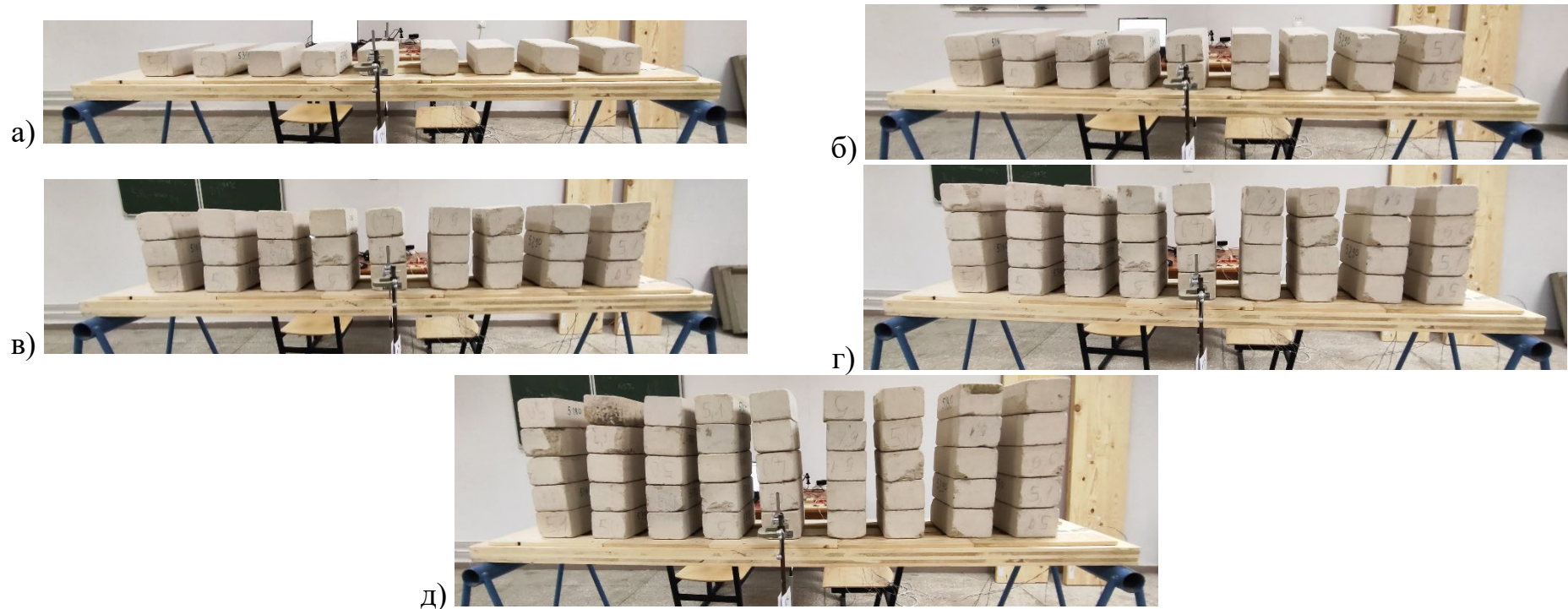


Рисунок 4.7 – Нагружение конфигурации № 5
(а – 1 ступень; б – 2 ступень; в – 3 ступень; г – 4 ступень; д – 5 ступень)

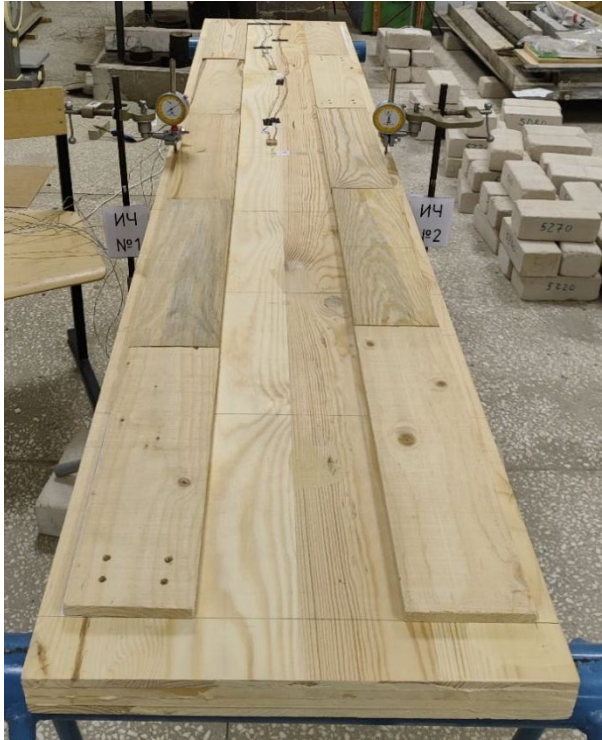


Рисунок 4.8 – Расположение индикаторов ИЧ-25

Для увеличения точности и стабильности результатов эксперимента нагружение проводилось не менее 3-х раз. Для измерения максимального поперечного прогиба конструкции в центре пролета установлены 2 индикатора часового типа ИЧ-25 с точностью 0,01 мм (рисунок 4.8).

Нормальные напряжения в плите были исследованы с помощью тензостанции ZET 017-T (рисунок 4.9). Для снятия показаний были использованы тензорезисторы с

сопротивлением $R=200$ Ом и базой $l=20$ мм, соединенные в полумостовую схему [53]. Для приклеивания тензорезисторов использовался цианоакрилатный клей «Циакрин ЭО» холодного отверждения.

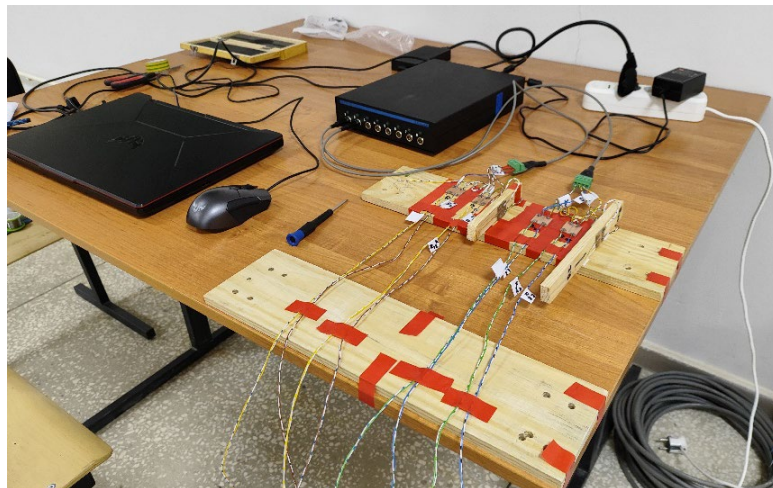


Рисунок 4.9 – Вид рабочего места с тензостанцией ZET 017-T

Данное оборудование позволяет получить значения относительных деформаций в месте наклейки тензорезистора. Для этого в программном

обеспечении Zetlab задана чувствительность тензометрической схемы, рассчитанная по формуле:

$$S = \frac{4}{2 * K_R}, \quad (4.1)$$

где K_R – чувствительность тензорезистора (для исследования использованы тензорезисторы с $K_R=2,18$).

Таким образом, чувствительность схемы для всех измерений составляла $S=0,917$. По значению относительных деформаций рассчитаны нормальные напряжения вдоль пролета с помощью обобщенного закона Гука для анизотропных тел [3]:

$$\sigma_y = \frac{E_y}{1 - \nu_{xy} * \nu_{yx}} * (\varepsilon_y + \nu_{yx} * \varepsilon_x). \quad (4.2)$$

Относительные деформации были исследованы в двух точках конструкции: в центре пролета с помощью контрольного тензорезистора R_{11} и в $1/4$ пролета с помощью контрольного тензорезистора R_{21} . На противоположной грани плиты расположены тензорезисторы R_{12} и R_{22} (рисунки 4.10-4.12).

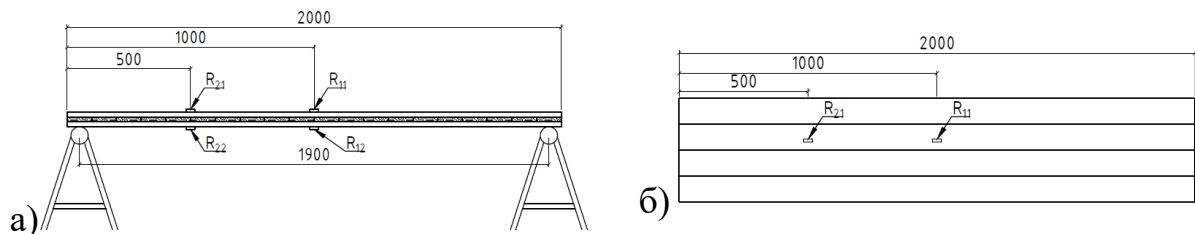


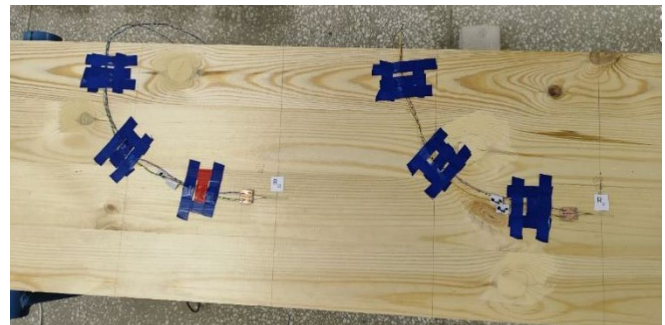
Рисунок 4.10 – Расположение тензорезисторов на опытном образце (а – вид сбоку; б – вид сверху)



Рисунок 4.11 – Общий вид плиты с расположением R_{11} и R_{21}



а)



б)

Рисунок 4.12 – Расположение тензорезисторов на плите (а – R_{11} и R_{21} ; б – R_{12} и R_{22})

Для оценки точности результатов исследований была проведена статистическая обработка [14].

Среднее арифметическое значение прогибов и нормальных напряжений определено по формуле:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (4.3)$$

где X_i – значение испытываемого свойства; n – кол-во образцов.

Выборочное среднее квадратическое отклонение определялось по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (4.4)$$

Средняя ошибка определялась по формуле:

$$S_r = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.5)$$

Выборочный коэффициент вариации определен по формуле:

$$V = \frac{S}{\bar{X}} * 100 \quad (4.6)$$

В итоге определена относительная погрешность:

$$P_\gamma = \frac{S_r * t_\gamma}{X} * 100, \quad (4.7)$$

где t_γ – коэффициент Стьюдента.

4.2.2 Методика проведения динамических испытаний

Для исследования динамических характеристик плит перекрытия из ДПК определялась основная частота собственных поперечных колебаний для каждого опытного образца. Измерения проводились с помощью виброанализатора «ВИБРАН–3» (рисунок 4.13).

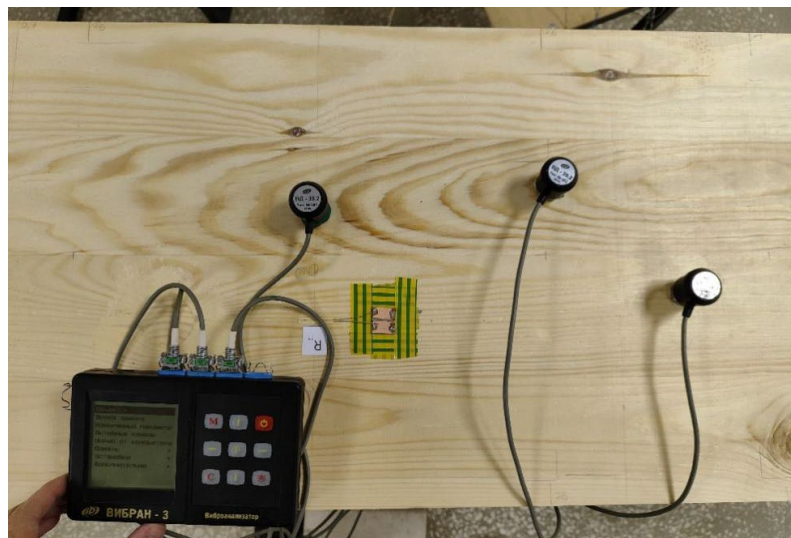


Рисунок 4.13 – Виброанализатор «ВИБРАН-3»

В качестве источника возбуждения колебаний использовался удар, наносимый резиновой киянкой массой 400 г в центр плиты с фиксированной

высоты 20 см, что обеспечивало воспроизводимость начальных условий (рисунок 4.14). Такой подход позволяет приблизительно считать импульс кратковременным по сравнению с периодом основных колебаний, что оправдывает применение метода свободных затухающих колебаний для определения собственной частоты.

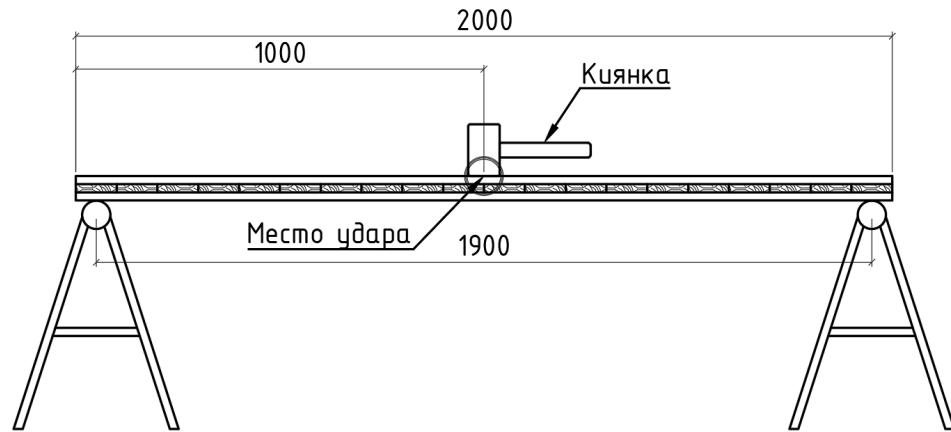


Рисунок 4.14 – Схема импульсного нагружения испытательного образца (вид сбоку)

Регистрация колебательного отклика осуществлялась одновременно тремя акселерометрами с различной чувствительностью, установленными в нескольких точках конструкции (рисунок 4.15). Это позволило сравнить виброграммы и отобрать сигнал с минимальным уровнем шумов для последующего анализа.

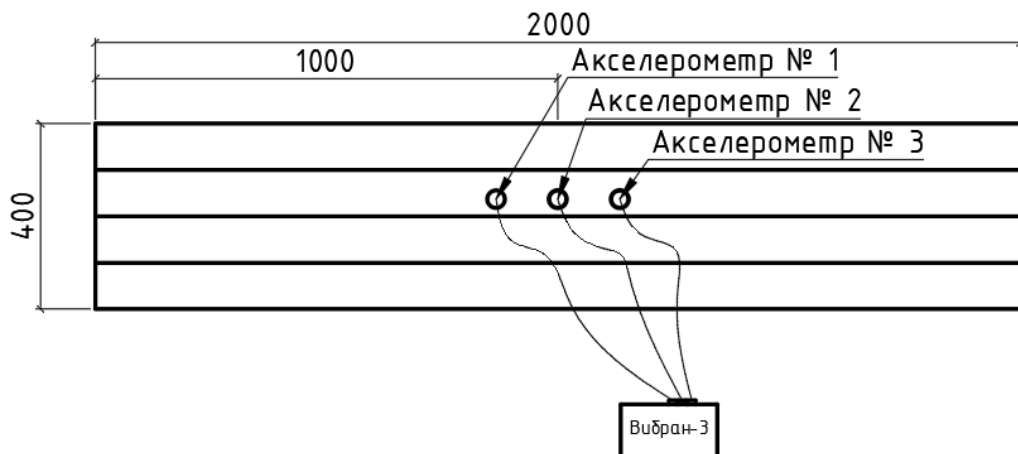


Рисунок 4.15 – Расположение акселерометров виброанализатора (вид сверху)

Частота собственных колебаний плиты определялась с помощью виброграмм, полученных из прибора. Для исследования закономерности (2.38) получена круговая частота собственных колебаний по формуле:

$$\omega = 2 * \pi * f, \quad (4.8)$$

где f – техническая частота колебаний, полученная из виброграмм, c^{-1} .

На основании экспериментально определённых значений частоты собственных колебаний и соответствующих максимальных прогибов плит под статической нагрузкой по формуле (2.38) рассчитывался коэффициент пропорциональности K .

Для повышения достоверности исследований испытания проводились не менее 5 раз для каждого опытного образца.

4.3 Определение кратковременного модуля упругости древесины плит

Для определения кратковременного модуля упругости была использована методика, описанная в ГОСТ 16483.9-73 [15].

Расчет кратковременного модуля упругости производился по формуле:

$$E_w = \frac{3 * P * l^3}{64 * b * h^3 * f}, \text{ где} \quad (4.9)$$

где P – разница между наибольшим и наименьшим значением нагрузки, Н; l – величина пролета образца, мм; b – ширина образца, мм; h – толщина образца, мм; f – прогиб образца в зоне чистого изгиба, равный разности между средними арифметическими результатами измерения прогиба при верхнем и нижнем пределах нагружения, мм.

Было исследовано 7 образцов размерами 20x10(h) мм длиной 300 мм (рисунки 4.16-4.17). Для измерения прогибов использовался индикатор МИГ-I с точностью измерения 0,001 мм. Температура воздуха в помещении составляла $t=21,2^{\circ}C$, влажность воздуха в помещении $W=63\%$.

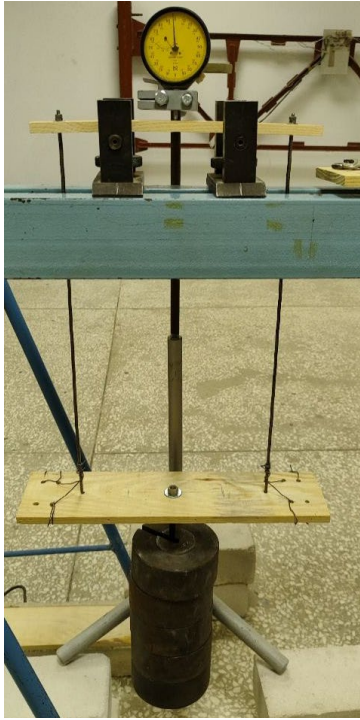


Рисунок 4.16 – Общий вид установки для определения модуля упругости

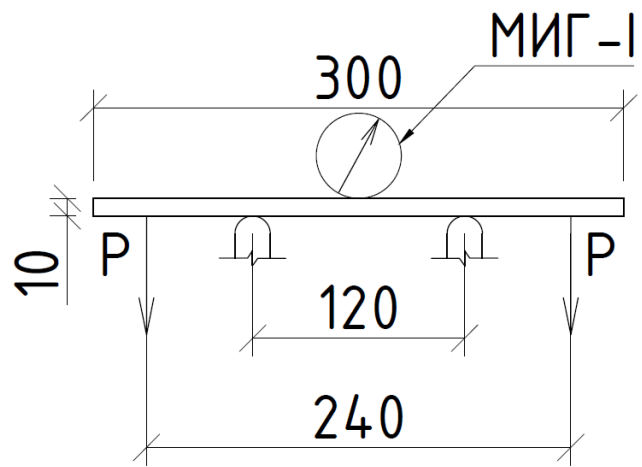


Рисунок 4.17 – Схема нагружения образцов

Для увеличения точности и компенсации погрешностей измерений каждый образец испытывался дважды. Показания индикатора часового типа вынесены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Показания индикатора часового типа МИГ-I

№ образца	Показания индикатора при нагрузке (Н):					
	0	40	80	120	160	200
1	325	362	445	501	571	627
	310	343	432	495	560	610
2	367	392	446	517	578	651
	350	382	440	507	577	646
3	425	474	540	620	694	773
	435	481	554	629	703	788
4	142	177	242	302	371	435
	144	180	235	300	368	429
5	373	435	526	607	682	771
	406	471	555	632	715	798
6	359	409	481	555	629	702
	340	404	478	553	625	700
7	314	361	435	509	585	658
	313	346	424	500	574	647

Показания индикатора были преобразованы в прогибы (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Определение кратковременного модуля упругости

№ образца	Прогиб (мм) при нагрузке (Н):					
	0	40	80	120	160	200
1	2	3	4	5	6	7
1	0,000	0,037	0,120	0,176	0,246	0,302
	0,000	0,033	0,122	0,185	0,250	0,300
2	0,000	0,025	0,079	0,150	0,211	0,284
	0,000	0,032	0,090	0,157	0,227	0,296
3	0,000	0,049	0,115	0,195	0,269	0,348
	0,000	0,046	0,119	0,194	0,268	0,353
4	0,000	0,035	0,100	0,160	0,229	0,293
	0,000	0,036	0,091	0,156	0,224	0,285
5	0,000	0,062	0,153	0,234	0,309	0,398
	0,000	0,065	0,149	0,226	0,309	0,392
6	0,000	0,050	0,122	0,196	0,270	0,343
	0,000	0,064	0,138	0,213	0,285	0,360
7	0,000	0,047	0,121	0,195	0,271	0,344
	0,000	0,033	0,111	0,187	0,261	0,334

Для расчета модуля упругости были отбракованы значения при нагрузке 40 Н, а также все значения для образца № 5 ввиду их резкого отличия. Проведен статистический анализ в соответствии с ГОСТ 16483.0-89 «Древесина. Общие требования к физико-механическим испытаниям». Коэффициент Стьюдента равнялся 2,201. Результаты отражены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Определение кратковременного модуля упругости

№ образца	Размеры образца, мм:		Модуль упругости (МПа) при нагрузке (Н):					
	b	h	0	40	80	120	160	200
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	20,2	10	-	-	10693	10936	10432	10622
			-	-	10518	10404	10265	10693
2	20,3	10	-	-	16163	12768	12103	11240
			-	-	14187	12199	11250	10784
3	20,2	10	-	-	11158	9871	9540	9218
			-	-	10783	9921	9576	9088
4	20,3	10	-	-	12768	11970	11152	10895
			-	-	14031	12277	11400	11200

Продолжение таблицы 4.5

5	20,1	10	-	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-
6	20,2	10	-	-	10518	9820	9505	9353
			-	-	9298	9036	9005	8911
7	20,1	10	-	-	10657	9920	9517	9372
			-	-	11618	10344	9882	9652
Среднее арифметическое, \bar{X}			-	-	11866	10829	10302	10125
Среднее квадратич. отклонение, S			-	-	2003	1266	968	924
Средняя ошибка, S_r			-	-	578	382	279	279
Коэффициент вариации, V			-	-	17	12	9	9
Относительная погрешность, P_γ			-	-	11	8	6	6

Итоговое среднее значение модуля упругости вдоль волокон по результатам испытаний составило $E_w = 10781$ МПа (10,8 ГПа).

4.4 Определение влажности древесины

В настоящем исследовании был использован весовой метод определения влажности древесины [16]. Для этого из материала, использованного в п. 4.3, были изготовлены 3 образца размером 20x10(h) мм. Предварительно взвешенные в бюксах, образцы были высушены в течение 24 ч в сушильном шкафу ШСП-0,5-70 при температуре $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (рисунки 4.18-4.21). Расчет влажности производился по формуле (4.10).

$$W = \frac{(m_1 - m_6) - (m_2 - m_6)}{(m_2 - m_6)} * 100 \%, \quad (4.10)$$

где m_1 – масса бюксы с образцом до высушивания, г; m_6 – масса бюксы без образца, г; m_2 – масса бюксы с образцом после высушивания, г; h – толщина образца, мм.

Результаты приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Определение влажности образцов

№ образца	1	2	3
m_6 , Г	18,22	17,80	17,84
m_1 , Г	21,17	20,64	20,60
m_2 , Г	20,86	20,32	20,30
W, %	11,7	12,7	12,2



Рисунок 4.18 – Сушильный шкаф ШСП-0,5-70



Рисунок 4.19 – Расположение образцов в сушильном шкафу



Рисунок 4.20 – Образцы для определения влажности



Рисунок 4.21 – Взвешивание образца № 1

Таким образом, средняя влажность составляет 12,2 %, в связи с чем нет необходимости выполнять пересчет кратковременного модуля упругости на влажность 12 %.

4.5 Результаты экспериментальных исследований плит из ДПК при статическом нагружении

4.5.1 Статические испытания трехслойной плиты из ДПК (конфигурация № 1)

Для исследования НДС трехслойной плиты из ДПК были проделаны 3 опыта с нагрузками $0,34 \text{ кН/м}^2$, $0,62 \text{ кН/м}^2$, $0,95 \text{ кН/м}^2$, $1,22 \text{ кН/м}^2$.

Исследование проделано по методике, описанной в настоящей главе. Результаты исследования прогибов отображены в таблице 4.7.

Проведена статистическая обработка полученных значений прогибов при значении коэффициента Стьюдента $t=4,303$. Относительная погрешность полученных экспериментальных данных не превысила 5 %.

Таблица 4.7 – Прогибы плиты конфигурации № 1

№ опыта	Нагрузка, кН/м ²	Прогиб по ИЧ № 1, мм	Прогиб по ИЧ № 2, мм	Среднее значение прогиба в опыте W_0 , мм	Расчетное значение прогиба $W_{0расч}$, мм	Отклонение экспериментального значения от расчетного, %
1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0
	0,34	2,38	2,50	2,44	2,72	-11
	0,62	4,68	4,97	4,83	4,93	-2
	0,95	6,92	7,38	7,15	7,6	-6
	1,22	9,10	9,80	9,45	9,78	-3
2	0	0	0	0	0	0
	0,34	2,27	2,43	2,35	2,72	-16
	0,62	4,56	4,93	4,75	4,93	-4
	0,95	6,85	7,39	7,12	7,6	-7
	1,22	8,93	9,79	9,36	9,78	-4
3	0	0	0	0	0	0
	0,34	2,38	2,49	2,44	2,72	-12
	0,62	4,69	4,97	4,83	4,93	-2
	0,95	6,96	7,41	7,19	7,6	-6
	1,22	9,19	9,86	9,53	9,78	-3

По результатам испытаний построен график изменения максимального прогиба в зависимости от нагрузки (рисунок 4.22), который имеет вид прямой, что свидетельствует об упругой работе конструкции. График экспериментальных прогибов построен по средним арифметическим значениям для каждого шага нагружения, равным 2,41, 4,80, 7,15 и 9,45 мм.

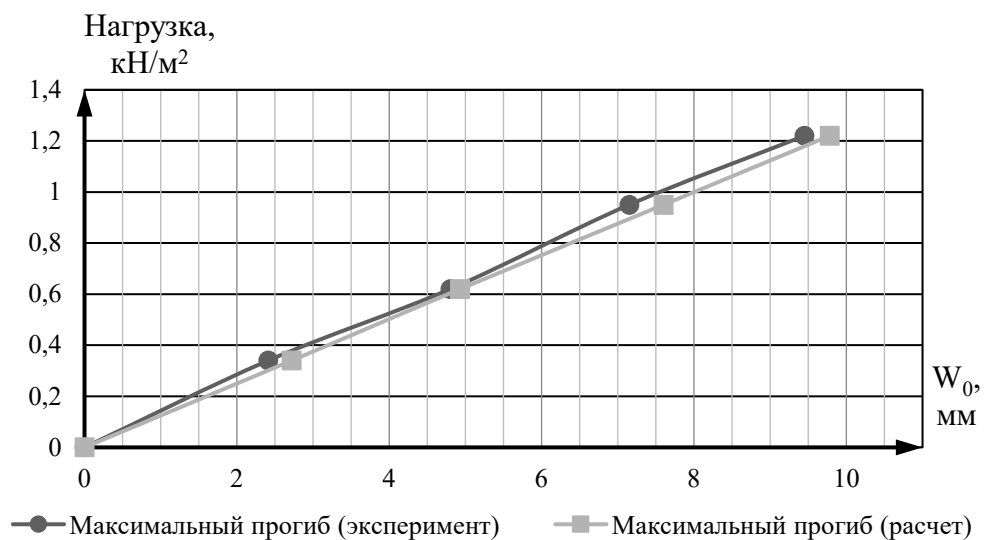


Рисунок 4.22 – Расчетные и экспериментальные значения максимального прогиба в зависимости от нагрузки в конфигурации № 1

Для каждого шага нагрузки определены нормальные краевые напряжения, отображенные в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Нормальные краевые напряжения в конфигурации № 1

№ опыта	Нагрузка, кН/м ²	Нормальное напряжение σ в точке R_{11} , кН/м ²	Нормальное напряжение σ в точке R_{21} , кН/м ²	Расчетное нормальное напряжение σ в точке R_{11} , кН/м ²	Расчетное нормальное напряжение σ в точке R_{21} , кН/м ²	Отклонение экспериментального значения от расчетного в точке R_{11} , %	Отклонение экспериментального значения от расчетного в точке R_{21} , %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,34	-953	-664	-1083	-689	-14	-4
	0,62	-1950	-1320	-1965	-1250	-1	5
	0,95	-2890	-1960	-3028	-1926	-5	2
	1,22	-3840	-2600	-3898	-2480	-2	5
2	0,34	-950	-680	-1083	-689	-14	-1
	0,62	-1990	-1426	-1965	-1250	1	12
	0,95	-2960	-2160	-3028	-1926	-2	11
	1,22	-3820	-2722	-3898	-2480	-2	9
3	0,34	-970	-724	-1083	-689	-12	5
	0,62	-1960	-1426	-1965	-1250	0	12
	0,95	-2920	-2117	-3028	-1926	-4	9
	1,22	-3890	-2797	-3898	-2480	0	11

Проведена статистическая обработка полученных значений нормальных краевых напряжений при значении коэффициента Стьюдента $t=4,303$. Относительная погрешность полученных экспериментальных данных не превысила 11 %.

На рисунке 4.23 изображены расчетные и экспериментальные значения нормальных краевых напряжений в точках R_{11} и R_{21} в зависимости от величины нагрузки для конфигурации № 1. Средние арифметические значения для каждого шага нагрузки в тензорезисторе R_{11} равны -958, -1967, -2923, -3850 кН/м²; в тензорезисторе R_{21} равны -689, -1390, -2079, -2706 кН/м².

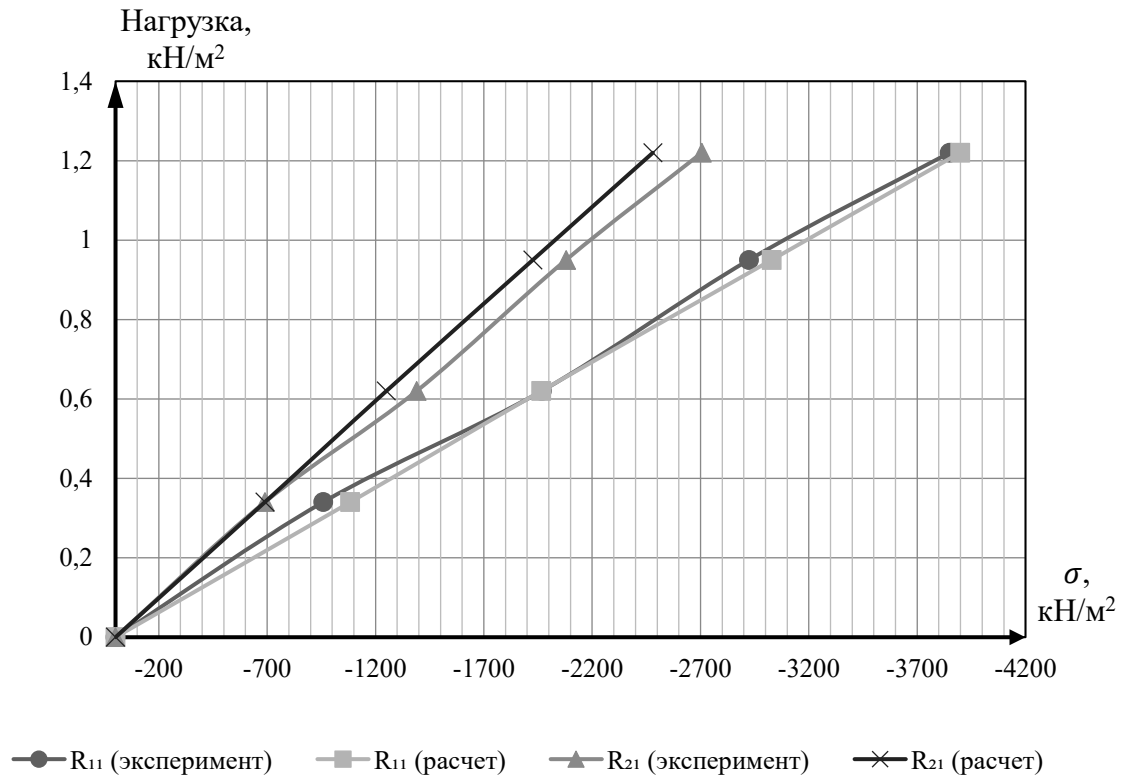


Рисунок 4.23 – Расчетные и экспериментальные значения нормальных краевых напряжений в зависимости от нагрузки в конфигурации № 1

Анализируя данные таблиц 4.7 и 4.8, можно судить о достаточно близких значениях экспериментальных и численных прогибов и нормальных краевых напряжений для конфигурации № 1. Кроме того, наблюдается низкий показатель относительной погрешности полученных экспериментальных прогибов (не более 5 %) и нормальных краевых напряжений (не более 11 %).

4.5.2 Статические испытания трехслойной плиты из ДПК с утолщенными продольными слоями (конфигурация № 2)

Для исследования НДС трехслойной плиты из ДПК с утолщенными продольными слоями было проведено 3 опыта с нагрузками 0,62 кН/м², 1,22 кН/м², 1,84 кН/м², 2,42 кН/м², 3,02 кН/м². Результаты исследования прогибов конфигурации № 2 отображены в таблице 4.9.

Проведена статистическая обработка значений максимальных прогибов при значении коэффициента Стьюдента $t=4,303$. Относительная погрешность полученных экспериментальных данных не превысила 8 %.

Таблица 4.9 – Прогибы конфигурации № 2

№ опыта	Нагрузка, кН/м ²	Прогиб по ИЧ № 1, мм	Прогиб по ИЧ № 2, мм	Среднее значение прогиба в опыте W_0 , мм	Расчетное значение прогиба $W_{орасч}$, мм	Отклонение экспериментального значения от расчетного, %
1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0
	0,62	1,03	1,02	1,03	0,97	5
	1,22	2,03	2,00	2,02	1,93	4
	1,84	3,03	3,00	3,02	2,89	4
	2,42	3,98	3,95	3,97	3,81	4
	3,02	4,67	4,92	4,80	4,75	1
2	0	0	0	0	0	0
	0,62	1,00	1,06	1,03	0,97	6
	1,22	2,00	2,07	2,04	1,93	5
	1,84	3,02	3,08	3,05	2,89	5
	2,42	3,97	4,03	4,00	3,81	5
	3,02	4,94	5,00	4,97	4,75	4
3	0	0	0	0	0	0
	0,62	1,02	1,04	1,03	0,97	6
	1,22	2,03	2,04	2,04	1,93	5
	1,84	3,04	3,05	3,05	2,89	5
	2,42	3,98	4,00	3,99	3,81	5
	3,02	4,71	4,99	4,85	4,75	2

Расчетные и экспериментальные значения максимального прогиба трехслойной плиты из ДПК с утолщенными продольными слоями изменяются в зависимости от нагрузки в соответствии с рисунком 4.24. График экспериментальных прогибов построен по средним арифметическим значениям для каждого шага нагружения, равным 1,03, 2,03, 3,04, 3,99, 4,85 мм.

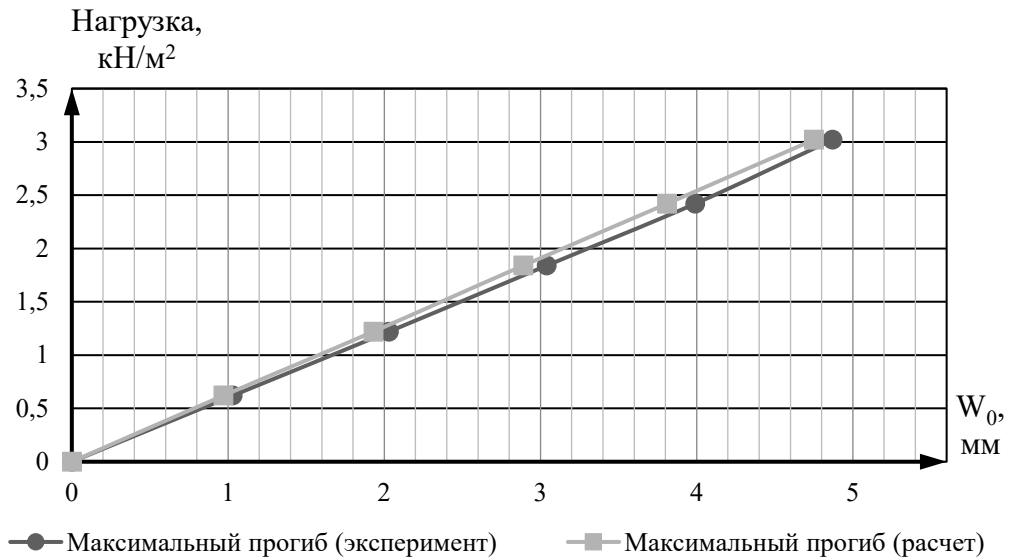


Рисунок 4.24 – Расчетные и экспериментальные значения максимального прогиба в зависимости от нагрузки в конфигурации № 2

Измеренные нормальные краевые напряжения для конфигурации № 2 отображены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Нормальные краевые напряжения в конфигурации № 2

№ опыта	Нагрузка, кН/м	Нормальное напряжение σ в точке R_{11} , кН/м ²	Нормальное напряжение σ в точке R_{21} , кН/м ²	Расчетное нормальное напряжение σ в точке R_{11} , кН/м ²	Расчетное нормальное напряжение σ в точке R_{21} , кН/м ²	Отклонение экспериментального значения от расчетного в точке R_{11} , %	Отклонение экспериментального значения от расчетного в точке R_{21} , %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,246	-690	-480	-670	-561	3	-15
	0,489	-1400	-950	-1330	-1113	5	-15
	0,734	-2120	-1420	-1998	-1673	6	-16
	0,967	-2800	-1870	-2633	-2204	6	-16
	1,207	-3470	-2340	-3284	-2749	5	-15
2	0,246	-690	-480	-670	-561	3	-15
	0,489	-1410	-950	-1330	-1113	6	-15
	0,734	-2130	-1430	-1998	-1673	6	-15
	0,967	-2800	-1890	-2633	-2204	6	-14
	1,207	-3470	-2360	-3284	-2749	5	-14
3	0,246	-686	-492	-670	-561	2	-12
	0,489	-1400	-970	-1330	-1113	5	-13
	0,734	-2130	-1460	-1998	-1673	6	-13
	0,967	-2810	-1820	-2633	-2204	6	-17
	1,207	-3500	-2400	-3284	-2749	6	-13

Проведена статистическая обработка полученных значений краевых нормальных напряжений при значении коэффициента Стьюдента $t=4,303$. Относительная погрешность полученных экспериментальных данных не превысила 8 %.

На рисунке 4.25 изображены расчетные и экспериментальные значения нормальных напряжений в точках R_{11} и R_{21} в зависимости от величины нагрузки для конфигурации № 2. Средние арифметические значения для каждого шага нагрузки в тензорезисторе R_{11} равны -689, -1403, -2127, -2803, -3480 кН/м²; в тензорезисторе R_{21} равны -484, -957, -1437, -1860, -2367 кН/м².

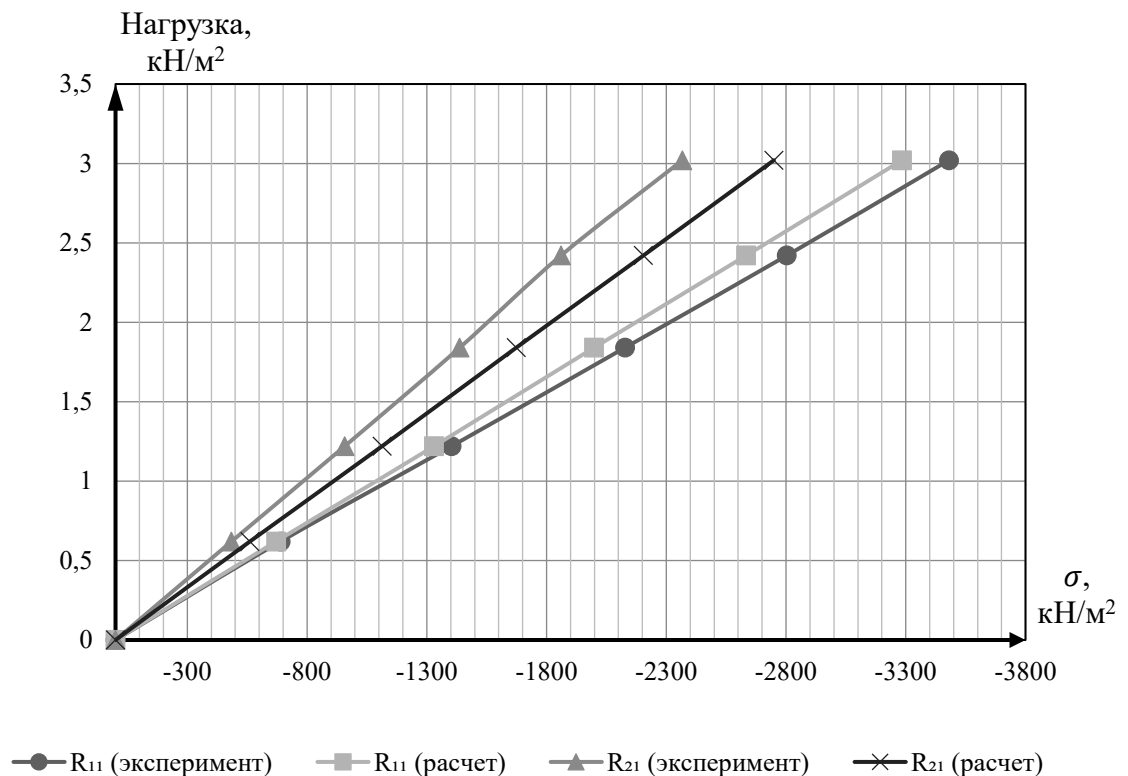


Рисунок 4.25 – Расчетные и экспериментальные значения нормальных краевых напряжений в зависимости от нагрузки в конфигурации № 2

Данные таблиц 4.9-4.10 свидетельствуют о высокой точности исследований и высокой сходимости эксперимента и расчетной модели. Так, отклонение экспериментального прогиба от расчетного составило от 2 % до 6 %; отклонение экспериментальных нормальных напряжений в тензорезисторе R_{11} от расчетных

значений составило от 3 % до 6 %. Наибольшие отклонения экспериментальных данных возникли в тензорезисторе R_{21} и составили от 12 % до 17 %.

4.5.3 Статические испытания трехслойной плиты из ДПК с утолщенным поперечным слоем (конфигурация № 3)

Для исследования НДС трехслойной плиты из ДПК с утолщенным поперечным слоем были проведены 3 опыта с нагрузками 0,62 кН/м², 1,22 кН/м², 1,84 кН/м², 2,42 кН/м².

Результаты исследования прогибов конфигурации № 3 отображены в таблице 4.11.

Проведена статистическая обработка полученных значений прогибов при значении коэффициента Стьюдента $t=4,303$. Относительная погрешность полученных экспериментальных данных не превысила 4 %.

Таблица 4.11 – Прогибы конфигурации № 3

№ опыта	Нагрузка, кН/м ²	Прогиб по ИЧ № 1, мм	Прогиб по ИЧ № 2, мм	Среднее значение прогиба в опыте W_0 , мм	Расчетное значение прогиба $W_{орасч}$, мм	Отклонение экспериментального значения от расчетного, %
1	2	3	4	5	6	7
1	0,00	0	0	0	0	0
	0,62	-2,09	-2,08	2,09	2,16	-4
	1,22	-4,17	-4,13	4,15	4,28	-3
	1,84	-6,3	-6,21	6,26	6,43	-3
	2,42	-8,33	-8,18	8,26	8,47	-3
2	0,00	0	0	0	0	0
	0,62	-2,02	-1,99	2,01	2,16	-8
	1,22	-4,08	-3,98	4,03	4,28	-6
	1,84	-6,17	-5,99	6,08	6,43	-6
	2,42	-8,17	-7,9	8,04	8,47	-5
3	0,00	0	0	0	0	0
	0,62	-2,07	-2,06	2,07	2,16	-5
	1,22	-4,14	-4,08	4,11	4,28	-4
	1,84	-6,25	-6,11	6,18	6,43	-4
	2,42	-8,33	-8,11	8,22	8,47	-3

Расчетные и экспериментальные значения максимального прогиба трехслойной плиты из ДПК с утолщенным поперечным слоем изменяются в зависимости от нагрузки в соответствии с рисунком 4.26. Средние арифметические значения прогибов для построения графика равны 2,05, 4,1, 6,17, 8,17 мм.

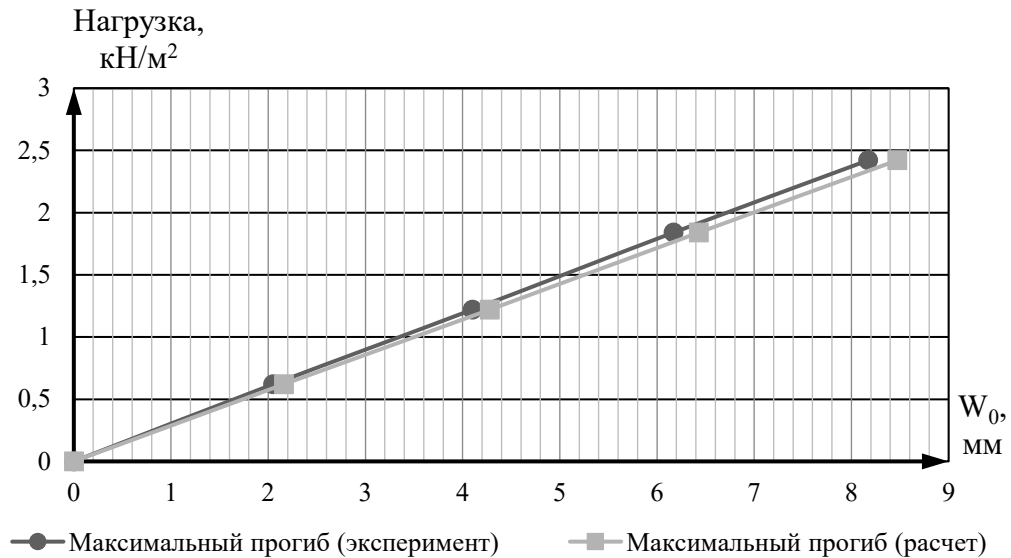


Рисунок 4.26 – Расчетные и экспериментальные значения максимального прогиба в зависимости от нагрузки в конфигурации № 3

Нормальные краевые напряжения в конфигурации № 3 и отображены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Нормальные краевые напряжения в конфигурации № 3

№ опыта	Нагрузка, кН/м ²	Нормальное напряжение σ в точке R_{11} , кН/м ²	Нормальное напряжение σ в точке R_{21} , кН/м ²	Расчетное нормальное напряжение σ в точке R_{11} , кН/м ²	Расчетное нормальное напряжение σ в точке R_{21} , кН/м ²	Отклонение экспериментального значения от расчетного в точке R_{11} , %	Отклонение экспериментального значения от расчетного в точке R_{21} , %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,62	-990	-730	-1194	-731	-21	0
	1,22	-1980	-1460	-2368	-1451	-20	1
	1,84	-2990	-2200	-3558	-2180	-19	1
	2,42	-3950	-2920	-4687	-2872	-19	2
2	0,62	-970	-720	-1194	-731	-23	-2
	1,22	-1950	-1440	-2368	-1451	-21	-1
	1,84	-2950	-2160	-3558	-2180	-21	-1
	2,42	-3900	-2860	-4687	-2872	-20	0

Продолжение таблицы 4.12

№ опыта	Нагрузка, кН/м ²	Нормальное напряжение σ в точке R_{11} , кН/м ²	Нормальное напряжение σ в точке R_{21} , кН/м ²	Расчетное нормальное напряжение σ в точке R_{11} , кН/м ²	Расчетное нормальное напряжение σ в точке R_{21} , кН/м ²	Отклонение экспериментального значения от расчетного в точке R_{11} , %	Отклонение экспериментального значения от расчетного в точке R_{21} , %
3	0,62	-975	-750	-1194	-731	-18	3
	1,22	-1960	-1470	-2368	-1451	-17	1
	1,84	-2960	-2200	-3558	-2180	-17	1
	2,42	-3900	-2890	-4687	-2872	-17	1

Проведена статистическая обработка полученных значений краевых нормальных напряжений при значении коэффициента Стьюдента $t=4,303$. Относительная погрешность полученных экспериментальных данных не превысила 5 %.

На рисунке 4.27 изображены расчетные и экспериментальные значения нормальных напряжений в точках R_{11} и R_{21} для конфигурации № 3. Средние арифметические значения нагрузки в тензорезисторе R_{11} равны -978, -1963, -2967, -3917 кН/м²; в тензорезисторе R_{21} равны -733, -1457, -2187, -2890 кН/м².

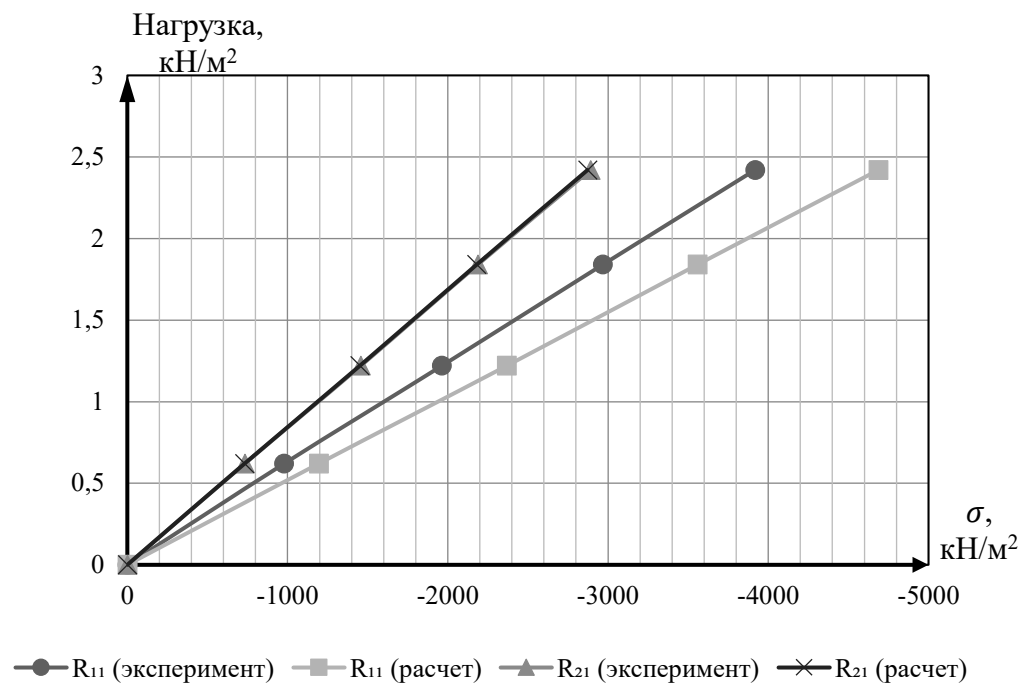


Рисунок 4.27 – Расчетные и экспериментальные значения нормальных краевых напряжений в зависимости от нагрузки в конфигурации № 3

По данным таблиц 4.11 и 4.12 можно сделать вывод о высокой точности проведенных исследований максимальных прогибов и напряжений, так как ни в одном из опытов относительная погрешность не превышала 5 %. Также наблюдается высокая сходимость результатов эксперимента с расчетной моделью в отношении максимальных прогибов, так как отклонение составило от 3 % до 8 %. Расхождение напряжений в точке R_{11} составило от 17 % до 23 %. Это связано с рядом факторов: неоднородностью древесины, попаданием на косослой, невидимым дефектом и т.д. В точке R_{21} , напротив, наблюдается высокая сходимость, и отклонения составляют не более 3 %.

4.5.4 Статические испытания трехслойной плиты из ДПК с зазорами в поперечном слое (конфигурация № 4)

Для исследования НДС трехслойной плиты из ДПК с зазорами в поперечном слое было проведено с нагрузками 0,34 кН/м², 0,62 кН/м², 0,95 кН/м², 1,22 кН/м².

Результаты исследований прогибов конфигурации № 4 отображены в таблице 4.13.

Проведена статистическая обработка полученных значений прогибов при значении коэффициента Стьюдента $t=4,303$. Относительная погрешность полученных экспериментальных данных не превысила 3 %.

Таблица 4.13 – Прогибы конфигурации № 4

№ опыта	Нагрузка, кН/м ²	Прогиб по ИЧ № 1, мм	Прогиб по ИЧ № 2, мм	Среднее значение прогиба в опыте W_0 , мм	Расчетное значение прогиба $W_{орасч}$, мм	Отклонение экспериментального значения от расчетного, %
1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0
	0,34	2,82	2,76	2,79	2,82	-1
	0,62	5,54	5,53	5,54	5,14	8
	0,95	8,28	8,36	8,32	7,88	6
	1,22	9,98	11,03	10,51	10,12	4

Продолжение таблицы 4.13

№ опыта	Нагрузка, кН/м ²	Прогиб по ИЧ № 1, мм	Прогиб по ИЧ № 2, мм	Среднее значение прогиба в опыте W_0 , мм	Расчетное значение прогиба $W_{0расч}$, мм	Отклонение экспериментального значения от расчетного, %
2	0	0	0	0	0	0
	0,34	2,76	2,71	2,74	2,82	-3
	0,62	5,49	5,43	5,46	5,14	6
	0,95	8,21	8,12	8,17	7,88	4
	1,22	9,78	10,79	10,29	10,12	2
3	0	0	0	0	0	0
	0,34	2,73	2,75	2,74	2,82	-3
	0,62	5,42	5,51	5,47	5,14	6
	0,95	8,11	8,25	8,18	7,88	4
	1,22	9,72	10,84	10,28	10,12	2

По результатам испытаний построен график изменения максимального прогиба в зависимости от нагрузки (рисунок 4.28), который имеет вид прямой, что свидетельствует об упругой работе конструкции. Средние арифметические значения прогибов для построения графика равны 2,76, 5,49, 8,22, 10,36 мм.

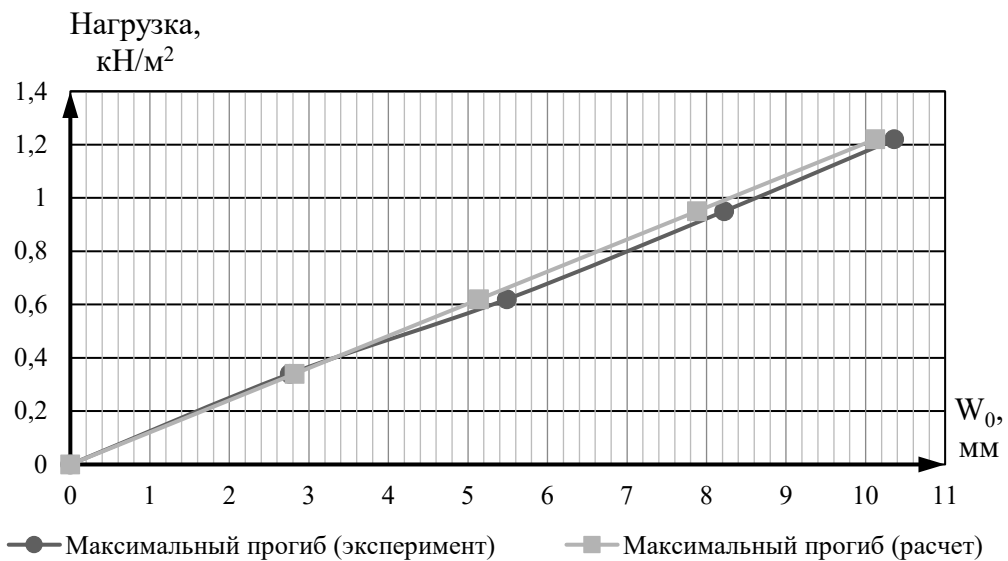


Рисунок 4.28 – Расчетные и экспериментальные значения максимального прогиба в зависимости от нагрузки в конфигурации № 4

Для каждого шага нагрузки определены нормальные краевые напряжения, отображенные в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Нормальные краевые напряжения в конфигурации № 4

№ опыта	Нагрузка, кН/м ²	Нормальное напряжение σ в точке R_{11} , кН/м ²	Нормальное напряжение σ в точке R_{21} , кН/м ²	Расчетное нормальное напряжение σ в точке R_{11} , кН/м ²	Расчетное нормальное напряжение σ в точке R_{21} , кН/м ²	Отклонение экспериментального значения от расчетного в точке R_{11} , %	Отклонение экспериментального значения от расчетного в точке R_{21} , %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,34	-1100	-840	-1122	-885	-2	-5
	0,62	-2170	-1700	-2046	-1618	6	5
	0,95	-3230	-2490	-3135	-2350	3	6
	1,22	-4250	-3290	-4025	-3170	5	4
2	0,34	-1060	-820	-1122	-885	-6	-8
	0,62	-2140	-1620	-2046	-1618	4	0
	0,95	-3190	-2430	-3135	-2350	2	3
	1,22	-4220	-3220	-4025	-3170	5	2
3	0,34	-1080	-840	-1122	-885	-4	-5
	0,62	-2130	-1630	-2046	-1618	4	1
	0,95	-3200	-2450	-3135	-2350	2	4
	1,22	-4210	-3240	-4025	-3170	4	2

Проведена статистическая обработка полученных значений нормальных краевых напряжений в конфигурации № 4 при значении коэффициента Стьюдента $t=4,303$. Относительная погрешность полученных экспериментальных данных не превысила 7 %.

На рисунке 4.29 изображены расчетные и экспериментальные значения нормальных краевых напряжений в точках R_{11} и R_{21} в зависимости от величины нагрузки для конфигурации № 4. Средние арифметические значения для каждого шага нагрузки в тензорезисторе R_{11} равны -1080, -2147, -3207, -4227 кН/м²; в тензорезисторе R_{21} равны -833, -1650, -2457, -3250 кН/м².

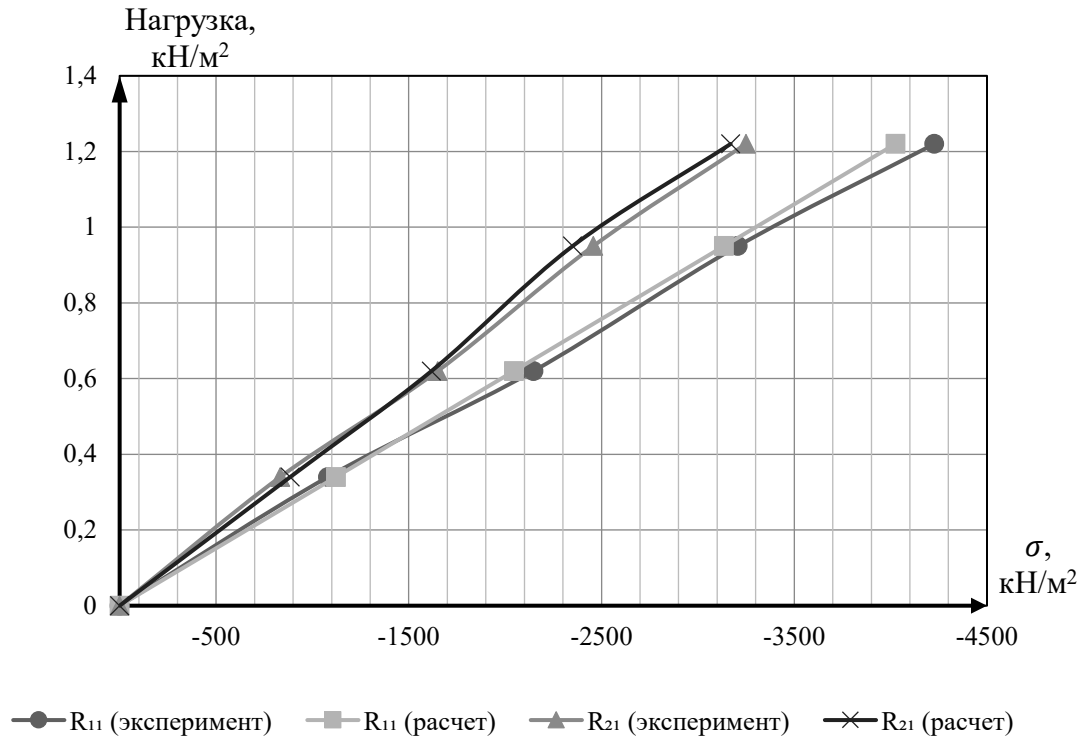


Рисунок 4.29 – Расчетные и экспериментальные значения нормальных краевых напряжений в зависимости от нагрузки в конфигурации № 4

Анализируя данные таблиц 4.13-4.14 можно сделать вывод, что опыты проведены с высокой точностью, так как относительная погрешность при измерении прогибов составила не более 3 %; при измерении нормальных напряжений - не более 7 %. Отклонение экспериментального значения прогиба от расчетного составляет от 2 % до 6 %, что подтверждает высокую сходимость численных и экспериментальных данных.

Отклонение нормальных напряжений от расчетных для тензорезистора R_{11} составило от 2 % до 6 %; для тензорезистора R_{21} – от 1 % до 8 %.

4.5.5 Статические испытания пятислойной плиты из ДПК (конфигурация № 5)

Для исследования НДС пятислойной плиты из ДПК было проведено 3 опыта с нагрузками 0,62 кН/м², 1,22 кН/м², 1,84 кН/м², 2,42 кН/м², 3,02 кН/м².

Результаты исследования прогибов конфигурации № 5 отображены в таблице 4.15. Проведена статистическая обработка полученных значений прогибов при значении коэффициента Стьюдента $t=4,303$. Относительная погрешность полученных экспериментальных данных не превысила 4 %.

Таблица 4.15 – Прогибы конфигурации № 5

№ опыта	Нагрузка, кН/м ²	Прогиб по ИЧ № 1, мм	Прогиб по ИЧ № 2, мм	Среднее значение прогиба в опыте W_0 , мм	Расчетное значение прогиба $W_{0расч}$, мм	Отклонение экспериментального значения от расчетного, %
1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0
	0,62	1,3	1,32	1,31	1,28	2
	1,22	2,6	2,61	2,61	2,52	3
	1,84	3,9	3,91	3,91	3,80	3
	2,42	5,16	5,14	5,15	5,00	3
	3,02	6,34	6,39	6,37	6,23	2
2	0	0	0	0	0	0
	0,62	1,29	1,34	1,32	1,28	3
	1,22	2,57	2,63	2,60	2,52	3
	1,84	3,84	3,92	3,88	3,80	2
	2,42	5,06	5,13	5,10	5,00	2
	3,02	6,35	6,37	6,36	6,23	2
3	0	0	0	0	0	0
	0,62	1,28	1,31	1,30	1,28	1
	1,22	2,56	2,56	2,56	2,52	2
	1,84	3,83	3,87	3,85	3,80	1
	2,42	5,05	5,1	5,08	5,00	2
	3,02	6,32	6,34	6,33	6,23	2

Расчетные и экспериментальные значения максимального прогиба пятислойной плиты из ДПК изменяются в зависимости от нагрузки в соответствии с рисунком 4.30. Линия экспериментальных прогибов построена по средним арифметическим значениям для каждого шага нагружения, равным 1,31, 2,59, 3,88, 5,11, 6,35 мм.

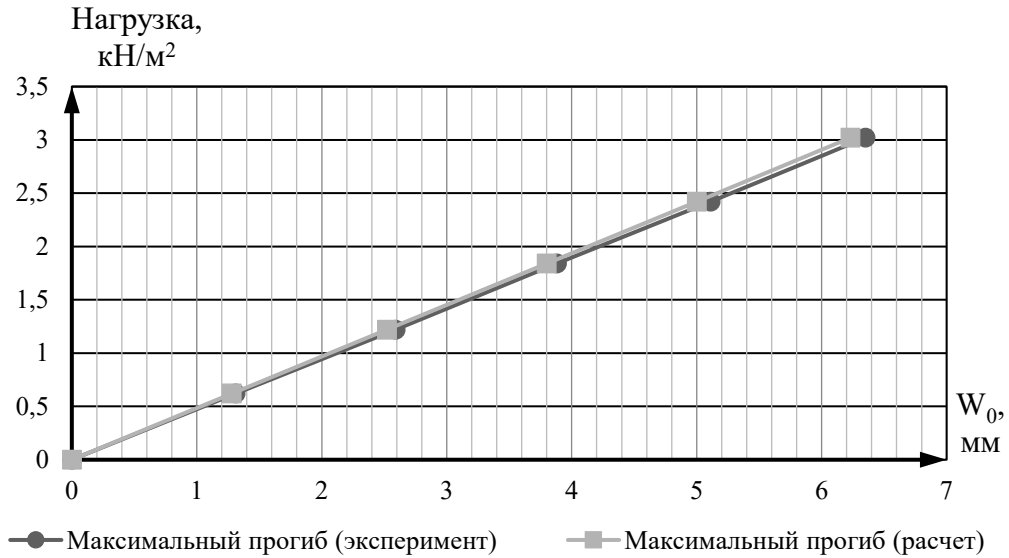


Рисунок 4.30 – Расчетные и экспериментальные значения максимального прогиба в зависимости от нагрузки в конфигурации № 5

Измеренные нормальные краевые напряжения для конфигурации № 5 занесены в таблицу 4.16.

Таблица 4.16 – Нормальные краевые напряжения в конфигурации № 5

№ опыта	Нагрузка, кН/м ²	Нормальное напряжение σ в точке R_{11} , кН/м ²	Нормальное напряжение σ в точке R_{21} , кН/м ²	Расчетное нормальное напряжение σ в точке R_{11} , кН/м ²	Расчетное нормальное напряжение σ в точке R_{21} , кН/м ²	Отклонение экспериментального значения от расчетного в точке R_{11} , %	Отклонение экспериментального значения от расчетного в точке R_{21} , %
1	0,62	-790	-580	-844	-599	-7	-3
1	1,22	-1570	-1140	-1660	-1179	-6	-3
1	1,84	-2370	-1720	-2504	-1778	-6	-3
1	2,42	-3130	-2260	-3294	-2339	-5	-4
1	3,02	-3900	-2820	-4110	-2919	-5	-4
2	0,62	-770	-590	-844	-599	-10	-2
2	1,22	-1570	-1180	-1660	-1179	-6	0
2	1,84	-2360	-1750	-2504	-1778	-6	-2
2	2,42	-3110	-2290	-3294	-2339	-6	-2
2	3,02	-3880	-2850	-4110	-2919	-6	-2
3	0,62	-780	-580	-844	-599	-8	-3
3	1,22	-1550	-1140	-1660	-1179	-7	-3
3	1,84	-2340	-1720	-2504	-1778	-7	-3
3	2,42	-3100	-2260	-3294	-2339	-6	-4
3	3,02	-3890	-2810	-4110	-2919	-5	-4

Проведена статистическая обработка полученных значений краевых нормальных напряжений в конфигурации № 5 при значении коэффициента Стьюдента $t=4,303$. Относительная погрешность полученных экспериментальных данных не превысила 9 %.

На рисунке 4.31 изображены расчетные и экспериментальные значения нормальных краевых напряжений в точках R_{11} и R_{21} конфигурации № 5 в зависимости от величины нагрузки. Средние арифметические значения для каждого шага нагрузки в тензорезисторе R_{11} равны -780, -1563, -2357, -3113, -3890 кН/м²; в тензорезисторе R_{21} равны -583, -1153, -1730, -2270, -2827 кН/м².

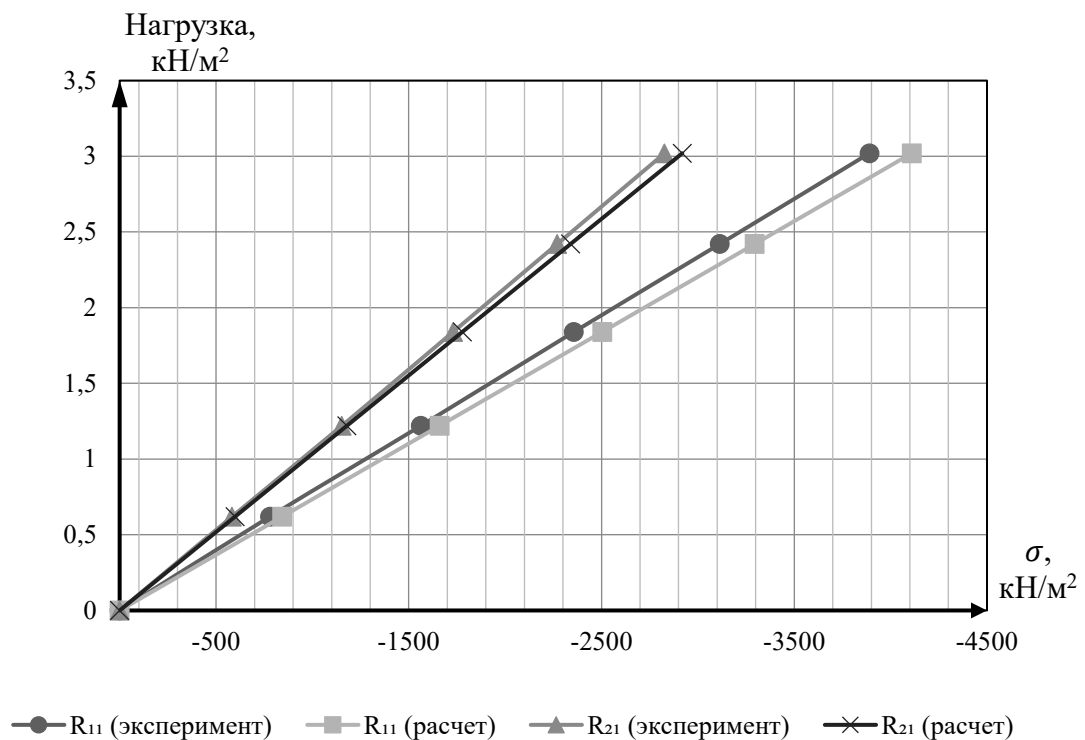


Рисунок 4.31 – Расчетные и экспериментальные значения нормальных краевых напряжений в зависимости от нагрузки в конфигурации № 5

Анализируя данные таблиц 4.15-4.16, можно сказать о высокой точности исследований. В одном опыте наблюдалась Относительная погрешность 9 %, в остальных – не превышало 6 %. Отклонение экспериментальных значений прогибов от расчетных составило до 3 %. Это свидетельствует о высокой точности проделанных исследований.

Отклонения напряжений в точке R_{11} варьируются от 5 % до 9 %. В точке R_{21} отклонения составляют от 2 % до 6 %. Данный факт говорит о высокой сходимости расчета и факта.

4.6 Результаты экспериментальных исследований взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний в плитах из ДПК

4.6.1 Динамические испытания трехслойной плиты из ДПК

Для анализа динамических характеристик трехслойной плиты из ДПК из нескольких опытов была отобрана наиболее «чистая» по сигналу виброграмма с датчика прибора с наиболее подходящей чувствительностью (рисунок 4.32).

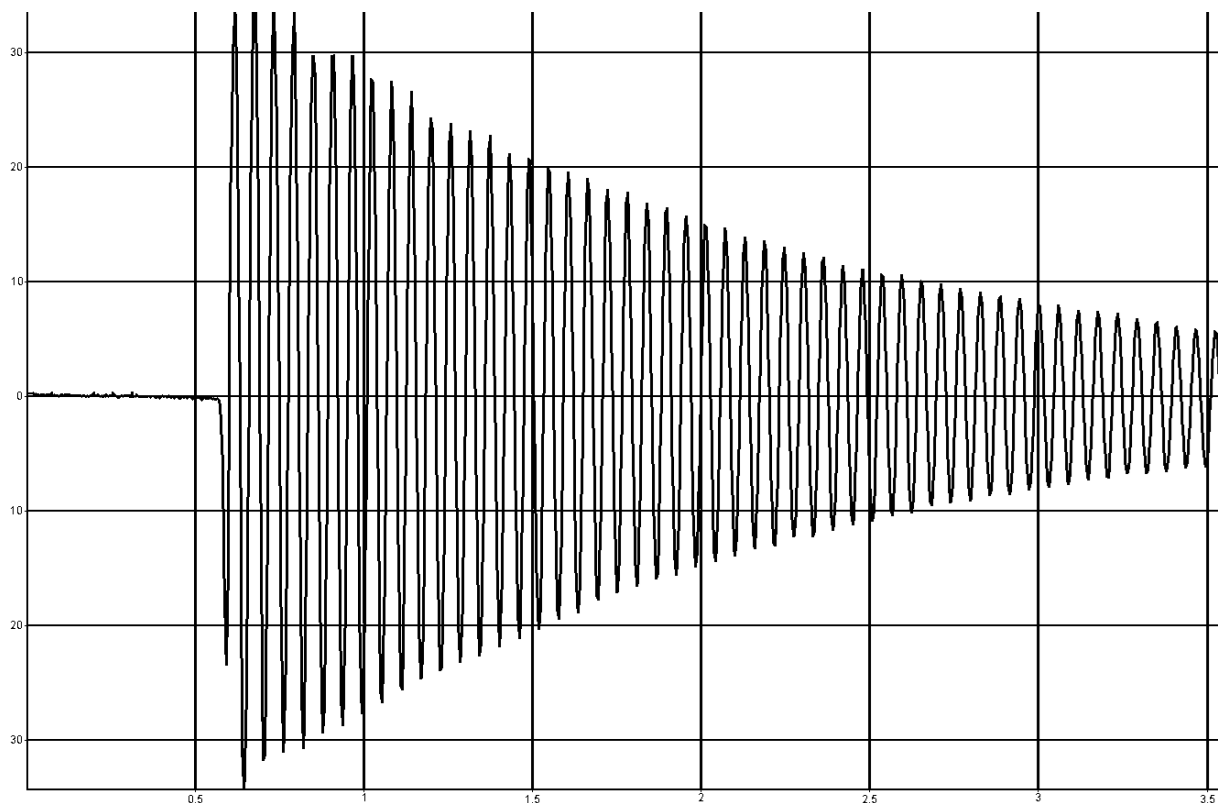


Рисунок 4.32 – Виброграмма собственных колебаний конфигурации № 1

Результаты динамических испытаний трехслойной плиты из ДПК и сопоставление с расчетной моделью SCAD отражены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Результаты динамических испытаний конфигурации № 1

Параметр	Нагрузка q , кН/м ²							
	0,34		0,62		0,95		1,22	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Максимальный прогиб W_0 , мм	2,72	2,41	4,93	4,80	7,60	7,15	9,78	9,45
Вес 1 м ² плиты, кН/м ²	0,1495							
Экспериментальная круговая частота основного тона $\omega_{\text{экс}}$, рад/с	106,814							
Расчетная круговая частота основного тона $\omega_{\text{расч}}$, рад/с	101,976							
$K_{\text{аналит}}$	1,26835							
Коэффициент K	1,27065	1,23433	1,26981	1,35642	1,27039	1,31157	1,26976	1,34538
Отклонение значения K от аналитического, %	0,18	-2,76	0,12	6,49	0,16	3,30	0,11	5,73
Отклонение экспериментального значения K от расчетного, %	-0,56		8,55		5,38		7,80	

Для конфигурации № 1 отклонение коэффициента K от аналитического не превышает 6,49 %, что свидетельствует о применимости закономерности (2.38) для трехслойных плит из ДПК.

Максимальное отклонение экспериментального значения K от расчетной модели составляет 0,56 %-8,55 %, что свидетельствует о достаточно высокой сходимости экспериментальных и численных данных. Отклонения могут быть вызваны погрешностью прибора, разницей в точности, с которой измерена масса реальной плиты и масса расчетной модели и т.д.

4.6.2 Динамические испытания трехслойной плиты из ДПК с утолщенными продольными слоями

Для анализа динамических характеристик трехслойной плиты из ДПК с утолщенными продольными слоями получена виброграмма, изображенная на рисунке 4.33. Результаты динамических испытаний сопоставление с расчетной моделью SCAD отражены в таблице 4.18.

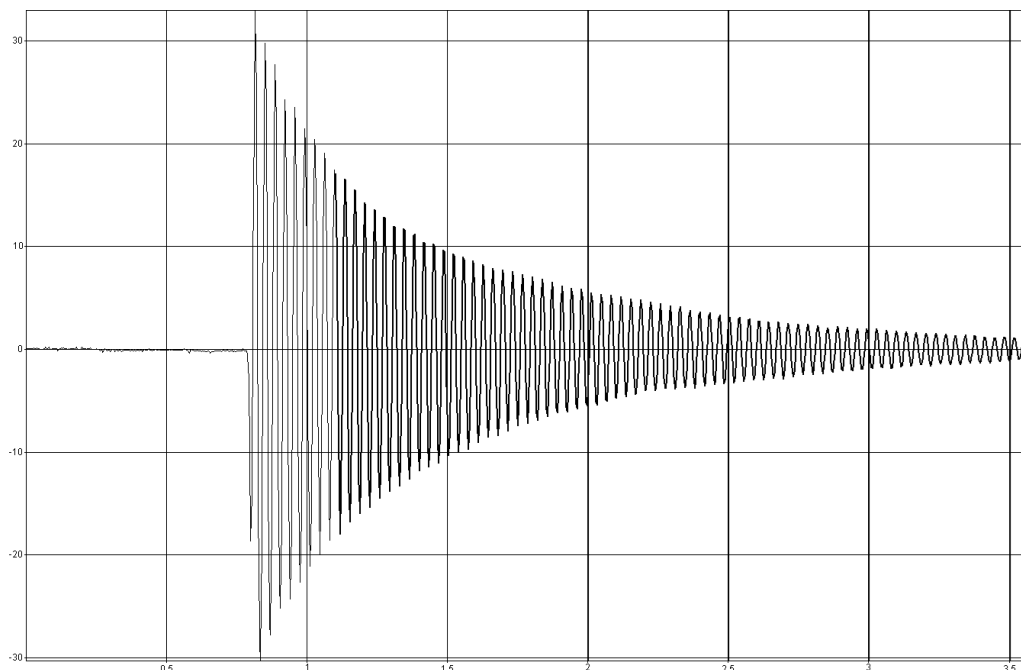


Рисунок 4.33 – Виброграмма собственных колебаний конфигурации № 2

Таблица 4.18 – Результаты динамических испытаний конфигурации № 2

Параметр	Нагрузка q , кН/м ²									
	0,62		1,22		1,84		2,42		3,02	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Максимальный прогиб W_0 , мм	0,97	1,03	1,93	2,03	2,89	3,04	3,81	3,99	4,75	4,87
Вес 1 м ² плиты, кН/м ²	0,2575									
Экспериментальная круговая частота основного тона $\omega_{\text{эксп}}$, рад/с	177,814									
Расчетная круговая частота основного тона $\omega_{\text{расч}}$, рад/с	175,050									
<i>Каналит</i>	1,26835									
Коэффициент K	1,26721	1,38619	1,27094	1,37822	1,26638	1,37301	1,26706	1,36745	1,26663	1,34043
Отклонение значения K от аналитического, %	-0,09	8,50	0,20	7,97	-0,16	7,62	-0,10	7,25	-0,14	5,38
Отклонение экспериментального значения K от расчетного, %	8,58		7,78		7,77		7,34		5,51	

Для конфигурации № 2 отклонение коэффициента K от аналитического не превышает 8,50 %, что свидетельствует о применимости закономерности (2.38) для трехслойных плит из ДПК с утолщенными продольными слоями.

Отклонение экспериментального значения K от расчетной модели составляет 5,51 %-8,58 %. Предположительно, это вызвано тем, что масса расчетной модели отличается от действительной массы конструкции. Однако величина данного отклонения не столь существенна, что говорит о высокой сходимости результатов для плит подобных параметров.

4.6.3 Динамические испытания трехслойной плиты из ДПК с утолщенным поперечным слоем

Для анализа динамических характеристик трехслойной плиты из ДПК с утолщенным поперечным слоем получена виброграмма, изображенная на рисунке 4.34. Результаты динамических испытаний и сопоставление с расчетной моделью SCAD отражены в таблице 4.19.

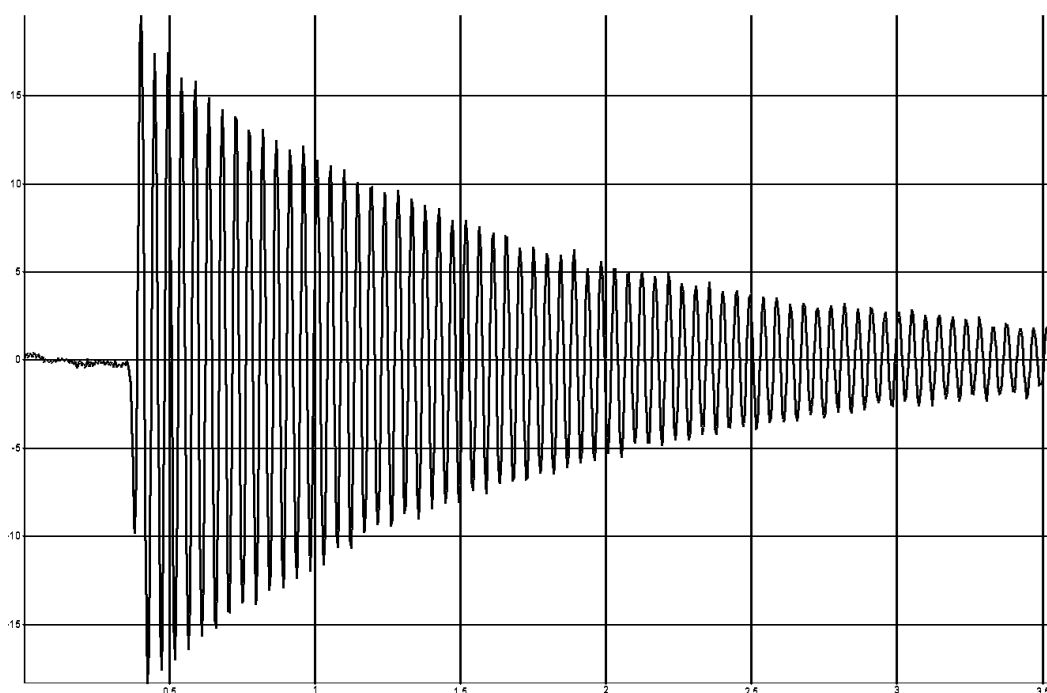


Рисунок 4.34 – Виброграмма собственных колебаний конфигурации № 3

Таблица 4.19 – Результаты динамических испытаний конфигурации № 3

Параметр	Нагрузка q , кН/м ²							
	0,62		1,22		1,84		2,42	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Максимальный прогиб W_0 , мм	2,16	2,05	4,28	4,10	6,43	6,17	8,47	8,17
Вес 1 м ² плиты, кН/м ²	0,2123							
Экспериментальная круговая частота основного тона $\omega_{\text{эксп}}$, рад/с	135,088							
Расчетная круговая частота основного тона $\omega_{\text{расч}}$, рад/с	129,057							
$K_{\text{аналит}}$	1,26835							
Коэффициент K	1,26356	1,31500	1,26205	1,32355	1,26166	1,32681	1,26131	1,33302
Отклонение значения K от аналитического, %	-0,38	3,55	-0,50	4,17	-0,53	4,41	-0,56	4,85
Отклонение экспериментального значения K от расчетного, %	3,91		4,65		4,91		5,38	

Для образца № 3 отклонение коэффициента K от аналитического не превышает 4,41 %, что свидетельствует о применимости закономерности (2.38) для трехслойных плит из ДПК с утолщенным поперечным слоем.

4.6.4 Динамические испытания трехслойной плиты из ДПК с зазорами в поперечном слое

Для анализа динамических характеристик трехслойной плиты из ДПК с зазорами в поперечном слое получена виброграмма частот собственных колебаний (рисунок 4.35).

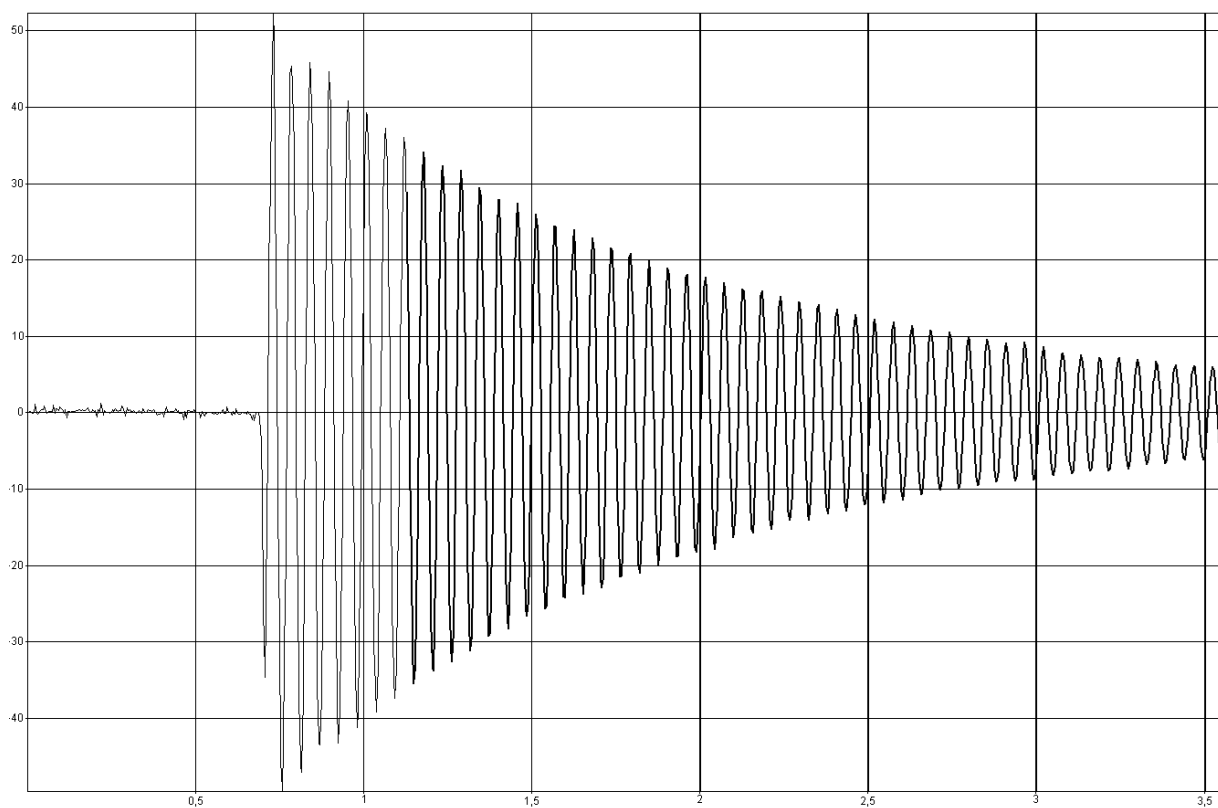


Рисунок 4.35 – Виброграмма собственных колебаний конфигурации № 4

Результаты динамических испытаний трехслойной плиты из ДПК с зазорами в поперечном слое и сопоставление с расчетной моделью SCAD отражены в таблице 4.20.

Таблица 4.20 – Результаты динамических испытаний конфигурации № 4

Параметр	Нагрузка q , кН/м ²							
	0,34		0,62		0,95		1,22	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Максимальный прогиб W_0 , мм	2,82	2,76	5,14	5,49	7,88	8,22	10,12	10,36
Вес 1 м ² плиты, кН/м ²	0,1250							
Экспериментальная круговая частота основного тона $\omega_{\text{эксп}}$, рад/с	110,584							
Расчетная круговая частота основного тона $\omega_{\text{расч}}$, рад/с	110,37							
$K_{\text{аналит}}$	1,26835							
Коэффициент K	1,29020	1,26534	1,29661	1,38941	1,29004	1,35118	1,28682	1,32200
Отклонение значения K от аналитического, %	1,69	-0,24	2,18	8,71	1,68	6,13	1,44	4,06
Отклонение экспериментального значения K от расчетного, %	-1,97		6,68		4,52		2,66	

Для конфигурации № 4 отклонение коэффициента K от аналитического не превышает 8,71 %, что свидетельствует о применимости закономерности (2.38) для трехслойных плит из ДПК с зазорами в поперечном слое.

Отклонение экспериментального значения K от расчетной модели составляет 1,97 %-6,68 %. Данный результат говорит о высокой сходимости теории и эксперимента, как и в предыдущих случаях.

4.6.5 Динамические испытания пятислойной плиты из ДПК

Для анализа динамических характеристик пятислойной плиты из ДПК получена виброграмма, изображенная на рисунке 4.36. Результаты динамических испытаний конфигурации № 5 и сопоставление с расчетной моделью SCAD отражены в таблице 4.21.

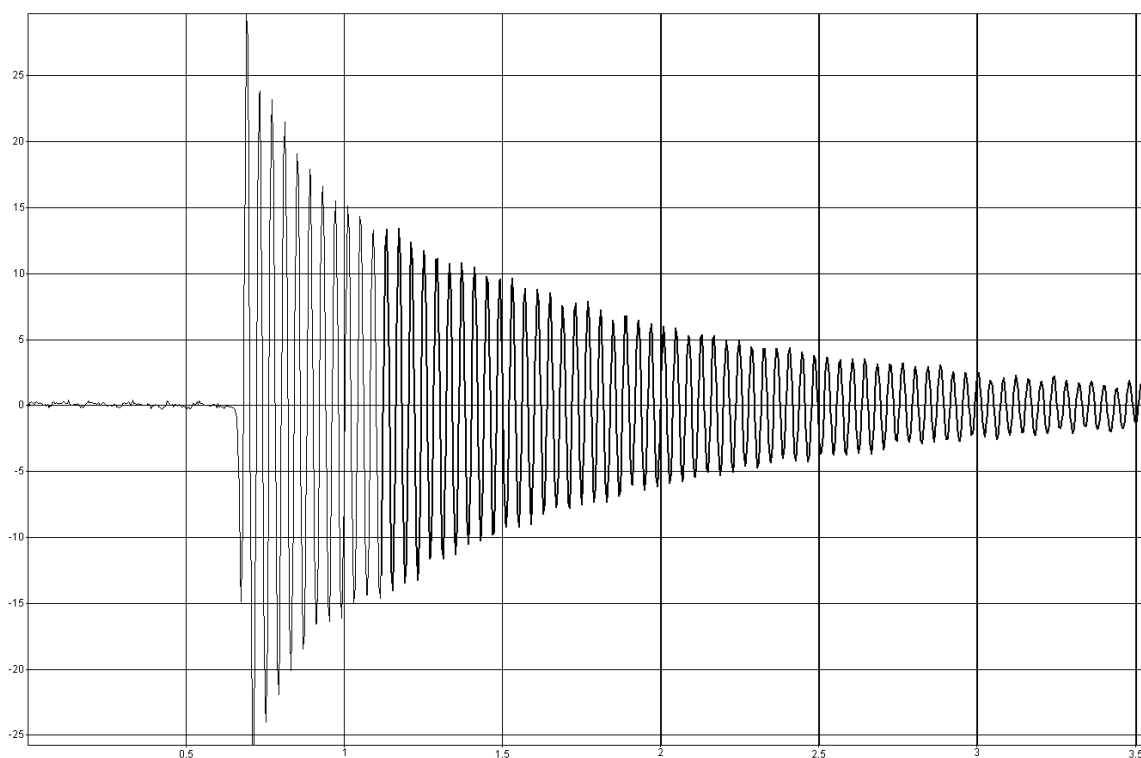


Рисунок 4.36 – Виброграмма собственных колебаний конфигурации № 5

Таблица 4.21 – Результаты динамических испытаний конфигурации № 5

Параметр	Нагрузка q , кН/м ²									
	0,62		1,22		1,84		2,42		3,02	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Максимальный прогиб W_0 , мм	1,28	1,31	22,52	2,59	3,8	3,88	5,00	5,11	6,23	6,35
Вес 1 м ² плиты, кН/м ²	0,249									
Экспериментальная круговая частота основного тона $\omega_{\text{экс}}$, рад/с	156,451									
Расчетная круговая частота основного тона $\omega_{\text{расч}}$, рад/с	154,931									
$K_{\text{аналит}}$	1,26835									
Коэффициент K	1,26625	1,31812	1,25661	1,31613	1,26090	1,31227	1,25914	1,31136	1,25798	1,30785
Отклонение значения K от аналитического, %	-0,17	3,78	-0,93	3,63	-0,59	3,35	-0,73	3,28	-0,82	3,02
Отклонение экспериментального значения K от расчетного, %	3,94		4,52		3,91		3,98		3,81	

Для конфигурации № 5 отклонение коэффициента K от аналитического не превышает 3,78 %, что свидетельствует о применимости закономерности для пятислойных плит перекрытия из ДПК.

Отклонение экспериментального значения K от расчетной модели составляет 3,81 % - 4,52 %.

4.7 Выводы по четвертой главе

1. Проведена верификация конечно-элементных моделей, использованных в численных исследованиях для анализа несущей способности и деформативности плит перекрытия из древесины перекрестноклееной.

2. Достигнута высокая сходимость между численными и экспериментальными данными. Расхождения по средним значениям максимального прогиба конструкций не превышают 10 %; по напряжениям в зоне их максимума (тензорезистор R_{11}) – в основном не выше 10 %, за исключением конфигурации № 3, где отклонение составляет от 17 % до 23 % (что связано с разностью действительных и принятых упругих характеристик, неоднородностью древесины и т.д.).

3. Экспериментально подтверждены зависимости несущей способности и деформативности от геометрических параметров сечения, полученные в ходе численных исследований.

4. Экспериментально доказано, что произведение максимального прогиба на квадрат частоты основного тона собственных колебаний является инвариантной для двусторонне опертых плит перекрытия из ДПК независимо от геометрической конфигурации сечения. Отклонение экспериментального значения коэффициента K от значения, полученного в расчетных моделях, не превышает 9 %. Это может быть связано с погрешностью самого виброанализатора, начальной неровностью опытных образцов, а также другими факторами.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ ДВУСТОРОННЕ ОПЕРТЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗ ДПК

5.1 Алгоритм определения максимального прогиба и нормальных напряжений плит перекрытия из ДПК

Ранее была численно и экспериментально подтверждена закономерность о взаимосвязи основной частоты собственных колебаний и максимального прогиба для двусторонне опертых плит перекрытия из древесины перекрестноклееной с различными конфигурациями сечения. На основании этого разработана методика оценки действительной несущей способности и деформативности двусторонне опертых плит перекрытия из древесины перекрестноклееной.

Необходимо определить частоту собственных колебаний плиты перекрытия, при этом в расчетах используется значение основного тона

По формуле (5.1) вычисляется значение круговой частоты:

$$\omega = 2 * \pi * f, \quad (5.1)$$

где f – техническая частота колебаний, полученная прибором.

По формуле (5.2), выведенной из закономерности в предыдущих разделах, определяется значение действительного максимального прогиба W_{max} конструкции:

$$W_{max} = \frac{Kq}{m\omega^2}, \quad (5.2)$$

где q – рассматриваемая равномерно распределенная нагрузка, кН/м²; m – масса 1 м² конструкции, т/м²; ω – частота собственных колебаний, рад/с; K – коэффициент пропорциональности (для заданного условия опирания – 1,26835).

Для проверки по 2 группе предельных состояний необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$f_{max} \leq f_{и}, \quad (5.3)$$

где f_{max} – максимальный прогиб конструкции (W_{max}), м; $f_{и}$ – предельный прогиб, определяемый в соответствии с [78], таблица Д.1.

В соответствии с руководствами по проектированию конструкций из древесины перекрестноклееной [134, 149, 161, 202], прогиб от равномерно распределенной нагрузки в центре двусторонне опертой плиты перекрытия можно определить по формуле (5.4):

$$W_{max} = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{(EI)_{eff}}, \quad (5.4)$$

где q – равномерно распределенная нагрузка, кН/м²; L – величина пролета плиты перекрытия, м; $(EI)_{eff}$ – эффективная изгибная жесткость конструкции, кН*м².

Таким образом, объединяя уравнения (5.2) и (5.4), можно вычислить эффективную жесткость плиты перекрытия из древесины перекрестноклееной по формуле (5.5):

$$(EI)_{eff} = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{W_{max}} = \frac{5}{384} \frac{L^4 m \omega^2}{K}. \quad (5.5)$$

В отличие от проектной, полученная жесткость учитывает условия опирания, действительные упругие характеристики конструкции и пр.

Изгибающий момент для двусторонне опертой плиты перекрытия из древесины перекрестноклееной, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой можно определить по формуле (5.6):

$$M_y = \frac{qL^2}{8}. \quad (5.6)$$

По значениям изгибающих моментов вычисляются нормальные напряжения в центре пролета [134]:

$$\sigma_y = \frac{1}{2} \frac{E_y h M_y}{(EI)_{eff}}. \quad (5.7)$$

Тогда, объединяя уравнения (5.5), (5.6) и (5.7), получим уравнение для определения действительного краевого нормального напряжения плиты перекрытия в центре пролета:

$$\sigma_y = \frac{24}{5} K \frac{E_y h q}{L^2 m \omega^2}, \quad (5.8)$$

где E_y – модуль упругости крайнего слоя плиты перекрытия (нормативное или паспортное значение), кН/м², h – толщина плиты из ДПК, м.

Для проверки по 1 группе предельных состояний необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\sigma_y \leq R_{и}^p, \quad (5.9)$$

где $R_{и}^p$ – расчетное сопротивление изгибу.

В соответствии с [80]:

$$R_{и}^p = R_{и}^н * m_{дл} * Пm_i / \gamma_m, \quad (5.10)$$

где $R_{и}^н$ – нормативное сопротивление изгибу, $m_{дл}$ – коэффициент длительной прочности (таблица 4 [80]), $Пm_i$ – произведение условий работы (п 6.9 [80]), γ_m – коэффициент надежности по материалу (таблица 6 [80]).

С целью верификации, по представленным формулам был произведен расчет значений максимального прогиба W_{max} и нормального краевого напряжения σ_y для исследованных ранее экспериментальных образцов.

В таблице 5.1 приведено сопоставление экспериментальных данных с результатами расчета.

Таблица 5.1 – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

№ типа	ω , рад/с	q , кН/м ²	$W_{max}^{эксп}$, мм	$W_{max}^{метод}$, мм	Отклонение W , %	$\sigma_y^{эксп}$, кН/м ²	$\sigma_y^{метод}$, кН/м ²	Отклонение σ , %
1	106,81	0,34	2,44	2,48	1,65	957,67	989,338	-3,20
		0,62	4,83	4,49	-7,55	1966,67	1789,54	9,01
		0,95	7,15	6,91	-3,45	2923,33	2757,05	5,69
		1,22	9,45	8,92	-5,97	3850,00	3557,25	7,60
2	177,81	0,62	1,03	0,94	-9,59	688,67	624,853	10,21
		1,22	2,02	1,87	-8,12	1403,33	1242,09	11,49
		1,84	3,02	2,80	-7,69	2126,67	1864,4	12,33
		2,42	3,97	3,69	-7,45	2803,33	2456,23	12,38
		3,02	4,80	4,61	-4,09	3480,00	3065,85	13,51

Продолжение таблицы 5.1

№ типа	ω , рад/с	q , кН/м ²	$W_{max}^{эксп}$, мм	$W_{max}^{метод}$, мм	Отклонение W , %	$\sigma_y^{эксп}$, кН/м ²	$\sigma_y^{метод}$, кН/м ²	Отклонение σ , %
3	135,09	0,62	2,05	1,98	-3,85	978,33	1050,74	-6,89
		1,22	4,10	3,93	-4,32	1963,33	2088,67	-6,38
		1,84	6,17	5,89	-4,70	2966,67	3135,14	-5,68
		2,42	8,17	7,77	-5,20	3916,67	4130,36	-5,46
4	110,58	0,34	2,76	2,77	0,45	1080,00	1103,95	-2,17
		0,62	5,49	5,01	-9,60	2146,67	1996,84	6,98
		0,95	8,22	7,71	-6,60	3206,67	3076,44	4,06
		1,22	10,36	9,95	-4,08	4226,67	3969,33	6,09
5	156,45	0,62	1,31	1,26	-4,07	780,00	834,702	-6,55
		1,22	2,59	2,50	-3,71	1563,33	1659,22	-6,13
		1,84	3,88	3,75	-3,53	2356,67	2490,53	-5,68
		2,42	5,11	4,94	-3,47	3113,33	3281,12	-5,39
		3,02	6,35	6,16	-3,11	3890,00	4095,47	-5,28

Отклонения между экспериментальными и расчетными значениями максимального прогиба для всех образцов с различными геометрическими конфигурациями слоев составляют не более 10 % (в среднем 5 %). Также достигнута высокая сходимость по нормальным напряжениям, так как отклонения не превышают 13 % (в среднем 7 %).

Алгоритм проведения оценки несущей способности и деформативности двусторонне опертых плит перекрытия из древесины перекрестноклееной представлен на рисунке 5.1.

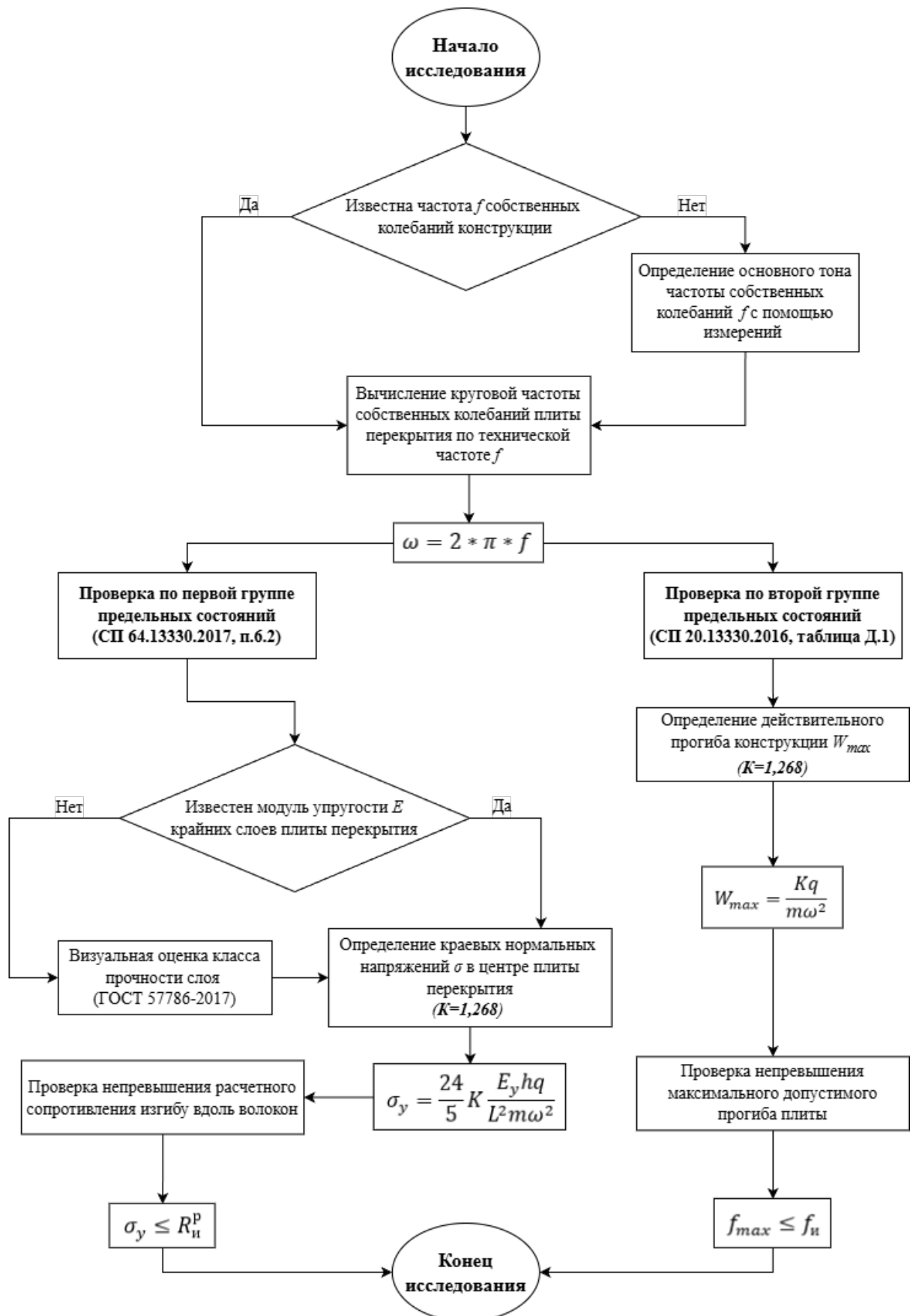


Рисунок 5.1 – Алгоритм оценки действительной несущей способности и деформативности двусторонне опертых плит перекрытия из древесины перекрестноклееной

Настоящая методика описывает последовательность действий при инженерном обследовании плит перекрытия по первой и второй группам предельных состояний и может быть применена для двух основных расчетных ситуаций (сценариев):

- 1) приемочный (входной) контроль смонтированной конструкции с целью определения соответствия проектным данным и качества монтажа;
- 2) обследование конструкции при возобновлении (разморозке после консервации) строительства с целью выявления деградации жесткостных характеристик.

Последовательность исследования:

1. Определение динамических характеристик конструкции.

1.1. Проведение натурных испытаний должно включать предварительную разгрузку плиты, так как для корректности полученных результатов необходима равномерно распределенная нагрузка.

1.2. Производится оценка наличия исходных данных о частоте собственных колебаний обследуемой плиты перекрытия.

Если частота f известна по результатам предыдущих испытаний или мониторинга, то необходимо перейти к следующему шагу.

В противном случае проводятся динамические испытания с помощью виброметрического оборудования, в ходе которого определяется значение основного тона частоты собственных колебаний.

1.3. По формуле (5.1) устанавливается значение циклической частоты собственных колебаний плиты.

2. Оценка по второй группе предельных состояний.

2.1. Производится расчет максимального прогиба конструкции с использованием коэффициента пропорциональности $K = 1,268$ по формуле (5.2).

2.2. Выполняется проверка условия жесткости (5.3). Значение предельно допустимого прогиба подбирается в соответствии с требованиями СП

20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85» таблица Д.1.

3. Оценка по первой группе предельных состояний.

3.1. Определяются упругие характеристики материала. Если модуль упругости E_y крайних слоев известен (паспорт конструкции, экспериментальные исследования и т.д.), то он используется в расчетах.

В противном случае производится визуальная оценка класса прочности древесины крайнего видимого слоя конструкции в соответствии с ГОСТ 57786-2017 «Конструкции деревянные клееные несущие. Визуальная сортировка слоев по классам прочности».

На основании установленного класса прочности назначается расчетное значение модуля упругости E_y .

3.2. По формуле (5.8) вычисляются максимальные краевые напряжения σ_y в центре пролета плиты перекрытия с использованием коэффициента пропорциональности $K = 1,268$.

3.3. Выполняется проверка условия прочности (5.9) в соответствии с СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.» п. 6.2. При этом значение расчетного сопротивления $R_{и}^p$ вычисляется по формуле (5.10).

4. Анализ результатов и принятие решения.

На заключительном этапе производится сопоставление полученных данных и принимается решение о соответствии смонтированной конструкции нормативным требованиям.

Возможны следующие варианты

1) При несоответствии 2-х условий или условия по первой группе предельных состояний обследуемая конструкция признается неработоспособной и требует немедленного усиления или замены, так как не обеспечена ее несущая способность. Дальнейшее нагружение или эксплуатация запрещены.

2) При несоответствии по второй группе предельных состояний конструкция признается ограниченно-работоспособной, так как жесткость системы ниже нормативной.

Для приемочного контроля требуется дополнительная проверка узлов опирания и качества монтажа. После устранения выявленных дефектов, проводятся повторные испытания.

Для обследования при возобновлении строительства снижение жесткости может свидетельствовать как о накопившейся ползучести, так и о внутренних скрытых дефектах. Конструкция требует более детального обследования замены или.

3) При соответствии обоим условиям конструкция признается работоспособной и принятой для последующего нагружения. Фактические значения частот, прогибов и напряжений заносятся в исполнительную техническую документацию.

Для формирования базы данных мониторинга и последующих обследований фактические значения частот, расчетных прогибов и нормальных напряжений в обязательном порядке заносятся в исполнительную техническую документацию или паспорт объекта.

5.2 Выводы по пятой главе

1. Разработана методика неразрушающей оценки действительной несущей способности и деформативности двусторонне опертых плит перекрытия из древесины перекрестноклееной.

2. Точность методики подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными: отклонение расчётных значений прогиба от опытных не превышает 10 % (в среднем 5 %), напряжений – 13 % (в среднем 7 %).

3. Оценка несущей способности по первой группе предельных состояний характеризуется большей погрешностью и не учитывает влияние касательных напряжений, которые существенны при отношении пролёта к толщине $L/h < 6$. Для таких случаев требуется дополнительная проверка прочности на сдвиг и его учет в деформативности всей конструкции.

4. Коэффициент пропорциональности $K=1,268$, применённый в разработанной методике, корректен только для двустороннего опирания. Для других условий опирания (контурное опирание, опирание по 3 сторонам), значение K будет отличаться, и его исследование является перспективным направлением дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Анализ современных исследований плит из древесины перекрестноклееной (ДПК) показал, что на сегодняшний день актуальной задачей является изучение влияния параметров отдельно взятых слоев на напряженно-деформированное состояние всей конструкции. Показано, что из-за сложной структуры, условий опирания и необходимости наличия исчерпывающей информации об упругих характеристиках плиты перекрытия из ДПК, существует необходимость развития неразрушающих динамических методов оценки действительной несущей способности и деформативности. Определены существующие подходы к исследованию физико-механических характеристик в натуральных условиях. Выявлено, что современные методы оценки не дают прямой связи между действительной жесткостью конструкции и её напряженно-деформированным состоянием. Установлено, что решением данной проблемы является вибрационный метод оценки несущей способности и деформативности реализуемый через взаимосвязь максимального прогиба и частоты основного тона собственных колебаний плиты перекрытия.

2. Теоретически установлена закономерность о взаимосвязи максимального прогиба и частоты основного тона собственных колебаний для плит перекрытия из древесины перекрестноклееной при линейно-упругой работе конструкции. Доказана возможность выражения этой взаимосвязи через постоянный для заданных условий опирания коэффициент пропорциональности K .

3. Установлены зависимости нормальных напряжений и максимального прогиба в плитах перекрытия из ДПК при действии статической нагрузки от изменения геометрических параметров слоев и условий опирания. Показано, что толщина продольных слоев, толщина поперечных слоев и шаг ламелей (воздушные зазоры) в поперечных слоях с разной интенсивностью влияют на напряженно-деформированное состояние конструкции.

4. Численно доказана закономерность о взаимосвязи максимального прогиба W_0 и квадрата основной частоты собственных колебаний ω^2 для плит перекрытия из ДПК с различными конфигурациями сечения и условиями двустороннего опирания. Установлено, что для рассматриваемых объектов исследования сохраняется инвариантность коэффициента пропорциональности K .

5. Экспериментально верифицирована использованная конечно-элементная модель и подтверждена достоверность полученных результатов численных исследований. Преимущественно наблюдалась высокая сходимость результатов расчета и эксперимента (отклонения не превышали 10 % в подавляющем большинстве случаев).

6. Разработан универсальный и быстрый метод оценки несущей способности (с точностью $\pm 13\%$) и деформативности (с точностью $\pm 10\%$) плит перекрытия из ДПК, реализуемый для различных конфигураций сечения конструкции и условий двустороннего опирания.

7. Предложены методика и алгоритм оценки действительной несущей способности и деформативности двусторонне опертых плит перекрытия из ДПК.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Актуальным направлением является численное определение коэффициента пропорциональности K для плит перекрытия из ДПК при трёх- и четырёхстороннем опирании с различным соотношением сторон.

На базе доказанной закономерности о взаимосвязи максимального прогиба и основной частоты собственных колебаний перспективно создание справочных таблиц со значениями коэффициента K для различных схем опирания, соотношений сторон и конфигураций слоистого пакета, а также внедрение данного параметра в методы неразрушающего контроля и/или разработка на его основе новых инженерных методик.

Необходимо установить подобную закономерность для плит перекрытия из ДПК с существенным влиянием сдвиговых деформаций, описываемых уточненными теориями пластин (например, теория Миндлина-Рейсснера).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абашин, Е. Г. Метод контроля модуля упругости бетона и площади рабочей арматуры в железобетонных балках : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.11.13 / Е. Г. Абашин ; Гос. ун-т – учебно-научно-произв. комплекс. – Орёл, 2012. – 143 с.
2. Амбарцумян, С. А. Теория анизотропных пластин: Прочность, устойчивость и колебания / С. А. Амбарцумян. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 360 с.
3. Ашкенази, Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е. К. Ашкенази. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 224 с.
4. Беличенко, М. Ю. Строительство многоэтажных зданий на основе древесины / М. Ю. Беличенко, Л. Р. Ахметова, В. А. Дроздова // Проблемы современной науки и инноваций. – 2016. – № 12. – С. 31–38.
5. Белянкин, Ф. П. Деформативность и сопротивляемость древесины как упруго-вязко-пластического тела / Ф. П. Белянкин, В. Ф. Яценко. – Киев : Изд-во АН УССР, 1957. – 200 с.
6. Бубис, А. А. Особенности поведения древесины перекрёстно-клееной (ДПК/CLT) при статических и динамических нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия / А. А. Бубис, И. Р. Гизятуллин, А. Н. Хворова, И. Ю. Петров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2022. – № 2. – С. 62–80. – DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80.
7. Великанов, П. Г. Расчет ортотропных пластин и оболочек методом граничных элементов : дис. канд. физ.-мат. наук : 01.02.04 / Великанов Петр Геннадьевич. – Казань, 2008. – 200 с.
8. Гвозков, П. А. Оценка жесткости составных деревянных и дерево-металлических балок вибрационным методом : дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Гвозков Павел Александрович. – Орел, 2008. – 155 с.

9. Глухих, В. Н. Анализ модуля упругости анизотропного материала на примере древесины / В. Н. Глухих, С. С. Красильникова // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 3. – С. 21–26.
10. Глухих, В. Н. Анизотропия древесины как фактор для повышения качества сушки пиломатериалов / В. Н. Глухих. – СПб. : Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2007. – 162 с.
11. Глухих, В. Н. Анизотропия древесины: технологический аспект / В. Н. Глухих, А. Г. Черных. – СПб. : СПбГАСУ, 2013. – 240 с.
12. Глухих, В. Н. Исследование экспериментальных данных по изгибу CLT-плит, опертых по четырем сторонам / В. Н. Глухих, Л. Н. Кондратьева, В. И. Корсун, П. С. Коваль, Д. В. Тихомиров // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 6.
13. Голова, Т. А. Анализ методов расчета слоистых пластин и оболочек для расчета многослойных конструкций / Т. А. Голова, Н. В. Андреева // Вестник Евразийской науки. – 2019. – № 5.
14. ГОСТ 16483.0-89. Древесина. Общие требования к физико-механическим испытаниям. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 12 с.
15. ГОСТ 16483.9-73. Древесина. Методы определения модуля упругости при статическом изгибе. – Введ. 1974-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1973. – 8 с.
16. ГОСТ 16588-79. Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 10 с.
17. ГОСТ Р 56706-2015. Плиты клееные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Технические условия. – М. : Российский институт стандартизации, 2015. – 16 с.
18. ГОСТ Р 56706-2022. Плиты из перекрестноклееной древесины. Общие технические условия. – М. : Российский институт стандартизации, 2022. – 18 с.
19. ГОСТ Р 70749-2023. Плиты из древесины перекрестноклееной. Методы оценки прочности и стойкости клеевых соединений. – М. : Российский институт стандартизации, 2023. – 16 с.

20. Дементьев, Д. А. Современный опыт строительства многоквартирных деревянных домов в зарубежных странах / Д. А. Дементьев // *Architecture and Modern Information Technologies*. – 2020. – № 1(50). – С. 95–108. – DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15006.
21. Дмитриев, П. А. Конструкции из дерева и пластмасс: специальный курс. Автодорожные и пешеходные мосты : учеб. пособие / П. А. Дмитриев ; НГАСУ. – Оренбург : ИПК «Газпромпечатъ», 2002. – 191 с.
22. Есауленко, И. В. Перспективы развития высотного деревянного домостроения в России на примере зарубежного опыта / И. В. Есауленко // *Архитектура, строительство, транспорт*. – 2021. – № 4. – С. 17–25. – DOI: 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25.
23. Журавлева, Т. П. Особенности конструирования многоэтажных деревянных зданий / Т. П. Журавлева, К. А. Батманова // *Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых-2017*. – Архангельск, 2017. – С. 199–203.
24. Зенкевич, О. К. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред / О. К. Зенкевич, Н. Чанг ; ред. Ю. К. Зарецкий ; пер.: О. П. Троицкий, С. В. Соловьев. – М. : Недра, 1974. – 240 с.
25. Зенкевич, О. К. Метод конечных элементов в технике / О. К. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 543 с.
26. Змеев, М. В. Определение толщины перекрытия из перекрестно-клееных досок на примере CLT-плит Binderholz (Austria) из условия жесткости / М. В. Змеев // *Инженерный вестник Дона*. – 2020. – № 11.
27. Знаменский, Е. М. Совершенствование норм проектирования деревянных конструкций / Е. М. Знаменский // *Состояние и перспективы исследований в области деревянных строительных конструкций : сб. науч. тр. / ЦНИИСК им. Кучеренко*. – М., 1983. – С. 10-22.
28. Иванов, В. Ф. Деревянные конструкции / В. Ф. Иванов. – Ленинград : Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1956. – 317 с.

29. Инжутов, И. С. Конструкции из дерева и пластмасс / И. С. Инжутов, В. И. Жаданов, И. П. Пинайкин. – Оренбург : ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – 292 с.
30. Калашников, М. О. Диагностика и контроль качества строительных конструкций вибрационными методами : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Калашников Михаил Олегович ; ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК». – Орел, 2011. – 23 с.
31. Каменев, И. В. Напряженно-деформированное состояние цилиндрических оболочек из перекрестно-клееной древесины : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.23.01 / И. В. Каменев ; СПбГАСУ. – Санкт-Петербург, 2024. – 203 с.
32. Карлсен, Г. Г. Конструкции из дерева и пластмасс : учеб. для вузов по спец. "Пром. и гражд. стр-во" / Ю. В. Слицкоухов, В. Д. Буданов, М. М. Гаппоев и др. ; под ред. Г. Г. Карлсена и Ю. В. Слицкоухова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1986. – 543 с.
33. Карпиловский, В. С. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++ / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер, С. Ю. Фиалко. – М. : СКАД СОФТ, 2015. – 848 с.
34. Ковальчук, Л. М. Производство деревянных клееных конструкций / Л. М. Ковальчук. – М. : Стройматериалы, 2005. – 334 с.
35. Коробко, А. В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости / А. В. Коробко. – М. : АСВ, 1999. – 302 с.
36. Коробко, А. В. Метод интерполяции по коэффициенту формы в механике деформируемого твердого тела / А. В. Коробко. – Ставрополь : Изд-во Ставропольского ун-та, 1995. – 165 с.
37. Коробко, А.В. Изопериметрические закономерности в теории пластинок / А.В. Коробко, М.Ю. Трошин, В.Е. Казеев // Всероссийская научно-практическая конференция «Город XXI века. Мировые тренды и региональные особенности» - Орел: ОГУ, 2024. – С. 661-667.

38. Коробко, В. И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода / В. И. Коробко. – М. : АСВ, 1997. – 396 с.
39. Коробко, В. И. Об одной "замечательной" закономерности в теории упругих пластинок / В. И. Коробко // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1989. – № 11. – С. 32–36.
40. Коробко, В. И. Применение продольных колебаний для диагностики железобетонных конструкций / В. И. Коробко, А. П. Юров // Материалы Всерос. науч.-техн. конф. "Диагностика веществ, изделий и устройств". – Орел : ОрелГТУ, 1999. – С. 118–120.
41. Коробко, В. И. Строительная механика пластинок: Техническая теория / В. И. Коробко, А. В. Коробко. – М. : Спектр, 2010. – 409 с.
42. Королев, А.С. Определение скрытых дефектов в перекрестно-клееных плитах из древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) / А.С. Королев, Е.С. Шарапов, О.С. Егосин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2025. – № 2. – С. 143–153. – DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-143-153.
43. Красильников, Д. И. Интегральная оценка трещиностойкости и прочности железобетонных дорожных плит вибрационным методом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.23.01, 05.23.17 / Д. И. Красильников ; Орлов. гос. техн. ун-т. – Орёл, 2003. – 20 с.
44. Крылов, Н. А. Испытание конструкции сооружений / Н. А. Крылов, К. А. Глуховский. – Л. : Стройиздат, 1970. – 269 с.
45. Кучерюк, В. И. Расчет многослойных пластин с учетом неупругих свойств материала и трещинообразования / В. И. Кучерюк, В. П. Бочагов, Л. И. Никитина, А. А. Фокин // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – № 11. – С. 31–40.
46. Лабудин, Б. В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой : монография / Б. В. Лабудин. – Архангельск : АГТУ, 2007. – 267 с.

47. Лехницкий, С. Г. Анизотропные пластинки / С. Г. Лехницкий. – М., Л. : Гостехиздат, 1947. – 355 с.
48. Лехницкий, С. Г. Теория упругости анизотропного тела / С. Г. Лехницкий. – М., Л. : Гостехиздат, 1950. – 300 с.
49. Макаров, А. А. Деформативность систем перекрёстных балок из клееной древесины при статическом и динамическом нагружении : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.23.01 / А. А. Макаров ; Юго-Зап. гос. ун-т. – Орёл, 2017. – 257 с.
50. Мамедов, Ш. М. Методика расчета панелей из перекрестно-клееной древесины / Ш. М. Мамедов, Е. Г. Шабилова, Д. В. Нижегородцев, Т. Н. Казакевич // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 5(82). – С. 66–71. – DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71.
51. Марфин, К. В. Взаимосвязь максимальных прогибов и собственных частот поперечных колебаний составных пластин на податливых связях : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.23.17 / К. В. Марфин ; Юго-Зап. гос. ун-т. – Орёл, 2015. – 145 с.
52. Мелехов, В. И. Ресурсосберегающие технологические процессы обработки древесины : автореф. дис. д-ра техн. наук / В. И. Мелехов. – Архангельск, 1998. – 53 с.
53. Мехеда, В. А. Тензометрический метод измерения деформаций : учеб. пособие / В. А. Мехеда. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
54. Митинский, А. Н. Упругие постоянные древесины, как трансверсально-изотропного материала / А. Н. Митинский // Труды Ленинградской лесотехнической академии им. С. М. Кирова. – Л., 1949. – № 67. – С. 51–68.
55. Надеждин, К. Д. Визуальные методы определения деформаций и напряжений на поверхности испытываемых конструкций / К. Д. Надеждин, Л. М. Шарнин, А. П. Кирпичников // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 12. – С. 143-146.

56. Орлович, Р. Б. Длительная прочность и деформативность конструкций из современных древесных материалов при основных эксплуатационных воздействиях : дис. канд. техн. наук / Р. Б. Орлович. – Брест, 1991. – 375 с.

57. Павлов, А. П. Основные уравнения теории упругости древесины / А. П. Павлов // Сборник трудов ЛИИЖТ. – М. : Гос. трансп. ж.д. изд., 1948. – Вып. 137. – С. 133–139.

58. Павлов, А. П. Плоская задача теории упругости древесины / А. П. Павлов // Сборник трудов ЛИИЖТ. – М. : Гос. трансп. ж.д. изд., 1947. – Вып. 136. – С. 121–133.

59. Перунов, А.С. Способ измерения прогибов монолитных перекрытий при ограниченной видимости конструкций / А.С. Перунов, И.Н. Дорошин // Вестник Евразийской науки. – 2020. – № 6. – URL: <https://esj.today/PDF/34SAVN620.pdf> (дата обращения: 05.10.2025).

60. Перцева, А.Е., Опыт применения большепролетных клееных деревянных конструкций / А.Е. Перцева, Н.С. Хижняк, Н. С. Астафьева // Транспортные сооружения Электронный ресурс. 2018. № 3. DOI: 10.15862/02SAT318.

61. Петрова, З. К. Развитие современного малоэтажного деревянного домостроения в России / З. К. Петрова, С. В. Ильвицкая, В. О. Долгова, Б. С. Истомин, В. П. Этенко, Н. В. Дубынин // Строительные материалы. – 2018. – № 8. – С. 74–78. – DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-74-78.

62. Плешков, П. Ф. Теория расчета деревянных составных стержней / П. Ф. Плешков. – Л. : Стройиздат, 1952. – 193 с.

63. Погорельцев, А.А. Определение прочностных и упругих характеристик древесины перекрестноклееной (ДПК/CLT) и классификация по классам прочности : отчет о НИР / Научно-исследовательский центр "Строительство" ; А. А. Погорельцев, М. А. Филимонов, П. Н. Смирнов. – Москва, 2020. – 175 с.

64. Погорельцев, А.А. Проведение исследований по определению несущей способности стеновых панелей и плит перекрытия из древесины

перекрестноклееной (ДПК/CLT) и разработка методики расчета : отчет о НИР / Научно-исследовательский центр "Строительство" ; А. А. Погорельцев, П. Н. Смирнов, М. А. Филимонов. – Москва, 2020. – 268 с.

65. Рабинович, А. Л. Об упругих постоянных и прочности анизотропных материалов / А. Л. Рабинович // Труды ЦАГИ. – М. : Изд-во Бюро новой техники, 1946. – № 582. – 55 с.

66. Ржаницын, А. Р. Расчет составных пластинок с абсолютно жесткими поперечными связями / А. Р. Ржаницын // Исследования по теории сооружений. – М. : Стройиздат, 1976. – Вып. XXII. – С. 120–133.

67. Ржаницын, А. Р. Составные стержни и пластинки / А. Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1986. – 316 с.

68. Российское домостроение бьет рекорды. – Текст : электронный // Рослесинфорг – URL: <https://roslesinfor.ru/news/all/rossiyskoe-derevyannoe-domostroenie-byet-rekordy/> (дата обращения: 11.04.2024).

69. Савин, С. Н. Сейсмоакустические методы интегральной оценки физико-механических характеристик строительных конструкций зданий и сооружений / С. Н. Савин, В. М. Попов, Ю. В. Пухаренко, В. И. Морозов, В. В. Цыгановкин // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15. – № 6.

70. Савков, Е. И. Исследования физико-механических свойств древесины сосны / Е. И. Савков // Труды ЦАГИ. – М., 1930. – 2 т.

71. Светозарова, Е. И. Определение упругих констант клееной древесины / Е. И. Светозарова, А. В. Хапин // Лесной журнал. – Архангельск, 1982. – № 3. – С. 63–66.

72. Серов, Е. Н. Рациональное использование анизотропии прочности материалов в клееных деревянных конструкциях массового изготовления : дис. д-ра техн. наук / Е. Н. Серов. – Ленинград, 1988. – 521 с.

73. Серов, Е.Н. Клееные деревянные конструкции: состояние и проблемы развития / Е.Н. Серов, Б.В. Лабудин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2013. – № 2.

74. Слюсарев, Г. В. Развитие и применение неразрушающих методов и средств вибрационного контроля качества предварительно напряженных железобетонных конструкций : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.23.01 / Слюсарев Геннадий Васильевич ; ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». – Орел, 2003. – 48 с.
75. Соболев, Ю. С. Древесина как конструкционный материал / Ю. С. Соболев. – М. : Лесная промышленность, 1979. – 248 с.
76. Соломахо, В. Л. Методы и средства строительного мониторинга / В. Л. Соломахо, И. Ф. Мирошниченко, П. А. Петрусенко // Наука и техника. – 2007. – № 5. – С. 21–24.
77. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах (Актуализированная редакция СНиП II-7-81). – М. : Минстрой России, 2014. – 120 с.
78. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М. : Минстрой России, 2016. – 80 с.
79. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – М. : Минрегион России, 2011. – 111 с.
80. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – М. : Минстрой России, 2017. – 104 с.
81. Судаков, В. В. Контроль качества железобетонных изделий вибрационным методом / В. В. Судаков, В. Е. Гринберг, В. В. Павлова, В. А. Строганов // Бетон и железобетон. – 1970. – № 12. – С. 10-12.
82. Сюй, Ю. Повышение несущей способности соединений элементов деревянных конструкций на металлических накладках с использованием металлической зубчатой пластины : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.23.01 / Ю. Сюй ; СПбГАСУ. – Санкт-Петербург, 2015. – 198 с.
83. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М. : Наука, 1966. – 636 с.

84. Тимошенко, С. П. Теория упругости : пер. с англ. / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер ; под ред. Г. С. Шапиро. – 2-е изд. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.

85. Тихомиров, Д. В. Расчёт перекрытия из ДПК, опирающегося по четырём сторонам, с применением теории изгиба пластин / Д. В. Тихомиров // Инновации в деревянном строительстве : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2023. – С. 68–80.

86. Трошин, М. Ю. Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний в трехслойной плите из ДПК при переменной величине зазоров в поперечном слое при различных граничных условиях / М. Ю. Трошин, А. В. Турков // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 4(114). – С. 56-63. – DOI: 10.33979/2073-7416-2024-114-4-56-63.

87. Трошин, М. Ю. Взаимосвязь прогибов и частот собственных колебаний в трехслойных плитах из ДПК с переменной толщиной слоев / М. Ю. Трошин, А. В. Турков, А. С. Трошина // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 6(116). – С. 60-68. – DOI 10.33979/2073-7416-2024-116-6-60-68.

88. Трошин, М. Ю. Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний в пятислойной плите из ДПК при изменении шага ламелей в поперечных слоях / М. Ю. Трошин, А. В. Коробко // Эксперт: теория и практика. – 2024. – № 4(27). – С. 105-109. – DOI: 10.51608/26867818_2024_4_105.

89. Трошин, М. Ю. Влияние типа конечных элементов в расчетной схеме на величину прогибов и нормальных напряжений в clt-панели / М. Ю. Трошин, А. В. Турков // Инновационное развитие современной науки: теория, методология, практика: сборник статей VIII Всероссийской научно-практической конференции – Петрозаводск: МЦНП «НОВАЯ НАУКА», 2023. – С. 22-29.

90. Трошин, М. Ю. Влияние толщины поперечного и продольных слоев на деформации и напряжения в 3-слойной плите ДПК (CLT), смоделированной как составная пластина / М. Ю. Трошин, А. В. Турков, А. В. Заев // Архитектура,

строительство, транспорт. – 2024. – № 2 (108). – С. 30-41. DOI 10.31660/2782-232X-2024-2-30-41.

91. Трошин, М. Ю. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной / М. Ю. Трошин, А. В. Турков // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18. Вып. 3. – С. 391-400. – DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400.

92. Трошин, М. Ю. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной / М. Ю. Трошин, А. В. Турков // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 10. – С. 1587-1598. – DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1587-1598.

93. Трошин, М. Ю. Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, смоделированной как составная пластина / М. Ю. Трошин, А. В. Турков // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3(105). – С. 25-32. – DOI: 10.31660/2782-232X-2023-3-25-32.

94. Трошин, М. Ю. Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, жестко защемленной с двух сторон / М. Ю. Трошин, А. В. Турков, А. В. Заев // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 2(112). – С. 50-58. – DOI: 10.33979/2073-7416-2024-112-2-50-58.

95. Трошин, М. Ю. Влияние шага ламелей в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной плите из древесины перекрестноклееной с жестким защемлением с одной стороны и шарнирным опиранием с другой / М. Ю. Трошин, А. В. Турков, А. В. Заев // Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства». – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2024. – С. 6-12.

96. Трошин, М. Ю. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной

/ М. Ю. Трошин, А. В. Турков // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 3(107). – С. 35-41. – DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41.

97. Трошин, М. Ю. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной / М. Ю. Трошин, А. В. Турков // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий 24 – 25 ноября 2022 г. – Омск: СибАДИ, 2022. – С. 515-519.

98. Трошин, М.Ю. Экспериментальные исследования плит из древесины перекрестно клееной с утолщенными продольными слоями / М. Ю. Трошин, А. В. Турков // Строительная механика и конструкции. – 2025. – № 1(44). – С. 79-87. – DOI: 10.36622/2219-1038.2025.44.1.007.

99. Турков, А. В. Взаимосвязь задач динамики и статики сплошных и составных деревянных конструкций : дис. д-ра техн. наук : 05.23.01 / А. В. Турков. – Орел, 2008. – 341 с.

100. Турков, А. В. Вибрационный способ определения жесткости составной балки переменного сечения / А. В. Турков // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2007. – № 4. – С. 53–55.

101. Турковский, С. Б. Результаты натурных обследований деревянных клееных конструкций / С. Б. Турковский, Ю. А. Варфоломеев // Промышленное строительство. – 1984. – № 6. – С. 19–20.

102. Тутурин, С. В. Механическая прочность древесины : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 01.02.04 / С. В. Тутурин ; ГОУ ВПО "Тверской гос. техн. ун-т". – Тверь, 2005. – 300 с.

103. Фан Чунг Дык. Развитие метода мониторинга технического состояния плоскостных каменных конструкций с использованием изгибных волн Лэмба : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 2.1.1. / Фан Чунг Дык ; ФГБОУ ВО «Санкт-

Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». – Санкт-Петербург, 2025. – 27 с.

104. Филатов, В. В. К определению частоты основного тона колебаний изгибаемых составных пластин / В. В. Филатов // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы : сб. тр. II МНТК. – М. : МГСУ, 2009. – С. 309–311.

105. Филатов, В. В. Развитие теории и разработка численной методики расчета составных стержней и пластин : дис. д-ра техн. наук : 05.23.01 / В. В. Филатов. – Москва, 2015. – 292 с.

106. Филимонов, М. А. Исследования прочностных и упругих характеристик плит из древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) российского производства / М. А. Филимонов, П. Н. Смирнов // Сейсмическое строительство. Безопасность сооружений. – 2022. – № 2. – С. 81–97. – DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97.

107. Хвесько, Г. М. Исследование анизотропии упругих и прочностных свойств модифицированной древесины при сжатии : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.21.05 / Г. М. Хвесько. – Москва, 1978. – 23 с.

108. Хечумов, Р. А. Свободные колебания многослойных пластинок с абсолютно жесткими поперечными связями / Р. А. Хечумов // Сборник трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева и БТИСМ им. И. А. Гришманова. – М. : ВТИСМ, 1978. – Вып. 28. – С. 94–98.

109. Хечумов, Р. А. Свободные колебания прямоугольных двухслойных пластин со смешанными краевыми условиями / Р. А. Хечумов // Сборник трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева и БТИСМ им. И. А. Гришманова. – М. : БТИСМ, 1979. – Т. 8. – С. 51–55.

110. Хечумов, Р. А. Собственные колебания двухслойных пластин со сложными очертаниями в плане / Р. А. Хечумов // Сборник трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева и БТИСМ им. И. А. Гришманова. – М. : БТИСМ, 1979. – Т. 8. – С. 51–55.

111. Хрулев, В. М. Долговечность клееной древесины / В. М. Хрулев. – М. : Лесная пром-сть, 1971. – 160 с.
112. Хухрянский, П. Н. Прочность древесины / П. Н. Хухрянский. – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1955. – 152 с.
113. Чебыкин, А. А. Определение расчетных характеристик сечений древесных клееных плит из перекрестных досок / А. А. Чебыкин, Ю. А. Фрицлер, С. В. Кудрявцев // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2017. – № 2. – С. 83–85.
114. Чернова, Т. П. Совершенствование конструкции и технологии сопряжения CLT-панелей с деревоклееными элементами : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.21.05 / Т. П. Чернова ; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Архангельск, 2018. – 122 с.
115. Черных, А. Г. Определение временной зависимости прочности перекрестноклееной древесины при сжатии перпендикулярно плоскости плиты под действием постоянной нагрузки / А. Г. Черных, Г. Г. Розе, А. А. Храцева // Вестник Евразийской науки. – 2024. – Т 16. – № 6.
116. Черных, А. Г. Формирование защитно-декоративных покрытий древесины методом налива : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.21.05 / А. Г. Черных. – Санкт-Петербург, 1998. – 445 с.
117. Черных, А. Г. Математическая модель исследования прочности цилиндрических панелей из клееной древесины / А. Г. Черных, И. В. Каменев // Инновации в деревянном строительстве: Материалы 11-й Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. – С. 121-129.
118. Чубинский, А. Н. Формирование клеевых соединений древесины / А. Н. Чубинский. – СПб., 1992. – 164 с.

119. Шамаев, В. А. Получение модифицированной древесины химико-механическим способом и исследование ее свойств / В. А. Шамаев // Лесотехнический журнал. – 2015. – № 4. – С. 177–187.
120. Шапиро, Д. М. Метод конечных элементов в строительном проектировании : монография / Д. М. Шапиро. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : АСВ, 2020. – 172 с.
121. Щелокова, Т. Н. Современные тенденции улучшения свойств древесины и деревянных строительных конструкций / Т. Н. Щелокова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 6. – С. 39–45. – DOI:10.12737/article_5b115a65781d87.13857188
122. Юров, А. П. Нетрадиционные вибрационные методы диагностики и контроля качества протяженных железобетонных конструкций : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / А. П. Юров ; ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». – Орел, 2005. – 24 с.
123. ANSI/APA PRG 320-2019. Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber. – American National Standard. – APA – The Engineered Wood Association, 2019.
124. Azzi, Z. Review of nondestructive testing (NDT) techniques for timber structures / Z. Azzi, H. Al Sayegh, O. Metwally, M. Eissa // Infrastructures. – 2025. – Vol. 10, No. 2. – Art. 28. – DOI: 10.3390/infrastructures10020028.
125. Bartlett, A. Analysis of cross-laminated timber charring rates upon exposure to non-standard heating conditions / A. Bartlett, R. Hadden, L. Bisby, A. Law // Fire and Materials 2015: Proceedings of the Conference. – San Francisco, CA, USA, 2015.
126. Bohn, D. Combined acoustic emission and ultrasonic measurements in cross laminated timber-steel composite beam / D. Bohn, G. Manthei, N. Böhm, B. Kühn, A. Vogelsberg // e-Journal of Nondestructive Testing. – 2024. – Vol. 29, No. 10. – DOI: 10.58286/30270.

127. Bondsman, B. Experimental Modal Analysis and variability assessment in Cross-laminated Timber / B. Bondsman, A. Peplow // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2025. – Vol. 228. – DOI: 10.1016/j.ymsp.2025.112466.
128. Bondsman, B. Uncertainty quantification of modal characteristics in cross-laminated timber arising from uncertainties in mechanical properties / B. Bondsman // *Composite Structures*. – 2025. – Vol. 371. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119438.
129. Brandner, R. Cross laminated timber (CLT): overview and development / R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, A. Thiel // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2016. – Vol. 74. – № 3. – P. 331–351.
130. Brandner, R. Out-of-plane bending properties of cross laminated timber (CLT) / R. Brandner, A. Ringhofer, R. Sieder // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 438. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136991>.
131. Brandner, R. Out-of-Plane Tensile Properties of Cross Laminated Timber (CLT) / R. Brandner, L. Jantscher // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12. – № 135. – [10.3390/buildings12020135](https://doi.org/10.3390/buildings12020135).
132. Buck, D. Multivariate Image Analysis Applied to Cross-Laminated Timber: Combined Hyperspectral Near-Infrared and X-ray Computed Tomography / D. Buck, O. Hagman // *Journal of Spectroscopy*. – 2023. – Art. 3954368. – P. 1–8. – DOI: 10.1155/2023/3954368.
133. Buka-Vaivade, K. Suspension structure with cross-laminated timber deck panels / K. Buka-Vaivade, D. Serdjuks, V. Goremikins, L. Pakrastins, N. I. Vatin // *Magazine of Civil Engineering*. – 2018. – Vol. 83, No. 7. – P. 126–135. – DOI: 10.18720/MCE.83.12
134. Canadian CLT Handbook. Volume I / E. Karacabeyli, S. Gagnon. – Vancouver : FPInnovations, 2019.
135. Chernykh, A. Bending test of stress-laminated timber decks using laser scanning / A. Chernykh, P. Koval, S. Mamedov, E. Danilov, D. Nizhegorodtsev // *Proceedings of the International Conference on Modern Problems of Construction and*

Production Engineering (MPCPE 2021). – Cham : Springer, 2022. – Vol. 182. – P. 75–83.

136. Christovasilis, I. P. Evaluation of the Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories / I. P. Christovasilis, M. Brunetti, M. Follesa, M. Nocetti, D. Vassallo // *Engineering Structures*. – 2016. – Vol. 122. – P. 202–213. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082. c

137. Concu, G. NON-DESTRUCTIVE ASSESSMENT OF GLUING IN CROSS-LAMINATED TIMBER PANELS / G. Concu, M. Fragiaco, N. Trulli, M. Valdés // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. – 2017. – Vol. 226. – P. 559–569. – DOI: 10.2495/SDP170491.

138. Damme, B. V. Modeling the bending vibration of cross-laminated timber beams / B. V. Damme, S. Schoenwald, A. Zemp // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2017. – Vol. 75, No. 6. – P. 985–994. – DOI: 10.1007/s00107-016-1152-9

139. Detailing of CLT with Respect to Fire Resistance / W. Norman, K. D. Julia, R. Stein, S. Winter // *Cross Laminated Timber – A competitive wood product for visionary and fire safe buildings*. – Stockholm, Sweden : USAB, 2016. – P. 125–135.

140. EN 13017-1:2001. Solid wood panels. Classification by surface appearance. Softwood. – European Committee for Standardization (CEN), 2001.

141. EN 16351:2021. Timber structures – Cross laminated timber – Requirements. – European Committee for Standardization (CEN), 2021.

142. EN 1995-1-1:2009. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. – European Committee for Standardization (CEN), 2009.

143. EN 384:2016. Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density. – European Committee for Standardization (CEN), 2016.

144. Eurocode 5: Design of timber structures. Part 2: Bridges. ENV 1995-2:1997. – Brussels : CEN, 2004. – 29 p.

145. Ewins, D.J. Modal Testing: Theory, Practice and Application / D.J. Ewins. – 2nd ed. – Baldock : Research Studies Press, 2000.
146. Fellmoser, P. Influence of rolling shear modulus on strength and stiffness of structural bonded timber elements / P. Fellmoser, H. J. Blaß // Proceeding of CIB-W18 Meeting, Edinburgh, United Kingdom, 2004. – P. 37-6-5.
147. Fink, G. Application of European design principles to cross laminated timber / G. Fink, J. Kohler, A. Ringhofer, R. Brandner // Engineering Structures. – 2018. – Vol. 171. – P. 934–943. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.081>.
148. Frangi, A. Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire / A. Frangi, M. Fontana, E. Hugi, R. Jöbstl // Fire Safety Journal. – 2009. – Vol. 44. – № 8. – P. 1078–1087.
149. Gagnon, S. CLT Handbook: Cross-laminated timber / S. Gagnon, C. Pirvu. – Canadian Edition. – 2011. – ISBN: 978-0-86488-547-0.
150. Gotcadze, A. G. Calculation algorithm of the building of CLT for the Russian Federation / A. G. Gotcadze, E. E. Vasin, E. G. Shabikova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : proceedings of the International Conference on Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies (CAEST 2019), Samara, November 19, 2019. – 2020. – Vol. 775. – No. 1. – P. 012046. – DOI 10.1088/1757-899X/775/1/012046
151. Gülzow, A. Zerstörungsfreie Bestimmung elastischer Eigenschaften quadratischer 3-schichtiger Brettsperrholzplatten mit symmetrischem Aufbau / A. Gülzow, D. Gsell, R. Steiger // Holz als Roh- und Werkstoff. – 2008. – Vol. 66. – P. 19–37. – DOI: 10.1007/s00107-007-0211-7
152. Hasenstab, A. Testing of wooden construction elements with ultrasonic echo technique and x-ray / A. Hasenstab, M. Krause, K. Osterloh // 9th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT). – Berlin, Germany, 25–29 September 2006.
153. He, M. Bending, shear, and compressive properties of three- and five-layer cross-laminated timber fabricated with black spruce / M. He, X. Sun, Z. Li et al. // Journal of Wood Science. – 2020. – Vol. 66, No. 38. – DOI: 10.1186/s10086-020-01886-z

154. Hematabadi, H. Bending and shear properties of cross-laminated timber panels made of poplar (*Populus alba*) / H. Hematabadi, M. Madhoushi, A. Khazaeyan, G. Ebrahimi, D. Hindman, J. Loferski // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 265. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120326

155. Hisham, S. 100 CLT UK Projects / S. Hisham. – Ann Arbor, MI : Inter-university Consortium for Political and Social Research [distributor], 2023-10-19. – DOI: 10.3886/E194581V1.

156. Huang, Z. Modeling of Cross-Laminated Timber (CLT) panels loaded with combined out-of-plane bending and compression / Z. Huang, D. Huang, Y.-H. Chui, Y. Shen, H. Daneshvar, B. Sheng, Z. Chen // *Engineering Structures*. – 2022. – Vol. 250. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115262.

157. Huang, Z. The appropriacy of the analytical models for calculating the shear capacity of cross-laminated timber (CLT) under out-of-plane bending / Z. Huang, L. Jiang, C. Ni et al. // *Journal of Wood Science*. – 2023. – Vol. 69, No. 14. – DOI: 10.1186/s10086-023-02089-y

158. Ilharco, T. Assessment of timber floors by means of non-destructive testing methods / T. Ilharco, T. Lechner, T. Nowak // *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol. 101, Part 2. – P. 1206–1214. – ISSN 0950-0618. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.133.

159. ISO 16696-1:2019. Timber structures – Cross laminated timber – Part 1: Component performance, production requirements and certification scheme. – International Organization for Standardization (ISO), 2019.

160. Jeleč, M. Cross-laminated timber (CLT) – a state of the art report / M. Jeleč, D. Varevac, V. Rajčić // *GRAĐEVINAR*. – 2018. – Vol. 70. – № 2. – P. 75–95. – DOI: 10.14256/JCE.2071.2017.

161. Karacabeyli, E. CLT Handbook: Cross-Laminated Timber / E. Karacabeyli, B. Douglas (Eds.). – U.S. ed. – Pointe-Claire : FPInnovations, 2013.

162. Kawrza, M. Experimental and numerical modal analysis of a cross laminated timber floor system in different construction states / M. Kawrza, T. Furtmüller, C. Adam

// Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 344. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128032.

163. Kawrza, M. Experimental modal analysis of a cross-laminated timber slab / M. Kawrza, T. Furtmüller, C. Adam, R. Maderebner // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 62, Part 5. – P. 2611–2616. – ISSN 2214-7853. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.559.

164. Kawrza, M. Parameter identification for a point-supported cross laminated timber slab based on experimental and numerical modal analysis / M. Kawrza, T. Furtmüller, C. Adam et al. // European Journal of Wood and Wood Products. – 2021. – Vol. 79. – P. 317–333. – DOI: 10.1007/s00107-020-01641-7.

165. Ma, Y. Flexural and shear performance of CLT panels made from salvaged beetle-killed white spruce / Y. Ma, X. Wang, M. Begel, Q. Dai, Y. L. Dickinson, X. Xie, R. Ross // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 302. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124381

166. Ma, Y. Mechanical property evaluation of hybrid mixed-species CLT panels with sugar maple and white spruce / Y. Ma, R. Si, M. Musah, Q. Dai, X. Xie, X. Wang, R. J. Ross // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 33, No. 7.– DOI: /10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003760

167. Manthei, G. Acoustic emission monitoring during elastic bending of cross laminated timber-steel composite beams / G. Manthei, D. Bohn, N. Böhm, B. Kühn, A. Vogelsberg // Proceedings of the 11th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2024), June 10–13, 2024, Potsdam, Germany. – 2024. – Vol. 29(7). – DOI: 10.58286/29578.

168. Marković, N. Design approach for cost-effective hybrid CLT floors / N. Marković, M. Marjanović, R. Cvetkovic // GRAĐEVINAR. – 2022. – Vol. 74. – P. 301–311. – DOI:10.14256/JCE.3271.2021

169. Martínez-Martínez, J. E. Finite element analysis of composite laminated timber (CLT) / J. E. Martínez-Martínez, M. Alonso-Martínez, F. P. Á. Rabanal, J. J. del

Cueto Díaz // Proceedings. – 2018. – Vol. 2. – No. 23. – Art. 1454. – DOI: 10.3390/proceedings2231454

170. Masoumi, A. Comparison of microscopy and quality control testing to examine the durability of adhesive bondline in cross-laminated timber / A. Masoumi, E. Satir, S. Adhikari, D. Hindman, B. Bond, A. Zink-Sharp // Journal of Building Engineering. – 2024. – Vol. 86. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.108958.

171. McCormick, N. Digital Image Correlation / N. McCormick, J. Lord // Materials Today. – 2010. – Vol. 13, Iss. 12. – P. 52–54. – DOI: 10.1016/S1369-7021(10)70235-2.

172. Nakagawa, M. Bending performance of sugi cross-laminated timber (CLT) composed of different thickness laminae / M. Nakagawa, Y. Hiramatsu, K. Shindo et al. // Journal of Wood Science. – 2025. – Vol. 71, No. 22. – DOI: 10.1186/s10086-025-02194-0

173. Nasir, V. Acoustic emission monitoring of wood materials and timber structures: A critical review / V. Nasir, S. Ayanleye, S. Kazemirad, F. Sassani, S. Adamopoulos // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 350. – Art. 128877. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128877.

174. Navaratnam, S. The use of digital image correlation for identifying failure characteristics of cross-laminated timber under transverse loading / S. Navaratnam, T. Ngo, P. Christopher, S. Linforth // Measurement. – 2020. – Vol. 154. – DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107502.

175. Nowak, T.P. In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method – Evaluation of usefulness / T.P. Nowak, J. Jasieńko, K. Hamrol-Bielecka // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 102, Part 1. – P. 403–415. – ISSN 0950-0618. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.004.

176. Olsson, A. Dynamic and quasi-static evaluation of stiffness properties of CLT: longitudinal MoE and effective rolling shear modulus / A. Olsson, W. Schirén, M. Hu // European Journal of Wood and Wood Products. – 2025. – Vol. 83. – DOI: 10.1007/s00107-024-02185-w.

177. Olsson, A. Relationships between stiffness of material, lamellas and CLT elements with respect to out of plane bending and rolling shear / A. Olsson, W. Schirén, K. Segerholm et al. // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2023. – Vol. 81. – P. 871–886. – DOI: 10.1007/s00107-023-01956-1.

178. Opazo-Vega, A. Non-destructive assessment of the elastic properties of low-grade CLT panels / A. Opazo-Vega, F. Benedetti, M. Nuñez-Decap, N. Maureira-Carsalade, C. Oyarzo-Vera // *Forests*. – 2021. – Vol. 12, No. 1734. – DOI: 10.3390/f12121734

179. Pahnabi, N. Imaging of Structural Timber Based on In Situ Radar and Ultrasonic Wave Measurements: A Review of the State-of-the-Art / N. Pahnabi, T. Schumacher, A. Sinha // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24. – DOI: 10.3390/s24092901.

180. Pang, S. J. Effects of combinations of lamina grade and thickness, and span-to-depth ratios on bending properties of cross-laminated timber (CLT) floor / S.-J. Pang, G. Y. Jeong // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 222. – P. 142 – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.012

181. Pang, S. J. Effects of knot area ratio on the bending properties of cross-laminated timber made from Korean pine / S. J. Pang, K. B. Shim, K. H. Kim // *Wood Science and Technology*. – 2021. – Vol. 55, No. 3. – P. 489–503. – ISSN 0043-7719. – DOI: 10.1007/s00226-020-01255-5

182. Pang, S.J. Prediction of withdrawal resistance for a screw in hybrid cross-laminated timber / S.J. Pang, K.S. Ahn, S.G. Kang et al. // *Journal of Wood Science*. – 2020. – Vol. 66. – DOI: 10.1186/s10086-020-01926-8.

183. Prezelj, J. Evaluation of modulus of elasticity based on vibration modes identification using acoustic methods / J. Prezelj, I. Emri, A. Nikonov // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 62, Part 5. – P. 2566–2570. – ISSN 2214-7853. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.464

184. Prezelj, J. Using sound in the very near field of vibrating plates for determination of their mechanical properties / J. Prezelj, A. Nikonov, I. Emri // *Applied*

Acoustics. – 2022. – Vol. 186. – Art. 108486. – ISSN 0003-682X. – DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108486.

185. Rahman, M. T. Evaluating Timoshenko method for analyzing CLT under out-of-plane loading / M. T. Rahman, M. Ashraf, K. Ghabraie, M. Subhani // Buildings. – 2020. – Vol. 10. – No. 184. – DOI: 10.3390/buildings10100184

186. Ringhofer, A. Cross laminated timber (CLT): Design approaches for dowel-type fasteners and connections / A. Ringhofer, R. Brandner, H.J. Blaß // Engineering Structures. – 2018. – Vol. 171. – P. 849–861. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.032.

187. Rose, C. M. Cross-laminated secondary timber: Experimental testing and modelling the effect of defects and reduced feedstock properties / C. M. Rose, D. Bergsagel, T. Dufresne, E. Unubreme, T. Lyu, P. Duffour, J. A. Stegemann // Sustainability. – 2018. – Vol. 10, No. 11. – DOI: 10.3390/su10114118

188. Santoni, A. Determination of the elastic and stiffness characteristics of cross-laminated timber plates from flexural wave velocity measurements / A. Santoni, S. Schoenwald, B. Van Damme, P. Fausti // Journal of Sound and Vibration. – 2017. – Vol. 400. – P. 387–401– DOI: 10.1016/j.jsv.2017.04.018

189. Schmid, J. Structural Fire Design – Statement on the Design of Cross-laminated Timber (CLT) / J. Schmid, N. Werther, M. Klippel, A. Frangi // Civil Engineering Research Journal. – 2019. – Vol. 7. – № 5. – P. 555721. – DOI: 10.19080/CERJ.2019.07.555721.

190. Schreier, H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements : Basic Concepts, Theory and Applications / H. Schreier, J.-J. Orteu, M.A. Sutton. – New York : Springer, 2009. – XX, 322 p. – DOI: 10.1007/978-0-387-78747-3.

191. Sebera, V. FE analysis of CLT panel subjected to torsion and verified by DIC / V. Sebera, L. Muszyński, J. Tippner et al. // Materials and Structures. – 2015. – Vol. 48, No. 3. – P. 451–459. – DOI: 10.1617/s11527-013-0195-1.

192. Sharifnia, H. Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of southern yellow pine cross laminated timbers / H. Sharifnia, D. P. Hindman //

Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 156. – P. 314–320. – ISSN 0950-0618. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.122

193. Shen, Y. Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber / Y. Shen, J. Schneider, S. F. Stiemer, X. Ren // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 275. – P. 1–7. – DOI: 10.1051/mateconf/201927501011.

194. Sikora, K. Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear / K. Sikora, D. McPolin, A. Harte ^a // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 116. – P. 141–150. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145.

195. Srivaro, S. Properties of mixed species/density cross laminated timber made of rubberwood and coconut wood / S. Srivaro, H. Lim, M. Li, Z. Pasztory // Structures. – 2022. – Vol. 40. – P. 237–246. – ISSN 2352-0124. – DOI: 10.1016/j.istruc.2022.04.016

196. Steiger, R. Non destructive evaluation of elastic material properties of cross-laminated timber (CLT) / R. Steiger, A. Gülzow, D. Gsell // E53 - Quality Control for Wood and Wood Products. End User's Needs for Wood Material and Products : COST E53 Conference Proceedings / ed. W.F. Gard, J.W.G. van de Kuilen. – Delft : Delft University of Technology, 2008. – P. 171–182.

197. Stürzenbecher, R. Structural design of cross laminated timber (CLT) by advanced plate theories / R. Stürzenbecher, K. Hofstetter, J. Eberhardsteiner // Composites Science and Technology. – 2010. – Vol. 70, Issue 9. – P. 1368–1379. – ISSN 0266-3538. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.04.016.

198. SWEDISH STANDARD – SS-EN 16351:2021. Timber structures – Cross laminated timber – Requirements. – Swedish Standards Institute (SIS), 2015.

199. Tahmasebi, M. Cross laminated timber with air gaps in cross-layers: Numerical analysis and experimental evaluation / M. Tahmasebi, H. Kurzawinska, R. Jockwer, Y. Goto // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 481. – Art. 141577. – ISSN 0950-0618. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141577.

200. Tannert, T. RILEM TC 215 In-situ Assessment of Structural Timber: Report on activities and application of assessment methods / T. Tannert, B. Kasal, R.W. Anthony. – January 2010.
201. Teibinger, M. Construction with cross-laminated timber in multi-storey buildings: Focus on building physics. Guidelines / M. Teibinger, I. Matzinger. // – Vienna : Holzforschung Austria, 2013. – 146 p.
202. The CLT Handbook. – Swedish Wood, 2019. – 188 p.
203. The Paris Agreement. – Текст : электронный // United Nations – URL: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (дата обращения: 11.04.2024).
204. van de Lindt, J. W. Seismic Performance Factors for Cross-Laminated Timber Shear Wall Systems in the United States / J. W. van de Lindt, M. O. Amini, D. Rammer, P. Line, S. Pei, M. Popovski // Journal of Structural Engineering. – 2020. – Vol. 146. – № 9. – P. 04020172.
205. Vida, C. Size effect on bending strength of glued laminated timber predicted by a numerical simulation concept including discrete cracking / C. Vida, M. Lukacevic, G. Hochreiner, J. Füssl // Materials & Design. – 2023. – Vol. 225. – DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111550.
206. Wang, T. Rolling shear failure damage evolution process of CLT based on AE technology and DIC method / T. Wang, Y. Yang, Y. Li et al. // European Journal of Wood and Wood Products. – 2022. – Vol. 80. – P. 719–730. – DOI: 10.1007/s00107-022-01796-5.
207. Xin, Z. Determining elastic constants of full-size cross laminated timber panel supported on four nodes using a vibration method / Z. Xin, H. Zhang, C. Guan [etc.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 323. – Art. 126513. – ISSN 0950-0618. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126513
208. Yadav, R. Engineered Wood Products as a Sustainable Construction Material: A Review / R. Yadav, J. Kumar // Engineered Wood Products for Construction. – 2021. – DOI: 10.5772/intechopen.99597.

209. Ylinen, A. Über die mechanische Schaftformtheorie der Bäume / A. Ylinen // Holz Als Roh- Und Werkstoff. – 1953. – Vol. 11. – № 6. – P. 209–210.
210. Zhang, L. Nondestructive assessment of cross-laminated timber using non-contact transverse vibration and ultrasonic testing / L. Zhang, A. Tiemann, T. Zhang et al. // European Journal of Wood and Wood Products. – 2021. – Vol. 79. – P. 335–347. – DOI: 10.1007/s00107-020-01644-4.
211. Zhou, J. Elastic properties of full-size mass timber panels: Characterization using modal testing and comparison with model predictions / J. Zhou, Y. H. Chui, M. Gong, L. Hu // Composites Part B: Engineering. – 2017. – Vol. 112. – P. 203–212. – ISSN 1359-8368. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.12.027.
212. Zhou, Q. Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce / Q. Zhou, M. Gong, Y. H. Chui, M. Mohammad // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 64. – P. 379–386. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.039.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Акт внедрения



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Орловский государственный университет имени
И. С. Тургенева»
 г. Орёл, 302026, Комсомольская улица, д. 95

УТВЕРЖДАЮ:

Директор архитектурно-
 строительного института,

к.т.н.

Финалеева Елена Анатольевна



АКТ

о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы
 на соискание ученой степени кандидата наук по специальности

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Трошина Михаила Юрьевича

Материалы диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Трошина Михаила Юрьевича на тему **«Развитие вибрационного метода оценки несущей способности и деформативности плит перекрытия из древесины перекрестноклееной»** используются в учебном процессе, при изучении дисциплин «Конструкции из дерева и пластмсс» и «Обследование зданий и сооружений» для обучающихся по программам бакалавриата по направлению подготовки 08.03.01. «Строительство» и специалитета по специальности 08.05.01. «Строительство уникальных зданий и сооружений»

И. о. зав. кафедрой

строительных конструкций и материалов

к.т.н.

Д. В. Матюшин