

*На правах рукописи*



**ТРОШИН Михаил Юрьевич**

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

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции,  
здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева».

Научный руководитель:

**Турков Андрей Викторович**

доктор технических наук, профессор

**Коробко Андрей Викторович**

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Рощина Светлана Ивановна,**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»;

**Погорельцев Александр Алексеевич,**

кандидат технических наук, главный научный сотрудник лаборатории несущих деревянных конструкций ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко (АО «НИЦ «Строительство»).

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».**

Защита состоится «13» мая 2026 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (ауд. № 220).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: [rector@spbgasu.ru](mailto:rector@spbgasu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте: <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/troshin-mihail-yurevich>.

Автореферат разослан «26» марта 2026 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Попов Владимир Мирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В условиях глобального перехода к устойчивому и низкоуглеродному строительству древесина вновь приобретает статус одного из ключевых конструкционных 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 применение 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 нашу страну 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, 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.

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 ана-

лиза, 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, дана ее общая характеристика, сформулированы основные цели и задачи исследования, приведены достоверность, научная новизна, гипотеза, методология, теоретическая и практическая значимость результатов работы, содержится информация по апробации работы и количеству научных публикаций.

**В первой главе** выполнен анализ современного состояния вопроса в области исследования древесины перекрестноклееной (ДПК). Выявлена тенденция к изучению и созданию эффективных конфигураций сечения плит, направленных на уменьшение материалоемкости конструкции с сохранением достаточной несущей способности и жесткости. Выявлено, что структурная изменчивость всей плиты и вариативность свойств самой древесины ведут к сложности определения несущей способности и деформативности конструкции без детального знания упругих характеристик каждого слоя. В этих условиях обоснована необходимость универсального неразрушающего динамического метода, не зависящего от внутреннего строения конструкции. Установлено, что существующие подходы имеют ряд недостатков и либо дают только локальную оценку напряженно-деформированного состояния конструкции, либо не обеспечивают прямой количественной связи между динамическими и статическими параметрами конструкции, давая лишь косвенную оценку. Решением данной проблемы является метод, основанный на закономерности теории изотропных пластин, согласно которой 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  $\omega$  с точностью до размерного множителя  $q/m$  является постоянной величиной и связана через коэффициент пропорциональности  $K$ . Однако данный метод нуждается в развитии для ортотропных многослойных плит перекрытия из ДПК. Для этого необходимо теоретически, численно и экспериментально установить закономерность применительно к плитам с различными конфигурациями сечения, провести анализ напряженно-деформированного состояния с целью выявления степени его изменчивости при варьировании геометрии слоёв, и доказать инвариантность коэффициента  $K$  при существенных различиях в распределении напряжений и деформаций в разных конфигурациях плит.

**Во второй главе** представлено аналитическое описание функциональной взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний пластин.

Получение описанной закономерности для объекта исследования в виде ортотропной пластины основано на теоретических выводах профессора Коробко В.И., в которых для изотропных пластин получена следующая формула:

$$W_0 \omega^2 = K \frac{q}{m}, \quad (1)$$

где  $W_0$  – максимальный прогиб конструкции,  $\omega$  – частота основного тона собственных колебаний,  $q$  – равномерно распределенная нагрузка,  $m$  – погонная масса пластины,

$K$  – коэффициент пропорциональности, являющийся постоянным для заданного вида условий опирания.

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

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

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

Уравнение свободных колебаний ортотропной пластины записывается в виде:

$$D_x \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} + m \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

где  $m$  – масса пластины.

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

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

$$\mathcal{E}_{дин} = \frac{1}{2} \iint_A \left[ D_x \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)^2 + D_y \left( \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)^2 + 2D_1 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + 4D_{xy} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dA - \frac{\omega^2}{2} \iint_A m W^2 dA, \quad (5)$$

где  $\omega$  – частота собственных колебаний пластины.

Левая часть (4) и (5) представляет собой уравнение потенциальной энергии изгиба, которое можно записать в виде:

$$\frac{1}{2} \iint_A \left[ D_x \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)^2 + D_y \left( \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)^2 + 2D_1 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + 4D_{xy} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dA = \frac{1}{2} \iint_A \Psi(W) dA. \quad (6)$$

Тогда принимая, что статический и динамический модули упругости рассматриваемой конструкции приблизительно равны ( $E_{стат} \approx E_{дин}$ ), и, подставив (6) в (5) и (4), можно записать систему вида:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{cman} = \frac{1}{2} \iint_A \psi(W) dA - \iint_A q(x, y) dA \\ \mathcal{E}_{дин} = \frac{1}{2} \iint_A \psi(W) dA - \frac{\omega^2}{2} \iint_A mW^2 dA \end{cases} \quad (7)$$

Применяя метод Релея-Ритца, запишем функцию прогиба в виде:

$$W(x, y) = W_0 f(x, y), \quad (8)$$

где  $W_0$  – максимальный прогиб конструкции.

Тогда система (7) принимает вид:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{cman} = \frac{W_0^2}{2} \iint_A \psi(f) dA - W_0 \iint_A q(x, y) f dA \\ \mathcal{E}_{дин} = \frac{W_0^2}{2} \iint_A \psi(f) dA - \frac{W_0^2 \omega^2}{2} \iint_A m f^2 dA \end{cases} \quad (9)$$

Применим вариационный метод Ритца и найдем минимум функционалов:

$$\frac{\partial \mathcal{E}_{cman}}{\partial W_0} = W_0 \iint_A \psi(f) dA - \iint_A q(x, y) f dA = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}_{дин}}{\partial W_0} = W_0 \iint_A \psi(f) dA - W_0 \omega^2 \iint_A m f^2 dA = 0. \quad (11)$$

Из (10) и (11) найдем значения прогиба и частоты собственных колебаний:

$$W_0 = \frac{\iint_A q(x, y) f dA}{\iint_A \psi(f) dA}, \quad (12)$$

$$\omega^2 = \frac{\iint_A \psi(f) dA}{\iint_A m f^2 dA}. \quad (13)$$

Перемножив (12) и (13), получим:

$$W_0 \omega^2 = \frac{\iint_A q(x, y) f dA}{\iint_A \psi(f) dA} * \frac{\iint_A \psi(f) dA}{\iint_A m f^2 dA}, \quad (14)$$

или

$$W_0 \omega^2 = \frac{\iint_A q(x, y) f dA}{\iint_A m f^2 dA}. \quad (15)$$

Учитывая, что прогиб задан равномерно распределенной нагрузкой, получаем:

$$W_0 \omega^2 = \frac{q}{m} \frac{\iint_A f dA}{\iint_A f^2 dA} = K \frac{q}{m}. \quad (16)$$

На основании анализа уравнения (16) установлено подобие полученного выражения с (1), 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 условий коэффициент пропорциональности  $K$ .

Были заданы функции прогиба  $f$ , удовлетворяющие граничным условиям, и на их основе определены значения коэффициента  $K$  для различных схем опирания плиты перекрытия. Установлено, что полученные значения имеют высокую сходимость (отклонение менее 2 %) с теоретическими данными, приведенными в работах проф. Коробко В. И. для изотропных пластин. В целях обеспечения единого расчётного подхода в дальнейших исследованиях используются теоретические значения коэффициента  $K$ .

Для установления зависимостей влияния различных конфигураций сечения на несущую способность и деформативность плит перекрытия из ДПК проведены численные исследования в вычислительном комплексе SCAD++. В исследованиях применены объемные конечно-элементные модели с использованием 8-ми узловых конечных элементов, позволяющие учесть межслойный сдвиг плит перекрытия из древесины перекрестноклееной.

Упругие характеристики слоев заданы с учетом ортотропных свойств древесины и одинаковы для каждой конфигурации в соответствии с ГОСТ Р 56706-2022 «Плиты клееные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Технические условия» и СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80».

Рассмотрены плиты перекрытия с габаритными размерами 5890×1140 мм (Д×Ш), шириной ламелей в слоях 190 мм и толщиной ламелей, принимаемой в зависимости от задач конкретного исследования. Учитывая податливость реальных узлов сопряжения деревянных конструкций, для оценки диапазона возможной работы системы в исследовании приняты граничные случаи жесткости опор. Исследованы 3 вида условий опирания: шарнирное по двум сторонам (Ш+Ш); шарнирное с одной стороны и жесткое защемление – с другой (Ш+Ж); жесткое защемление с обеих сторон (Ж+Ж).

Исследованы следующие конфигурации сечения:

1) трехслойная плита перекрытия из ДПК с продольным расположением волокон в наружных слоях (номера 1 и 3) и поперечным – во внутреннем слое (номер 2), с шагом ламелей в поперечном слое  $c = 190, 240, 290$  и  $340$  мм, толщиной слоев  $t_{11} = t_{12} = 42$  мм и нагрузкой  $q = 2,5$  кН/м<sup>2</sup> (рисунок 1а);

2) трехслойная плита перекрытия из ДПК с продольным расположением волокон в наружных слоях (номера 1 и 3) и поперечным – во внутреннем слое (номер 2) с толщиной поперечного слоя  $t_{12} = 9, 12, 18, 25, 32$  и  $42$  мм и продольных слоев  $t_{11} = 42$  мм с нагрузкой  $q = 0,25$  кН/м<sup>2</sup> (рисунок 1б);

3) трехслойная плита перекрытия из ДПК с продольным расположением волокон в наружных слоях (номера 1 и 3) и поперечным – во внутреннем слое (номер 2) с толщиной продольных слоев  $t_{11} = 9, 12, 18, 25, 32$  и  $42$  мм и поперечного слоя  $t_{12} = 42$  мм с нагрузкой  $q = 0,25$  кН/м<sup>2</sup> (рисунок 1в);

4) пятислойная плита перекрытия из ДПК с продольным расположением волокон в наружных и среднем слоях (номера 1, 3 и 5) и поперечным – во внутренних слоях (номера 2, 4) с шагом ламелей в поперечном слое  $c = 190, 240, 290$  и  $340$  мм, толщиной слоев  $t_{11} = t_{12} = 42$  мм и нагрузкой  $q = 2,5$  кН/м<sup>2</sup> (рисунок 1г);

5) пятислойная плита перекрытия из ДПК с продольным расположением волокон в наружных и среднем слоях (номера 1, 3 и 5) и поперечным – во внутренних слоях (номера 2, 4) с толщиной поперечных слоев  $t_{12} = 9, 12, 18, 25, 32$  и  $42$  мм и продольных слоев  $t_{11} = 42$  мм с нагрузкой  $q = 0,25$  кН/м<sup>2</sup> (рисунок 1д);

6) пятислойная плита перекрытия из ДПК с продольным расположением волокон в наружных и среднем слоях (номера 1, 3 и 5) и поперечным – во внутренних слоях (номера 2, 4) с толщиной продольных слоев  $t_{11} = 9, 12, 18, 25, 32$  и  $42$  мм и поперечных слоев  $t_{12} = 42$  мм с нагрузкой  $q = 0,25$  кН/м<sup>2</sup> (рисунок 1е).

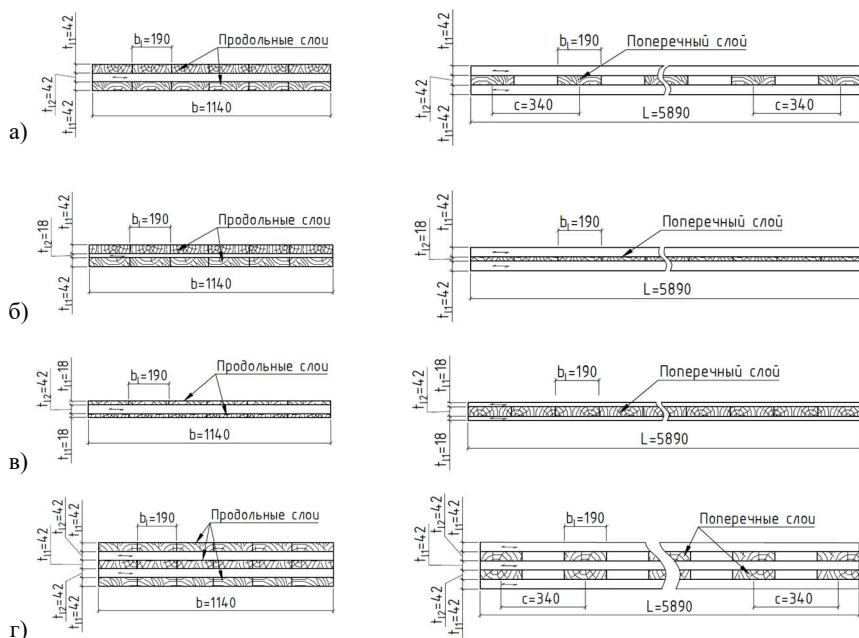


Рисунок 1, начало – Сечения (поперечное и продольное) исследуемых плит перекрытия из ДПК

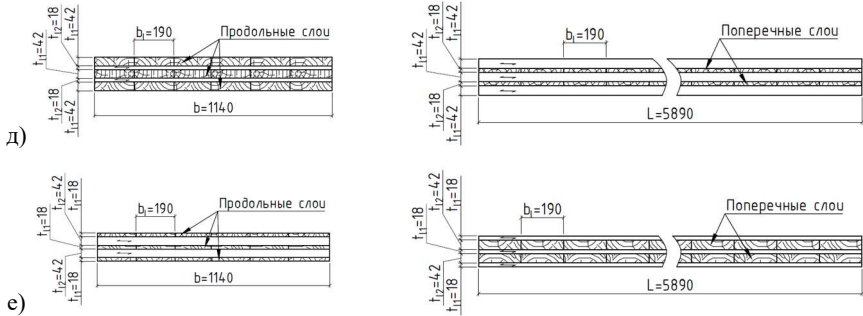


Рисунок 1, окончание

Для конфигураций получены графические зависимости (рисунки 2–7).

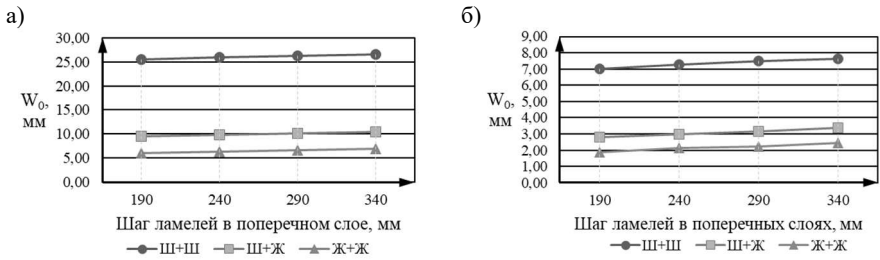


Рисунок 2 – Зависимость максимального прогиба от шага ламелей в поперечных слоях (а – трехслойная конструкция; б – пятислойная конструкция)

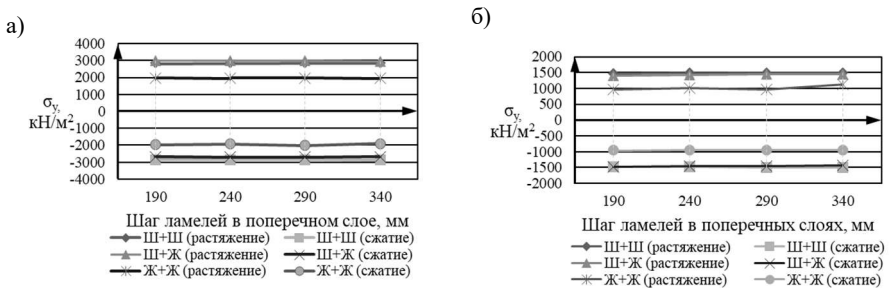


Рисунок 3 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений  $\sigma_y$  от шага ламелей в поперечных слоях (а – трехслойная конструкция; б – пятислойная конструкция)

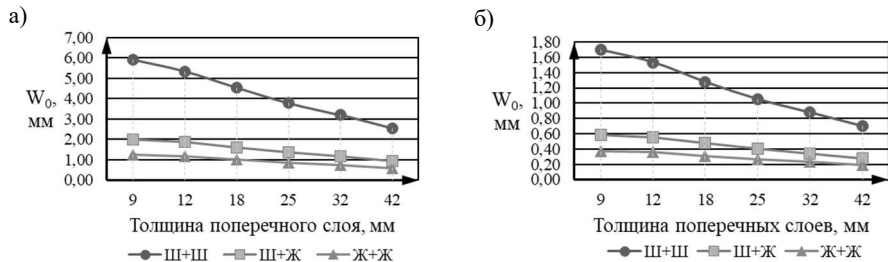


Рисунок 4 – Зависимость максимального прогиба от толщины поперечных слоев (а – трехслойная конструкция; б – пятислойная конструкция)

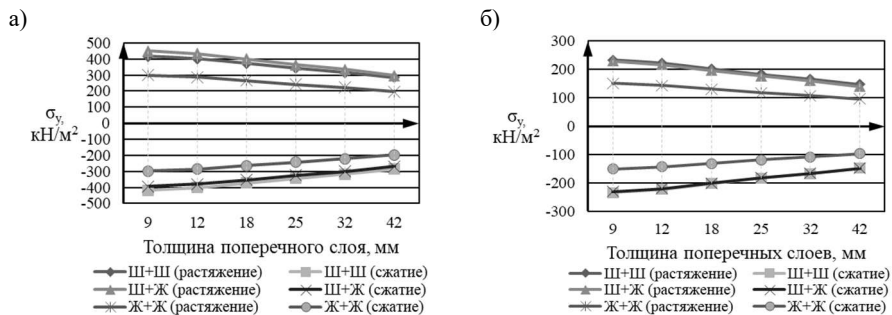


Рисунок 5 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений  $\sigma_y$  от толщины поперечных слоев (а – трехслойная конструкция; б – пятислойная конструкция)

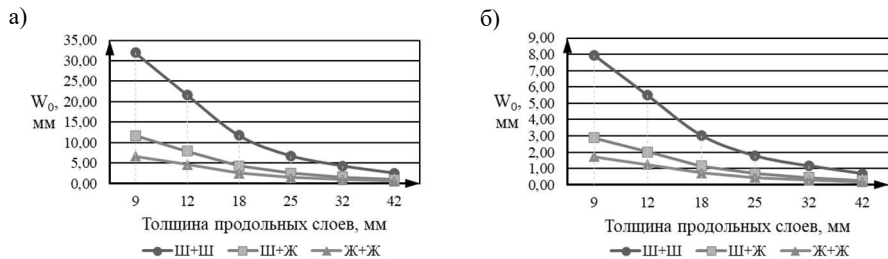


Рисунок 6 – Зависимость максимального прогиба от толщины продольных слоев (а – трехслойная конструкция; б – пятислойная конструкция)

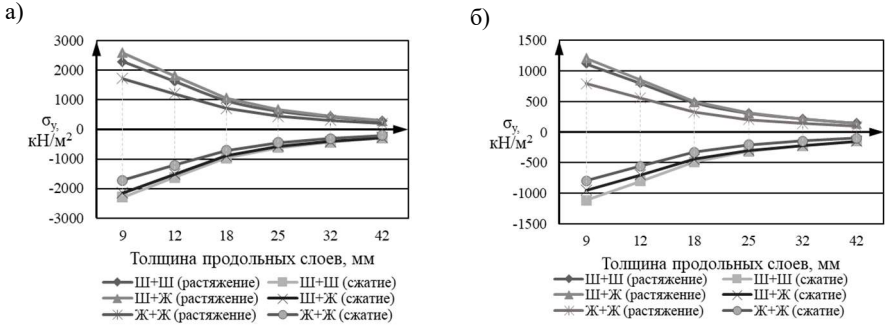


Рисунок 7 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений  $\sigma_y$  от толщины продольных слоев  
(а – трехслойная конструкция; б – пятислойная конструкция)

Анализ полученных зависимостей показывает, что толщина продольных слоев, толщина поперечных слоев и шаг ламелей (воздушные зазоры) в поперечных слоях с разной интенсивностью влияют на напряженно-деформированное состояние конструкции при различных условиях опирания.

**Третья глава** посвящена численным исследованиям взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний в плитах перекрытия из ДПК, выраженной в уравнении (16).

Для исследования взаимосвязи использовались значения коэффициента пропорциональности  $K$  для условий опирания: 1) Ш+Ш:  $K = 1,26835$ ; 2) Ш+Ж:  $K = 1,28549$ ; 3) Ж+Ж:  $K = 1,28420$ .

Проверена сходимость расчетного и аналитического значений коэффициента для рассматриваемых конфигураций сечения (рисунок 8–10).

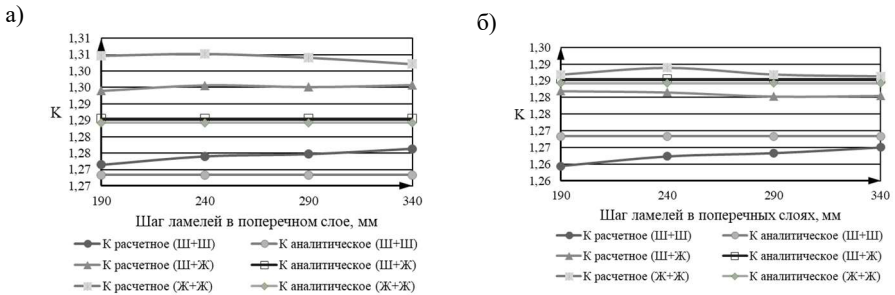


Рисунок 8 – Значение коэффициента  $K$  при изменении шага ламелей в поперечных слоях  
(а – трехслойная конструкция; б – пятислойная конструкция)

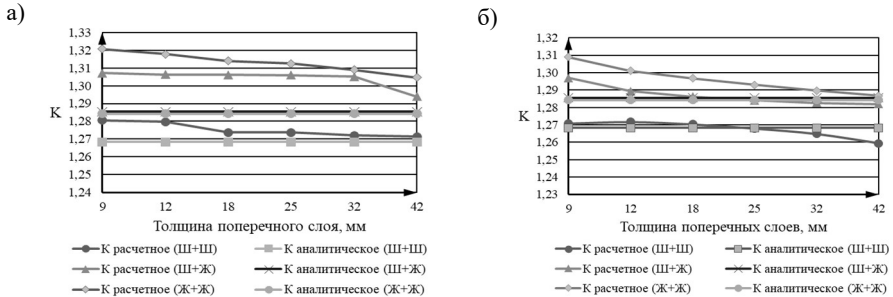


Рисунок 9 – Значение коэффициента  $K$  при изменении толщины поперечных слоев (а – трехслойная конструкция; б – пятислойная конструкция)

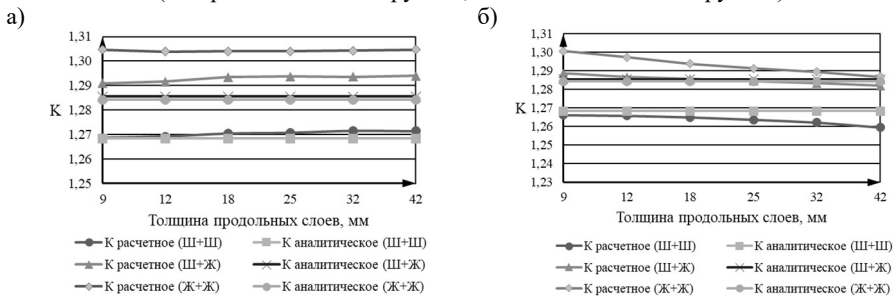


Рисунок 10 – Значение коэффициента  $K$  при изменении толщины продольных слоев (а – трехслойная конструкция; б – пятислойная конструкция)

Результаты исследований показали очень высокую сходимость расчетного и аналитического значений коэффициента  $K$  (отклонение не выше 3 %), что подтверждает применимость рассматриваемой закономерности для плит перекрытия из ДПК.

Это свидетельствует о том, что значение  $K$  остается инвариантным при заданных условиях опирания независимо от геометрической конфигурации сечения.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям плит перекрытия из ДПК. Для достижения подобия экспериментальных образцов и численной модели, были разработаны расчетные схемы с размерами 1 к 1 относительно сделанных плит.

Было изготовлено 5 типов конфигурации. Ламели в продольных слоях имеют длину 2000 мм, ширину 100 мм и толщину 10 мм; в поперечных слоях длину 400 мм, ширину 100 мм и толщину 10 мм. Реализованы следующие конфигурации:

1) Конфигурация № 1 – трехслойная плита из ДПК размерами 2000×400×30 мм;

2) Конфигурация № 2 – трехслойная плита из ДПК с утолщенными продольными слоями размерами 2000×400×50 мм;

3) Конфигурация № 3 – трехслойная плита из ДПК с утолщенным поперечным слоем размерами 2000×400×40 мм (см. пункт 2);

4) Конфигурация № 4 – трехслойная плита из ДПК размерами  $2000 \times 400 \times 30$  и с шагом ламелей в поперечном слое 100 мм;

5) Конфигурация № 5 – пятислойная плита из ДПК размерами  $2000 \times 400 \times 50$ .

Испытательный стенд представляет собой шарнирно опертую плиту нагруженный равномерно распределенной нагрузкой из кирпичей в несколько шагов различной интенсивности (рисунок 11).

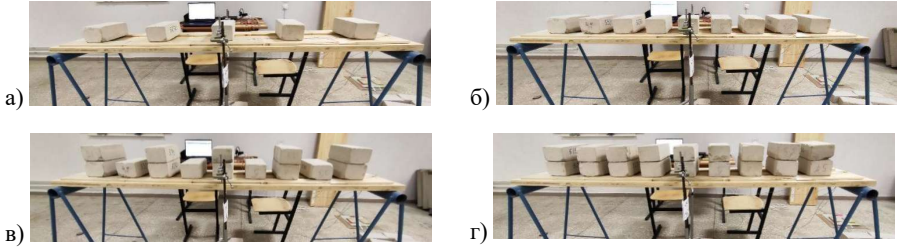


Рисунок 11 – Пример схемы нагружения на конфигурацию № 1  
(а – 1 ступень; б – 2 ступень; в – 3 ступень; г – 4 ступень)

Для измерения максимального прогиба плиты использовались 2 индикатора часового типа ИЧ-25, установленные в центре пролета плиты. Нормальные напряжения в плите были исследованы с помощью тензостанции ЗЕТ 017-Т. Для снятия показаний были использованы тензорезисторы с сопротивлением  $R = 200 \text{ Ом}$  и базой  $l = 20 \text{ мм}$ , соединенные в полумостовую схему. Показания снимались в двух точках конструкции – в центре ( $R_{1l}$ ) и  $1/4$  пролета ( $R_{2l}$ ).

Точность полученных результатов исследования оценивалась с помощью статистической обработки, в результате которой определены: средние арифметические прогибов и нормальных напряжений  $X$ , среднее квадратическое отклонение  $S$ , средняя ошибка  $S_r$ , коэффициент вариации  $V$  и относительная точность  $P_r$ .

Для исследования закономерности (16) определялась основная циклическая частота собственных колебаний конструкции при воздействии импульсной нагрузки (удара).

Для всех образцов были получены: значения максимального прогиба, нормальных напряжений в точке  $R_{1l}$ , нормальных напряжений в точке  $R_{2l}$ , коэффициента  $K$ .

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  $R_{1l}$ ) – 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.).

Таким образом, была верифицирована численная модель и подтверждена достоверность результатов, полученных с ее помощью. Экспериментально подтвер-

ждена применимость рассматриваемой закономерности о взаимосвязи максимального прогиба и частоты собственных колебаний для плит перекрытия из ДПК с различными параметрами сечения.

**В пятой главе** на основании доказанной закономерности разработана методика по оценке действительной несущей способности и деформативности.

Разработан алгоритм оценки действительной несущей способности и деформативности двусторонне опертых плит перекрытия из древесины перекрестноклееной (рисунок 12).

**Методика** исследования по приведенному алгоритму:

*1. Определение динамических характеристик конструкции.*

1.1. Проведение натуральных 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. 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  $K = 1,268$ .

2.2. Выполняется проверка условия жесткости (вторая группа предельных состояний). 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. Вычисляются максимальные напряжения  $\sigma_y$  в центре пролета плиты перекрытия с использованием коэффициента пропорциональности  $K = 1,268$ .

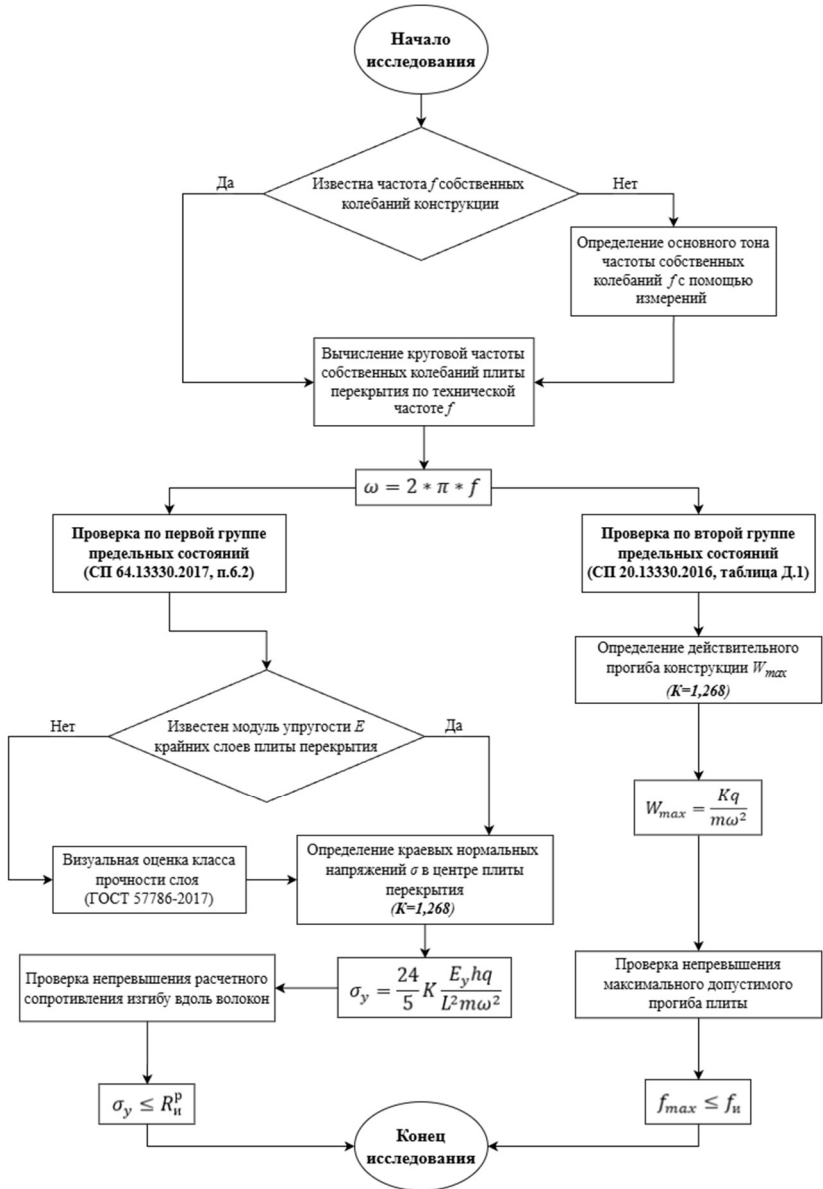


Рисунок 12 – Алгоритм оценки действительной несущей способности и деформативности двусторонне опертых плит перекрытия из древесины перекрестноклееной

3.3. Выполняется проверка условия прочности (первая группа предельных состояний) в соответствии с СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.» п. 6.2.

#### *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 с последующим усилением или замены.

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

Сопоставление экспериментальных данных по всем опытным образцам с результатами, полученными с помощью данного подхода, показало высокую сходимость: отклонение расчётных значений прогиба от опытных не превышает 10 % (в среднем 5 %), напряжений – 13 % (в среднем 7 %).

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

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 перекрестноклеенной 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  $\omega^2$  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).

## НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

### Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

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

11. Трошин, М. Ю. Методика оценки несущей способности перекрытий из древесины перекрестно клееной с варьируемыми параметрами сечений / М. Ю. Трошин, А. В. Коробко // *Строительство и реконструкция*. – 2025. – № 4(120). – С. 61–70. – DOI 10.33979/2073-7416-2025-120-4-61-70.

**Публикации в других научных изданиях:**

12. 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.

13. 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, 9 октября 2023 г. в г. Петрозаводске.* – Петрозаводск: МЦНП «НОВАЯ НАУКА», 2023. – С. 22–29.

14. Трошин, М. Ю. Влияние шага ламелей в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной плите из древесины перекрестно-клееной 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.

15. Трошин, М. Ю. 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. 661–666.

-----  
Подписано к печати 10.03.2026. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,2. Тираж 120 экз. Заказ 18.

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

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