

На правах рукописи

МАКАРОВ АРТЁМ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ДЕФОРМАТИВНОСТЬ СИСТЕМ ПЕРЕКРЁСТНЫХ БАЛОК  
ИЗ КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ  
И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

05.23.01 – Строительные конструкции,  
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел – 2017

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

Научный руководитель:	доктор технических наук, доцент <b>Турков Андрей Викторович</b>
Официальные оппоненты:	<b>Лабудин Борис Васильевич</b> , доктор технических наук, профессор, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (г. Архангельск), Кафедра инженерных конструкций, архитектуры и графики, профессор  <b>Дмитриев Игорь Кимович</b> , кандидат технических наук, Национальный исследовательский Московский госу- дарственный строительный университет (г. Москва), кафедра металлических и деревянных конструкций, доцент
Ведущая организация:	Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко АО «Научно-исследовательский центр «Строительство» (г. Москва)

Защита состоится «17» *февраля* 2018 г. в 11<sup>30</sup>. на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.094.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» <http://www.swsu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_ 2017 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., доцент

Н.В. Бакаева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Проектирование современных зданий и сооружений, конструирование машин и механизмов связано с всесторонними расчётами прочности, жёсткости и устойчивости конструкций, находящихся под действием статических и динамических нагрузок.

Оценке несущей способности и жесткости конструкций посвящено большое количество работ как отечественных, так и зарубежных авторов. В этих работах в основном рассматриваются вопросы напряжённо-деформированного состояния балок и стержней при воздействии статических нагрузок.

В последние годы начали интенсивно развиваться динамические методы диагностики и оценки качества строительных конструкций, в основе которых лежат вибрационные технологии. Это связано в том числе с обнаружением профессором В.И. Коробко фундаментальной закономерности в строительной механике, в основе которой лежат строгие функциональные взаимосвязи между интегральными физическими параметрами строительных конструкций, в частности, между максимальным прогибом нагруженных конструкций в виде балок и пластинок и их основной частотой колебаний в ненагруженном состоянии. Именно совместное рассмотрение двух видов деформации конструкций (поперечного изгиба и свободных колебаний) с учетом выявленной закономерности позволили творческому коллективу, возглавляемому профессором В.И. Коробко, разработать методы диагностики и контроля качества как вновь изготовленных конструкций, так и эксплуатирующихся в сооружении, причём в условиях ограниченной информации о свойствах материала конструкций, сведений об их реальных граничных условиях, об интенсивности действующей внешней нагрузки и других факторов.

Указанные выше закономерности относятся к изотропным конструкциям в виде отдельных стержней (балок) и изотропных пластинок постоянного сечения. На составные конструкции сложного вида, такие как системы перекрёстных балок (СПБ), полученные результаты пока не могут быть распространены. Для этого требуется проведение целого комплекса дополнительных теоретических и экспериментальных исследований для выявления специфических особенностей деформирования таких конструкций в условиях их статического и динамического нагружений.

**Степень разработанности темы исследований.** Вопросы конструирования и расчета клееных деревянных конструкций, а также систем перекрестных балок рассмотрены в работах Б.Г. Бегуна, В.В. Большакова, А.Б. Губенко, В.Ф. Иванова, В.А. Игнатьева, Г.Г. Карлсена, М.Е. Кагана, Б.В. Лабудина, Л.Н. Лубо, М.Ш. Минцковского, Б.А. Миронова, А.П. Морозова, К.П. Пятикрестовского, Б.А. Освенского, Ю.В. Слишкоухова, Е.И. Светозаровой, В.И. Трофимова, В.К. Файбишенко, Р.И. Хисамова и др.

Проблеме оценки жесткости строительных конструкций с помощью вибрационного метода посвящены исследования В.И. Коробко, А.В. Туркова,

А.П. Юрова, П.А. Гвозкова, М.О. Калашникова, В.И. Полякова, Д.И. Красильникова и др.

**Объект и предмет исследования.** Объектами исследования являются системы перекрёстных балок из деревянных клееных элементов на податливых связях. Предметом исследования являются методы диагностики и неразрушающего вибрационного контроля отдельных физических параметров систем перекрёстных балок.

**Целью диссертационной работы** является теоретические и экспериментальные исследования деформативности систем перекрёстных балок из деревянных клееных элементов при статическом и динамическом нагружении с учетом податливости соединений при изменении размеров ячеек, схемы опирания и включением в работу элементов покрытия.

Для достижения поставленной цели определены следующие основные **задачи**:

- определить влияние податливости узловых соединений элементов, схемы опирания конструкции, включение в работу СПБ покрытия на максимальный прогиб и основную частоту собственных колебаний систем перекрёстных балок на прямоугольном и треугольном плане;
- установить взаимосвязь между максимальными прогибами и собственными частотами поперечных колебаний систем перекрёстных балок из деревянных клееных элементов;
- разработать и изготовить стенд для проведения экспериментальных исследований систем перекрёстных балок;
- провести серию экспериментальных исследований систем перекрёстных балок с изменением жёсткости узловых соединений, схемы опирания, размеров ячеек, включения в работу элементов покрытия.

**Методология и методы исследования.** В ходе проведения теоретических исследований использовались аналитические и численные методы строительной механики и теории сооружений. При использовании численных методов расчета применялся программный комплекс «SCAD», реализующий метод конечных элементов. При проведении экспериментальных исследований и обработке полученных результатов использовались методы математической статистики.

**Достоверность** научных положений и результатов подтверждается:

- использованием фундаментальных принципов и методов строительной механики;
- сопоставлением результатов, полученных численными, теоретическими и экспериментальными методами.

**Научная новизна.** При проведении теоретических и экспериментальных исследований получены следующие новые научные результаты:

- выявлена зависимость частоты собственных колебаний и максимального прогиба от податливости узловых соединений, размера ячеек системы, схемы опирания и жёсткости покрытия к элементам СПБ на прямоугольном и треугольном плане;
- теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что системы перекрёстных балок из деревянных клееных элементов, шарнирно-опёртые по

контуру, при разных размерах ячеек и изменяемой податливости соединения, подчиняются фундаментальной закономерности о строгой функциональной зависимости их максимального прогиба от основной частоты колебаний;

- установлены пределы применимости указанной закономерности для системы перекрёстных балок из деревянных клееных элементов в зависимости от соотношения податливости узловых соединений, количества опор по контуру, от степени включения в работу системы покрытия и от размеров ячейки СПБ на прямоугольном и треугольном плане.

**На защиту выносятся следующие положения и результаты:**

- доказательство зависимости максимальных прогибов и частот собственных колебаний системы перекрёстных балок из деревянных клееных элементов от жесткости узловых соединений, размера ячейки, схемы опирания и степени включения в работу СПБ элементов покрытия;

- доказательство взаимосвязи максимального прогиба и основной частоты собственных колебаний системы перекрёстных балок из деревянных клееных элементов;

- методика оценки степени податливости узловых соединений;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований систем перекрестных балок из деревянных клееных элементов на упруго-податливых связях.

**Практическая ценность и реализация работы.** Разработанные в диссертации динамические методы определения жёсткости узловых соединений элементов, а также установленные пределы применимости фундаментальной закономерности для систем перекрестных балок на податливых связях, могут найти широкое применение при проектировании, усилении, обследовании и оценке технического состояния подобных конструкций.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на ежегодных научно-практических конференциях «Госунiversитета – УНПК» (2013–2015 гг.), на XVI Международной научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2013); на 3-й Всероссийской конференции «Проблемы оптимального проектирования сооружений» (Новосибирск, 2014); на IX Международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам (Йошкар-Ола, 2014); на Международной научно-технической конференции «Строительная наука-2014: теория, образование, практика, инновации» (Архангельск, 2014); на Международной научно-технической конференции «Строительная наука – XXI век: теория, образование, практика, инновации Северо-Арктическому региону» (Архангельск, 2015); на научно-технической конференции «Деревянные конструкции: разработка, исследование, применение» в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (Москва, 2016); на III Международной конференции (IX Всероссийской конференции) НАСКР-2016 (Чебоксары, 2016).

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 16 научных работ, в том числе 1 статья в журнале, входящем в международную базу данных Scopus, 9 статей в журналах из списка ВАК Минобрнауки России, рекомендованных для опубликования материалов по кандидатским диссертациям.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 104 наименования и 15 приложений. Работа изложена на 257 страницах, включая 114 рисунков и 46 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, приводится её общая характеристика, формулируются основные цели и задачи исследования, обсуждается достоверность и научная новизна результатов работы, их практическая ценность, также содержится информация по апробации работы.

**В первой главе** приведён обзор конструктивных решений систем перекрёстных балок, методов их статического и динамического расчёта. Рассматриваются методы применения вибрационных технологий для оценки жёсткости строительных конструкций.

К настоящему времени теоретические основы расчета перекрестных систем в большей степени сформированы и изложены в работах И.Г. Бубнова, С.П. Тимошенко, В. Ритца и других авторов. В последние десятилетия интенсивно развиваются численные (МКЭ) и геометрические методы. Метод расчёта с использованием частных уравнений в конечных разностях был разработан Ф. Блейхом и Е. Меланом.

В системах перекрёстных балок, выполненных из отдельных элементов, объединяющихся между собой в узлах с помощью податливых связей, невозможно с помощью этих методов выявить влияние жёсткости узловых соединений на распределение усилий в элементах и общую деформативность конструкций. Б.В. Лабудиним, Д.Д. Ишмаевой был предложен способ расчёта СПБ с учётом податливости узлов методом конечных элементов.

В изгибаемых системах деформативность характеризуется коэффициентом жёсткости  $C$  и определяется как отношение действующего в узле изгибающего момента  $M$  к величине угла  $\theta$  между нормальными концами соединяемых элементов, а численные значения коэффициентов жёсткости в каждом конкретном случае устанавливаются индивидуально и зависят от конструкции узла и вида применяемых связей.

Рассмотрены методы вибрационного контроля качества строительных конструкций и изделий вибрационными методами. Здесь можно выделить работы В.И. Коробко, Э.А. Сехниашвили и других учёных.

На основе анализа состояния вопроса сформулированы основные направления и задачи исследования.

**Во второй главе** приводятся доказательства функциональной взаимосвязи максимального прогиба упругих балок и изотропных пластинок с их основной частотой колебаний. Рассматривается зависимость для упругих изотропных пластин постоянной толщины и произвольной формы:

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

где  $W_0$  – максимальный прогиб пластины;  $\omega$  – частота собственных колебаний в ненагруженном состоянии;  $K$  – коэффициент пропорциональности;  $q$  – равномерно распределенная нагрузка;  $m$  – масса единицы площади пластины.

В качестве расчётной конструкции была принята система перекрёстных балок из клеёной древесины на прямоугольном плане. Размер ячейки изменялся от  $1 \times 1$  м до  $6 \times 6$  м. Соотношение сторон в плане изменялось от 1:1 до 1:2. Исследование проводилось при помощи программного комплекса «SCAD» методом конечных элементов (МКЭ). По контуру система перекрёстных балок опиралась в контурных узлах на шарнирные опоры. Элементы в узлах соединяются между собой с помощью стальных уголков и стальных нагелей (болтов). Конструкция узла и СПБ с соотношением сторон 1:1 приведена на рисунке 1.

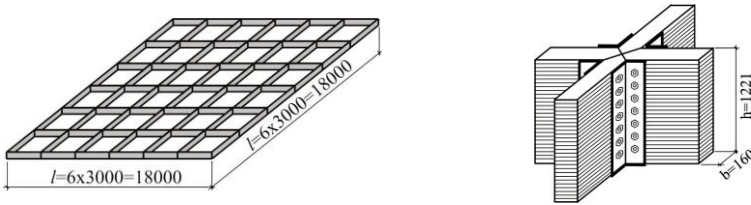


Рисунок 1 – Схема системы перекрёстных балок и узел примыкания элементов

В ходе исследования определялись максимальный прогиб СПБ и частота собственных поперечных колебаний. Для определения прогиба конструкция загружалась равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью  $q = 2,143$  кН/м<sup>2</sup>, при статическом расчёте нагрузки были приложены в узлы системы. Для определения собственных частот колебаний в узлы системы прикладывались сосредоточенные грузы, интенсивность которых рассчитывалась по фактическому собственному весу конструкции. Критерием точности расчёта служил коэффициент  $K$ , определяющийся из выражения (1):

$$K = \frac{W_0 \cdot \omega^2}{(q / m)}. \quad (2)$$

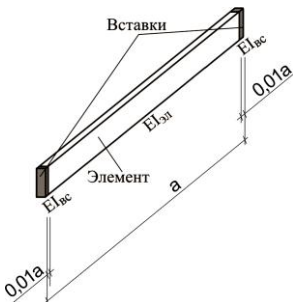


Рисунок 2 – Схема элемента СПБ с вставками

На первом этапе исследований определялось влияние жёсткости узловых соединений элементов на прогибы и частоты собственных колебаний. По концам элементов СПБ вводились вставки переменной жёсткости, которые учитывали податливость узловых соединений. Жёсткость вставки изменялась в диапазоне  $EI_{вс}/EI_{эл}$  от 0 (в практических расчётах принято соотношение 0,0001) до 1 (рисунок 2).

По данным, полученным в результате численных исследований, были построены графики зависимости частот собственных колебаний, максимальных прогибов и коэффициента  $K$  от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных разме-

рах ячеек (рисунок 3).

На следующих этапах проведены исследования с целью выявления взаимосвязи максимальных прогибов и частот собственных колебаний системы перекрёстных балок на квадратном плане с различными размерами ячеек при изменении схемы опирания (количества опор) в контурных узлах, а также при установке по верхнему поясу элементов покрытия, которые включаются в работу конструкции через податливые связи.

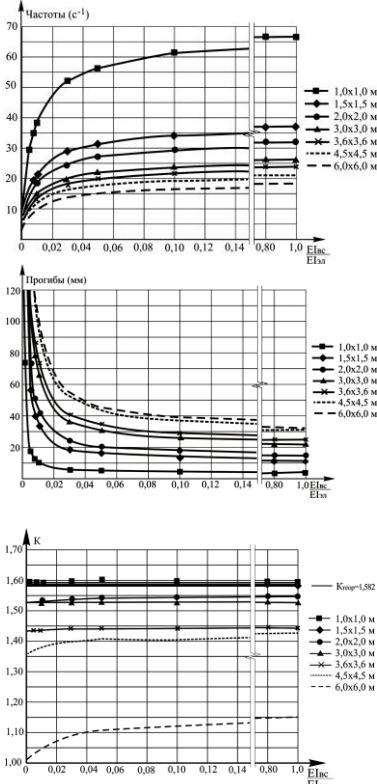


Рисунок 3 – Изменение частот собственных колебаний, прогибов и коэффициента  $K$  в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек

работу функциональная зависимость (1) даёт меньшую погрешность, чем при его отсутствии: отклонение коэффициента  $K$  от теоретического при  $l_1/l_2 \geq 0,75$  и

Аналогичные исследования были проведены для систем перекрёстных балок на прямоугольном плане с соотношением сторон в плане от 1:1 до 1:2.

Анализ данных показывает, для систем перекрёстных балок с размерами ячеек  $a/l < 0,17$  ( $a$  – размер ячейки,  $l$  – размер в плане системы перекрёстных балок) коэффициент  $K$  с точностью до 3,78% соответствует теоретическому значению для квадратных изотропных пластин постоянной толщины независимо от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента; при  $n/m > 0,4$  (где  $n$  – количество опор по одной стороне конструкции;  $m$  – количество контурных узлов по одной стороне) и  $a/l < 0,17$  коэффициент  $K$  с точностью до 7,55% соответствует теоретическому значению. С включением в работу элементов покрытия значение коэффициента  $K$  становится более близко к теоретическому. Для СПБ с соотношением сторон в плане  $l_1/l_2 \geq 0,75$  ( $l_1$  – короткая сторона,  $l_2$  – длинная сторона) и  $a/l < 0,33$  коэффициент  $K$  с точностью до 5,33% соответствует теоретическому значению для прямоугольных изотропных пластин постоянной толщины. Установлено, что коэффициент  $K$  для систем размером  $l_1/l_2 = 0,86$  с точностью до 3,9% соответствует теоретическому значению при  $c/d > 7/8$  (где:  $c$  – количество опор по короткой стороне конструкции;  $d$  – количество опор по длинной стороне конструкции). При включении покрытия в



$a/l < 0,33$  составляет до 2,66%.

В третьей главе приводятся доказательства функциональной взаимосвязи максимального прогиба систем перекрёстных балок на треугольном плане с их основной частотой колебаний.

В качестве расчётной конструкции была принята система перекрёстных балок из клеёной древесины на треугольном плане со сторонами 18м. Размер стороны ячейки  $a$  изменялся от 1 до 6м. Исследование проводилось при помощи программного комплекса «SCAD» методом конечных элементов (МКЭ).

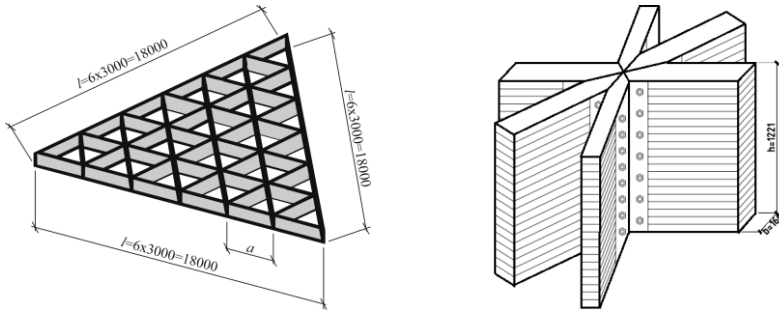


Рисунок 4 – Схема системы перекрёстных балок на треугольном плане и узел примыкания элементов

По контуру система перекрёстных балок опиралась в контурных узлах на шарнирные опоры. Элементы в узлах соединяются между собой с помощью стальных уголков и стальных нагелей (болтов). Конструкция узла и СПБ на треугольном плане приведена на рисунке 4.

В ходе исследования определялись максимальный прогиб СПБ и частота собственных поперечных колебаний. Загружения и материал элементов приняты аналогично СПБ на прямоугольном плане.

На первом этапе исследований определялось влияние жёсткости узловых соединений элементов. Соотношение жёсткости вставки к жёсткости дощато-клееного элемента изменялась в диапазоне  $EI_{вс}/EI_{эл}$  от 0 (в практических расчётах принято соотношение 0,0001) до 1. По данным, полученным в результате численных исследований, были построены графики зависимости частот собственных колебаний, максимальных прогибов и коэффициента  $K$  от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек (рисунок 5).

На других этапах проведены исследования с целью выявления взаимосвязи максимальных прогибов и частот свободных колебаний системы перекрёстных балок на треугольном плане с различными размерами ячеек при изменении схемы опирания (количества опор); при установке по верхнему поясу элементов покрытия, которые включаются в работу конструкции; с учётом влияния податливости крепления элементов покрытия к СПБ; с учётом влия-

ния жёсткости элементов покрытия.

Анализ данных показывает, что для систем перекрёстных балок на треугольном плане с размерами ячеек  $a/l < 0,17$  ( $a$  – размер ячейки,  $l$  – размер в плане системы перекрёстных балок) коэффициент  $K$  с точностью до 7,01% соответствует теоретическому значению для треугольных изотропных пластин постоянной толщины независимо от соотношения жесткости вставки к жёсткости элемента.

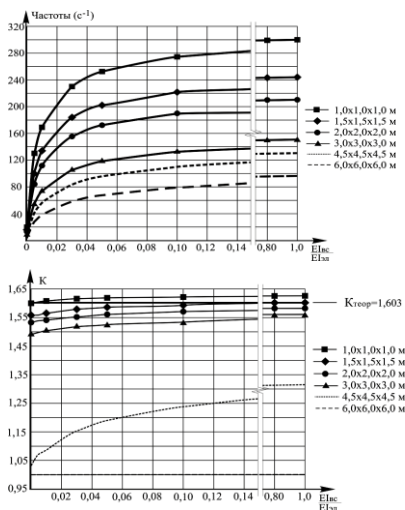


Рисунок 5 – Изменение частот собственных колебаний, прогибов и коэффициента  $K$  в зависимости от соотношения жёсткости вставки к жёсткости элемента при различных размерах ячеек

При соотношении  $n/m > 0,4$  (где  $n$  – количество опор по одной стороне конструкции;  $m$  – количество контурных узлов по одной стороне) и  $a/l < 0,17$  коэффициент  $K$  с точностью до 9,34% соответствует теоретическому значению. С включением в работу элементов покрытия значение коэффициента  $K$  становится более близким к теоретическому. С увеличением жёсткости связей жёсткость всей конструкции увеличивается. Отклонение коэффициента  $K$  от теоретического при  $a/l \leq 0,17$  составляет до 5,95%. С увеличением жёсткости элементов покрытия увеличивается жёсткость конструкции, а коэффициент  $K$  практически не изменяется.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований систем перекрёстных балок при действии динамических и статических нагрузок. Для СПБ был изготовлен испытательный стенд (рисунок 6). Испытательный стенд представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из вертикальных опор, сложенных из кирпича и установленных по углам конструкции. По опорам сверху уложены железобетонные балки сечением  $120 \times 130$  (h) мм, на которые СПБ опирается через стальные цилиндрические опоры диаметром 20 мм.

Система перекрёстных балок выполнена из деревянных элементов цельного сечения  $10 \times 100(h)$  мм длиной 590 мм (для испытаний конструкции с ячейками  $600 \times 600$  мм) и 390 мм (для испытаний конструкции с ячейками  $400 \times 400$  мм), которые в узлах соединяются при помощи стальных гнутых уголков из листа толщиной 1 мм на болтах М6 (рисунок 6).



а)



б)

Рисунок 6– Испытательный стенд для экспериментальных исследований систем перекрёстных балок (а – экспериментальная СПБ с ячейками  $0,6 \times 0,6$  м; б – та же конструкция с элементами покрытия)

Предварительно был определён фактический кратковременный модуль упругости древесины элементов СПБ, который составил  $E = 11043$  МПа. Податливость узловых соединений моделировалась количеством болтов в каждом узле. На 1-ом этапе в узлах было установлено по 4 болта на каждый элемент балки, примыкающий к узлу. На 2-ом этапе податливость узловых соединений увеличивалась путём выкручивания 50% болтов из каждого узла схемы (рисунок 7).

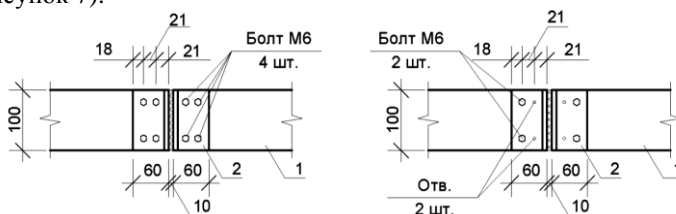


Рисунок 7– Узлы системы перекрёстных балок с 4 и 2 нагелями

Схема опирания изменялась путём удаления цилиндрических опор под контурными узлами. При исследованиях СПБ с покрытием сверху на систему укладывались листы древесно-волокнуистой плиты толщиной 3,2 мм размером на ячейку. Крепление листов осуществляется гвоздями диаметром 1 мм дли-

ной 15 мм. Жесткость крепления покрытия к СПБ варьировалась количеством гвоздей от 2 до 5 по каждой стороне ячейки.

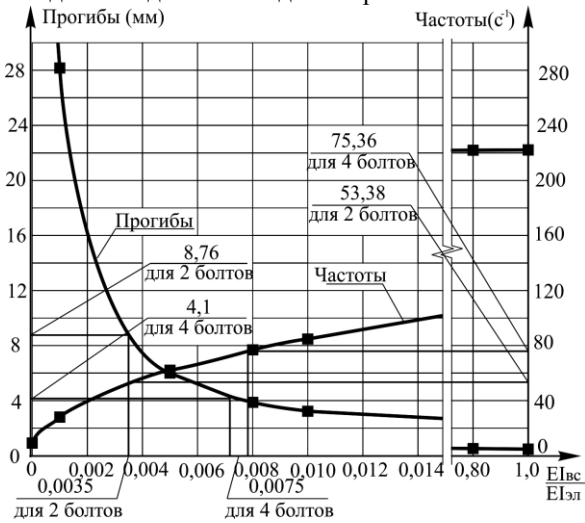
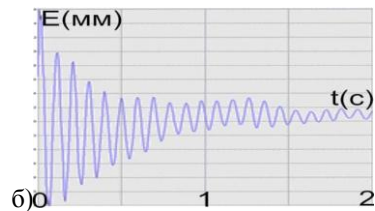
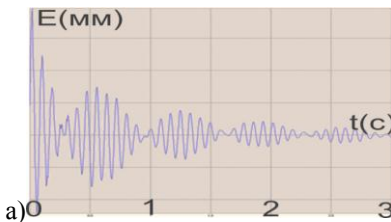


Рисунок 8 – Изменение частот собственных колебаний и прогибов СПБ в зависимости от соотношения жесткости вставки к жесткости элемента

На первом этапе выполнены исследования по экспериментальному определению фактической податливости узловых соединений. По результатам испытаний определена фактическая податливость соединений, которая составила  $EI_{вс}/EI_{эл}=0,0075$  при 4 болтах в узле и  $EI_{вс}/EI_{эл}=0,0035$  при 2 болтах в узле (рисунок 8).

Результаты экспериментальных исследований СПБ без покрытия приведены в таблице 1, характерные виброграммы колебаний для системы с размером ячеек  $0,4 \times 0,4$  м представлены на рисунке 9.



Статическая равномерно распределенная нагрузка создавалась при помощи запаянных пакетов с кварцевым песком. Загружение статической нагрузкой осуществлялось в пять равных ступеней. Измерение прогибов производилось в центральном узле конструкции индикатором часового типа ИЧ-25 с ценой деления 0,01 мм, измерения частот колебаний выполнялись при помощи виброанализатора «ВИБРАН – 2.0».

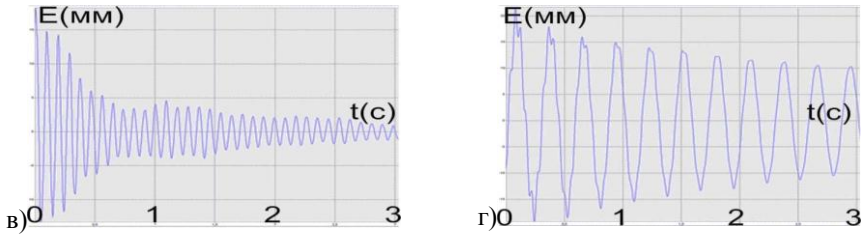


Рисунок 9 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ при 4 болтах в узле в зависимости от схемы опирания (а – 7 опор, б – 4 опоры, в – 3 опоры, г – 2 опоры)

Таблица 1– Сопоставление экспериментальных и теоретических результатов исследования СПБ при различной жесткости узлов и при изменении схемы опирания

		Кол-во болтов в узле 4				Кол-во болтов в узле 2			
		Кол-во опор по одной стороне				Кол-во опор по одной стороне			
		7	4	3	2	7	4	3	2
Максимальный прогиб $W_0$ (мм)	Эксперимент	4,10	4,79	5,02	15,6	8,76	9,89	11,47	-
	Численно	4,14	5,36	6,17	11,9	8,37	10,12	11,00	26,71
Отклонение эксп. от числ. (%)		0,97	10,6	18,6	23,72	4,45	2,27	4,10	-
Круговая частота, $\omega$ ( $c^{-1}$ )	Эксперимент	75,36	70,34	69,08	25,74	53,38	50,87	47,73	21,35
	Численно	74,69	65,31	60,63	29,69	52,54	47,52	45,40	19,02
Откл. эксп. от числ. (%)		0,89	7,15	12,23	13,30	1,57	6,59	4,88	10,91
К	Эксперимент	1,581	1,610	1,627	1,405	1,695	1,738	1,775	-
	Численно	1,569	1,553	1,540	1,426	1,569	1,551	1,540	1,313
Отклонение эксп. от числ. (%)		0,76	3,54	5,35	1,47	7,43	10,76	13,24	-
$K_{теор}$		1,582							
Отклонение К от $K_{теор}$ (%)	Эксперимент	0,03	1,74	2,85	11,20	6,69	8,99	10,86	-
	Численно	0,84	1,89	2,63	9,87	0,85	1,93	2,66	17,00

На следующем этапе рассматривается включение в работу элементов покрытия. Для этого выполнены исследования по экспериментальному определению фактической податливости крепления покрытия к элементам СПБ. Предварительно численным методом определены прогибы и частоты колебаний экспериментальной конструкции (рисунок 10).

Характерные виброграммы для системы с размером ячеек 0,4×0,4 м с покрытием сверху, при изменении жесткости крепления покрытия к элементам СПБ представлены на рисунке 11.

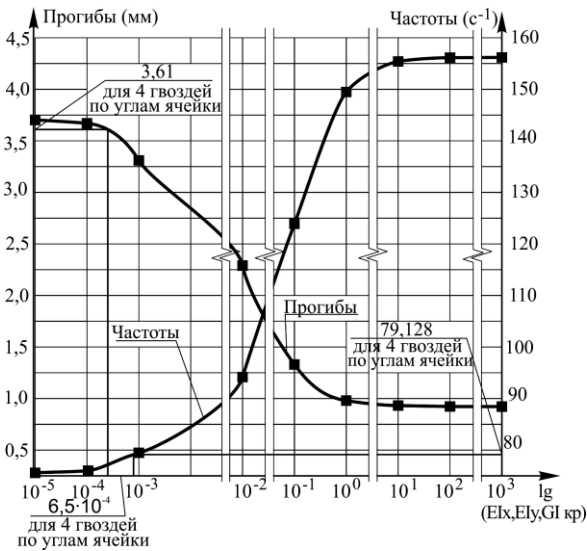


Рисунок 10 – Изменение частот собственных колебаний и прогибов в зависимости от степени включения в работу покрытия

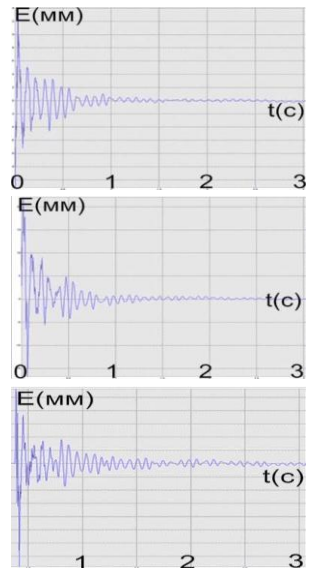


Рисунок 11 – Характерные виброграммы собственных колебаний СПБ с покрытием при 4 болтах в узле в зависимости от жесткости крепления покрытия (а – 2 гвоздя по стороне ячейки, б – 3 гвоздя, в – 5 гвоздей)

В таблице 2 представлены результаты сопоставления экспериментальных и теоретических результатов исследования СПБ при различной жесткости крепления узловых соединений и жесткости крепления покрытия. Аналогичные исследования были проведены для СПБ с размером  $0,6 \times 0,6$  м.

Анализ данных показывает, что экспериментальные данные достаточно хорошо совпадают с данными численного исследования экспериментальной конструкции.

**В приложениях А...Р** приводятся таблицы с результатами исследований СПБ различной формы, при изменении размеров ячейки, схемы опирания, учета включения в работу элементов покрытия, изменении жесткости крепления покрытия, и изменении жесткости самого покрытия.

Таблица 2 – Сопоставление экспериментальных и теоретических результатов исследования СПБ при различной жесткости крепления узловых соединений и жесткости крепления покрытия.

		Кол-во болтов в узле 4			Кол-во болтов в узле 2		
		Кол-во гвоздей по одной стороне покрытия			Кол-во гвоздей по одной стороне покрытия		
		2	3	5	2	3	5
Максимальный прогиб $W_0$ (мм)	Эксперимент	3,61	3,24	2,94	6,46	5,62	5,25
	Численно	3,43	3,16	2,89	6,31	5,32	5,11
Откл. эксп. от числ. (%)		4,99	2,47	1,70	2,32	5,34	2,67
Круговая частота, $\omega$ (с <sup>-1</sup> )	Эксперимент	79,13	82,90	87,92	59,03	63,43	65,94
	Численно	78,24	80,95	84,39	57,41	62,14	63,32
Откл. эксп. от числ. (%)		1,12	2,35	4,02	2,74	2,03	4,11
К	Эксперимент	1,535	1,512	1,544	1,529	1,536	1,550
	Численно	1,426	1,407	1,398	1,413	1,396	1,392
Откл. эксп. от числ. (%)		7,10	6,94	9,46	7,59	9,11	10,19
$K_{\text{геор}}$		1,582					
Отклонение К от $K_{\text{геор}}$ (%)	Эксперимент	2,95	4,40	2,42	3,35	2,92	1,99
	Численно	9,85	11,08	11,62	10,67	11,78	12,02

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сформулировать следующие выводы:

1. Выявлена зависимость максимальных прогибов и частот собственных колебаний системы перекрестных балок из деревянных клееных элементов от податливости узловых соединений, размера ячеек системы, схемы опирания и жесткости покрытия к элементам СПБ на прямоугольном и треугольном плане.

2. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что для систем перекрестных балок из деревянных клееных элементов при соотношением сторон в плане  $l_1/l_2 \geq 0,75$  ( $l_1$  – короткая сторона,  $l_2$  – длинная сторона) и размере ячейки  $a/l_1 < 0,33$  ( $a$  – размер ячейки), а также при опирании системы перекрестных балок минимум на три опоры по стороне, произведение их максимального прогиба  $W_0$  от действия равномерно распределённой нагрузки  $q$  на квадрат основной частоты колебаний в ненагруженном состоянии  $\omega$  есть величина постоянная и соответствует зависимости:

$$W_0 \omega^2 = K \frac{q}{m}$$

3. Установлены пределы применимости функциональной зависимости, приведенной выше, для систем перекрестных балок из деревянных клееных элементов с различными размерами ячеек, податливости узлов, схем опирания и степени включения в работу СПБ покрытия.

4. Разработана и реализована программа проведения экспериментальных исследований систем перекрестных балок на статические и динамические нагрузки. Данные, полученные в ходе эксперимента, подтвердили результаты численных исследований.

5. Разработанные в диссертации динамические методы определения жёсткости узловых соединений элементов, а также установленные пределы применимости фундаментальной закономерности для систем перекрестных балок на податливых связях могут найти широкое применение при проектировании, усилении, обследовании и оценке технического состояния подобных конструкций.

**Перспективы дальнейших исследований** по теме диссертационной работы заключаются в разработке методики расчета и рекомендаций для проектирования, обследования и оценки технического состояния систем перекрёстных балок на ромбическом и шестиугольном плане.

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

### **Публикация в журнале, входящем в международную базу данных Scopus:**

1. Турков, А.В. Экспериментальные исследования систем перекрёстных балок из деревянных элементов на динамические и статические нагрузки. [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров** // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016. – №3. – С. 275-279. (0,30 / 0,25 п.л. автора)

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

2. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на квадратном плане с учетом податливости узловых соединений [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров** // Строительство и реконструкция. – 2013. – №1. – с. 33-36. (0,25 / 0,15 п.л. автора)

3. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок с различными размерами ячеек на квадратном плане с учетом податливости узловых соединений [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров** // Строительство и реконструкция. – 2013. – №2. – С. 57-61. (0,25 / 0,2 п.л. автора)

4. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок с пластинами по верхнему поясу с учётом податливости связей, крепящих элементы покрытия к системе [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров** // Строительство и реконструкция. – 2013. – №5. – С. 30-35. (0,50 / 0,40 п.л. автора)

5. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок с различными размерами ячеек на квадратном плане в зависимости от схемы опирания [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров** // Строительство и реконструкция. – 2013. – №6. – С. 49-52. (0,25 / 0,15 п.л. автора)



6. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на прямоугольном плане с различными размерами ячеек с учётом податливости узловых соединений [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров** // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – №2. – С. 22-25. (0,25 / 0,15 п.л. автора)

7. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на прямоугольном плане в зависимости от схемы опирания [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров** // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – №10. – С. 27-29. (0,25 / 0,15 п.л. автора)

8. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок с различными размерами ячеек на треугольном плане в зависимости от схемы опирания [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров**, Е.С. Волобуева // Строительство и реконструкция. – 2015. – №2. – С. 46-50. (0,30 / 0,20 п.л. автора)

9. Турков, А.В. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок из деревянных элементов на квадратном плане с размером ячеек 0,4х0,4 м на динамические и статические нагрузки при изменении податливости связей [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров** // Строительство и реконструкция. – 2016. – №6. – С. 51-56. (0,30 / 0,25 п.л. автора)

10. Турков, А.В. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок из деревянных элементов на квадратном плане с размером ячеек 0,4х0,4 м на динамические и статические нагрузки при изменении податливости связей [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров**, О.А. Ветрова // Строительство и реконструкция. – 2017. – №1. – С. 82-89. (0,30 / 0,20 п.л. автора)

#### Публикации в других изданиях:

11. **Макаров, А.А.** Оценка податливости узловых соединений в системах перекрестных балок на квадратном плане [Текст] / А.А. Макаров // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник тезисов Шестнадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых; м-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «МГСУ». – М.: МГСУ, 2013. – С. 183-186.

12. **Макаров, А.А.** Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на прямоугольном плане в зависимости от схемы опирания [Текст] / А.А. Макаров // Материалы IX международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. – С. 140-142

13. **Макаров, А.А.** Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок с пластинами по верхнему поясу с различными размерами ячеек на квадратном плане в зависимости от толщины пластины и размера ячеек [Текст] / А.А. Макаров // Проблемы оптимального проектирования сооружений: Доклады 3-й Всероссийской конференции, Новосибирск, 15-17 апреля, 2014 г. – Новосибирск: НГАСУ, 2014. – С. 248-254.

14. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на прямоугольном плане с пластинами по верхнему поясу [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров** // Строительная наука – 2014: теория, образование, практика, инновации: сборник трудов междунар. научно-техн. конф., г. Архангельск, 22-23 мая 2014г. / ред. колл.: Лабудин Б.В. и др. – Архангельск: Издательство ООО «Типография «Точка», 2014. – С. 265-271. (0,50 / 0,40 п.л. автора)

15. Турков, А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на треугольном плане с пластинами по верхнему поясу [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров**, Е.С. Волобуева // Строительная наука – XXI век: теория, образование, практика, инновации Северо-арктическому региону: сборник трудов международной научно-технической конференции 28-30 июня 2015г. / м-во образования и науки РФ, Северный (Арктический) Федеральный ун-т им. М.В. Ломоносова, ин-т стр-ва и архитектуры и др.; [отв. ред. Б. В. Лабудин]. – СПб.: Свое изд-во, 2015. – С. 392-401. (1,00 / 0,75 п.л. автора)

16. Турков, А.В. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок из деревянных элементов на квадратном плане с размером ячеек 0,4x0,4 м на динамические и статические нагрузки при различной схеме опирания [Текст] / А.В. Турков, **А.А. Макаров** // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы III Международной (IX Всероссийской) конференции. – Чебоксары: изд-во Чувашского ун-та, 2016. – С. 158-165. (0,50 / 0,40 п.л. автора)

Подписано в печать 30.11.2017 г.

Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,00.

Тираж 100 экз.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет

имени И.С. Тургенева»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29.