

На правах рукописи



Калашникова Ольга Владимировна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ БАЛОЧНОГО ТИПА
СОСТАВНОГО И ЦЕЛЬНОГО СЕЧЕНИЙ**

Специальность: 05.23.01 –

Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Курск – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс».

Научный руководитель: академик РААСН, доктор технических наук, профессор,
Колчунов Виталий Иванович

Официальные оппоненты: **Лабудин Борис Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет» (г. Архангельск), профессор кафедры «Инженерные конструкции и архитектура»

Смоляго Геннадий Алексеевич
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова» (г. Белгород), профессор кафедры «Строительство и городское хозяйство»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Вологодский государственный университет» (г. Вологда)**

Защита состоится 29 мая 2015 года в 15-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета ДМ 212.105.11, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия» по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, аудитория Г-527.

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

Отзывы на автореферат направлять в диссертационный совет по адресу: ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Автореферат разослан « » _____ 2015 г.

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



Н.В. Бакаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Составные конструкции балочного типа широко представлены в современном строительном комплексе. Они применяются для повышения жесткости и прочности конструкций при необходимости перекрытия больших пролетов зданий и сооружений и являются достаточно экономичными. К составным конструкциям относятся металлические колонны с решётчатой структурой, двухветвевые железобетонные колонны, фермы из разных материалов, железобетонные пустотные плиты и т. п. К схеме расчета составных конструкций приводятся несущие конструкции высотных зданий.

Составные конструкции образуются также и при усилении несущих элементов зданий и сооружений. Одним из широко распространённых способов усиления конструкций является способ увеличения поперечного сечения их элементов, который в большинстве случаев реализуется путем наращивания или подрачивания сечений по всей длине элементов или на их определённых участках. При этом дополнительные слои могут быть выполнены из того же материала, что и усиливаемая конструкция, а также и из другого материала.

Наиболее распространенными являются составные деревянные конструкции. Их применяют, сплачивая брёвна или брусья между собой различными способами. Важной особенностью таких конструкций является податливость механических связей, соединяющих отдельные слои, и учет этого фактора вносит существенные сложности при их расчете.

Теория расчёта составных конструкций разработана в строительной механике и теории сооружений достаточно полно. При проведении таких расчётов необходимо знание коэффициента жесткости шва, соединяющего слои составной конструкции, и изгибной жесткости стыковых соединений в укрупняемых конструкциях. Эти параметры можно определить лишь экспериментально путем статического нагружения натурной конструкции или её фрагментов сдвиговой нагрузкой или с помощью испытания большемерных моделей, изготовленных с учетом геометрического и физико-механического подобия.

Проведение испытаний натурной конструкции, находящейся вне сооружения, путем её статического нагружения является достаточно трудоёмким процессом, а испытания таких конструкций, находящихся в условиях эксплуатации, часто невозможно осуществить вообще из-за неопределённости действительных условий закрепления конструкций. Поэтому поиск новых принципов и способов оценки коэффициента жесткости составных балок и изгибной жесткости стыковых соединений, позволяющих упростить процедуру экспериментов и снизить их трудоемкость, является актуальной задачей, имеющей важное значение в области диагностики и контроля качества строительных конструкций. Одним из перспективных методов в этом направлении исследований является вибрационный метод, обладающий меньшей трудоемкостью, чем статический, и позволяющий диагностировать многие конструкции, находящиеся в условиях эксплуатации при ограниченной информации о физических свойствах материала, неопределённости граничных условий, площади рабочей арматуры (в железобетонных конструкциях) и др.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются конструкции балочного типа цельного и составного сечений (однопролетные балки и фермы с параллельными поясами), а предметом исследования – способы неразрушающего контроля жесткости соединительного шва составных балок, изгибной жесткости стыковых соединений и жесткости балок из физически нелинейного материала.

Целью диссертационной работы является разработка и совершенствование статических и вибрационных экспериментально-теоретических способов определения жесткостных параметров балок составного и сплошного сечений и методик их практической реализации.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие **задачи**:

– обосновать возможность применения вибрационных методов для диагностики состояния составных балок;

– разработать статический и вибрационный способы контроля жесткости горизонтального шва составных балок, жесткости балок с укрупнительными стыками, изгибной жесткости стыковых соединений и методики практической реализации этих способов;

– провести тестирование статического и вибрационного способов определения жесткости горизонтального шва составных балок с помощью численного эксперимента на примере определения жесткости решётки металлических ферм с параллельными поясами, имеющем точное теоретическое решение;

– разработать вибрационный способ контроля жесткости балок, изготовленных из физически нелинейного материала;

– провести экспериментально-теоретические исследования большемерных моделей:

- деревянных составных балок и балок с укрупнительными монтажными стыками для отработки методик реализации предложенных способов контроля жесткостных параметров таких конструкций;

- деревянных составных балок с переменной высотой соединительного шва и переменным числом нагелей для выявления функциональных связей жесткостных характеристик таких балок с этими параметрами;

- железобетонных перемычек с использованием вибрационного способа контроля жесткости для опытной проверки теоретических предположений, положенных в его основу.

Методы исследования. При проведении теоретических расчетов использовались классические аналитические и численные методы теории сооружений. При проведении экспериментальных исследований и обработке полученных результатов использовались методы математической статистики. При использовании численных методов расчета применялись программные комплексы «Scad» и «Matcad».

Достоверность научных положений и результатов подтверждается:

– использованием фундаментальных принципов и методов строительной механики и теории сооружений, известных классических методов моделирования строительных конструкций при проведении экспериментов;

– сопоставлением экспериментальных результатов с теоретическими, а также результатами многократных параллельных статических и вибрационных испытаний конструкций.

Научная новизна полученных результатов

При проведении теоретических и экспериментальных исследований разработаны новые способы контроля жесткостных параметров составных и укрупняемых конструкций балочного типа и методики их практической реализации, в том числе:

– статический и вибрационный способы:

- определения жесткости горизонтального шва в двухслойных составных балках;

- контроля жесткости балок с вертикальным монтажным стыком в пролете;
- контроля изгибной жесткости вертикального стыка в укрупняемых балках;
- вибрационный способ контроля жесткости балок из материала, обладающего физически нелинейными свойствами;
- теоретически установлены закономерности влияния геометрии решетки стальных ферм с параллельными поясами на их жесткость;
- экспериментально установлены закономерности влияния на жесткость деревянных составных конструкций высоты шва и количества нагелей.

Практическая ценность и реализация работы

Разработанные в диссертации статические и вибрационные способы диагностики и контроля параметров жесткости составных и укрупняемых балок и методики их практической реализации могут найти широкое применение при разработке и конструировании новых типов составных конструкций, контроле качества конструкций балочного типа при их изготовлении в условиях заводского производства, а также при обследовании конструкций зданий и сооружений в условиях эксплуатации.

Результаты работы рекомендуется использовать при реальном проектировании конструкций балочного типа, а также в учебном процессе строительных вузов при изучении дисциплины «Обследование и испытание сооружений».

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

- статические и вибрационные способы и методики определения жесткости горизонтального шва в двухслойных составных балках, контроля жесткости балок с вертикальным монтажным стыком в пролете, контроля изгибной жесткости вертикального стыка в укрупняемых балках и методики их практической реализации;
- результаты численного эксперимента по тестированию предложенных способов контроля коэффициента жесткости шва на примере металлической фермы с параллельными поясами;
- вибрационный способ контроля жесткости балок из материала, обладающего физически нелинейными свойствами, и результаты испытания железобетонных перемычек;
- закономерности влияния на жесткость деревянных составных конструкций высоты шва и количества нагелей;
- рекомендации по выбору геометрии решеток ферм с параллельными поясами.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на научных конференциях ФГБОУ ВПО «Госунiversитета – УНПК» в 2010...14 гг.; на Международной конференции «Актуальные проблемы исследований по теории сооружений» (Москва, 2009 г.); на 3-ей Всероссийской конференции «Проблемы оптимального проектирования сооружений» (Новосибирск, 2014 г.).

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы при проведении исследований по НИР, выполнявшейся в рамках аналитической ведомственной целевой программы Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009 – 2011 гг.) по проекту №2.1.2/10201 «Разработка теоретических основ и развитие вибрационных методов диагностики состояния и контроля качества строительных конструкций балочного типа и пластинок».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 5 статей в журналах из списка ВАК, рекомендованных для опубликования материалов по кандидатским диссертациям, получено 5 патентов РФ на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, библиографического списка литературы, включающего 135 наименований и Приложений. Работа изложена на 168 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка и 14 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность темы, формулируется цель и задачи исследований, оценивается научная новизна работы и достоверность полученных результатов.

В первой главе подробно рассматриваются деревянные составные балки, способы их соединения, приводится обзор методов диагностики и контроля качества строительных конструкций.

Составные конструкции широко распространены в строительстве. К расчетной схеме составных конструкций приводятся задачи, связанные с расчетом сквозных металлических колонн, двухветвевых железобетонных колонн и пустотных плит перекрытия, каркаса высотного здания и деревянные балки с различными видами соединения элементов и/или слоев.

Среди российских ученых, занимавшихся развитием теории расчета составных конструкций и совершенствованием способов их конструирования, следует отметить капитальные труды Г.Г. Карлсена, А.Р. Ржаницына, а также работы В.В. Бирюлёва, Ю.В. Быховского, М.М. Гапоева, Б.А. Гарагаша, Э.Г. Давыдова, А.А. Дергачева, А.В., Дятлова, В.И. Заборова, И.С. Инжутова, Л.Е. Лабзина, Е.Е. Милейковского, Л.Л. Панышина, В.Г. Писчикова, П.Ф. Плешкова, Д.М. Подольского, А.П. Пшеничкина, Ю.В. Слицкоухова, Р.А. Хечумова, В.В. Холопцева и др.

Среди зарубежных ученых следует выделить работы И. Арновлевича, Б. Гоши, Л. Грюнинга, М. Енделя, Р. Мизеса, Б. Левицкого Н. Мюллера-Бреслау, И. Ратцердорфера, Р. Росмана, И. Шейнога и др.

Активная работа в области исследования составных конструкций ведется в ФГБОУ ВПО «Государственном университете – УНПК» творческим коллективом под руководством академика РААСН В.И. Колчунова. Среди работ этого коллектива следует отметить публикации и диссертационные работы А.В. Туркова, Н.В. Ключевой, Л.А. Панченко, П.А. Гвозкова, П.В. Сапожникова, Е.А. Скобелевой, С.И. Горностаева, Я.Е. Колчина и др.

При анализе методов диагностики и неразрушающего контроля качества строительных конструкций отмечается, что одним из перспективных методов является динамический (вибрационный) метод, который в нашей стране не находит должного применения, отсутствуют ГОСТы и технического регламента для его использования. Это объясняется отсутствием теоретической и методологической базы, а также реального спроса со стороны строительных и проектных организаций.

В первой половине прошлого века, несмотря на отсутствие теории расчета составных конструкций, они уже использовались в строительстве. Практический опыт строительства многих сооружений позволил выработать рекомендации по выбору типа нагелей, их количества, порядку расстановки в зависимости от длины элементов, породы древесины, площади поперечного сечения и т.п. Эти рекомендации перешли в нормативные документы, в том числе СНиПы, действующие и поныне.

Законченная теория расчёта составных стержней разработана в строительной механике российскими учеными лишь в 60-х годах прошлого века. В теории расчета та-

ких конструкций используется коэффициент жесткости шва, который может определяться для каждой конструкции конкретного типа только экспериментально и, как правило, на фрагментах. Проблемным также является вопрос определения жесткостных характеристик стыковых соединений в укрупняемых конструкциях, эти параметры также могут определяться только экспериментально. Поэтому разработка и совершенствование теоретических и экспериментальных способов определения жесткостных характеристик балок и балочных ферм составного и цельного сечений, балок с с монтажными стыками, является актуальной задачей (проблемой), требующей своего решения.

Во второй главе излагаются результаты исследований, направленные на разработку статического и вибрационного способов определения жесткостных параметров составных и укрупняемых балок, балок из физически нелинейного материала, а также балочных стальных ферм.

При проведении экспериментальных исследований одним из эффективных приёмов является моделирование строительных конструкций, когда испытания проводят на физических моделях, а полученные результаты с использованием закономерностей теории подобия переносят на натурные конструкции простым пересчетом с использованием критериев подобия. Для задачи о свободных колебаниях упругой балки критерий подобия записывается в виде выражений

$$\omega \ell^2 \sqrt{m/(EI)} = \text{idem}, \quad \text{или} \quad \omega_1 \ell_1^2 \sqrt{m_1/(E_1 I_1)} = \omega_2 \ell_2^2 \sqrt{m_2/(E_2 I_2)}, \quad (1)$$

где ω – собственная частота колебаний; ℓ – пролёт балки; m – погонная масса балки; E – модуль упругости материала; I – момент инерции сечения; индекс 1 относится к первой балке (модели), а 2 – ко второй (оригиналу). Аналогично, для задачи поперечного изгиба упругой балки равномерно распределенной нагрузкой q имеем:

$$\frac{(w_0)_1 E_1 I_1}{q_1 \ell_1^4} = \frac{(w_0)_2 E_2 I_2}{q_2 \ell_2^4}, \quad (2)$$

где w_0 – максимальный прогиб.

При вибрационном и статическом моделировании однопролетных балок из выражений (1) и (2) получим соответственно:

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{\ell_1^2}{\ell_2^2} \sqrt{\frac{m_1}{m_2} \frac{E_1 I_1}{E_2 I_2}}, \quad (w_0)_2 = (w_0)_1 \frac{E_1 I_1}{E_2 I_2} \frac{q_2 \ell_2^4}{q_1 \ell_1^4}. \quad (3)$$

При оценке погрешности результатов, полученных по этим формулам, необходимо учитывать абсолютные погрешности всех параметров, относящихся и к модели, и к оригиналу, с их среднестатистическими отклонениями от номинальных параметров, а также погрешности измерения величин ω_1 и $(w_0)_1$. Кроме того, на величину относительной погрешности будут накладываться погрешности, связанные с обеспечением подобия условий опирания. Как правило, общая относительная погрешность при исследовании каждого вида деформаций в отдельности достигает (15...20)%, а иногда и более.

В строительной механике известна закономерность о взаимосвязи задач поперечного изгиба и свободных колебаний балок, полученная с помощью численного эксперимента: *для упругих однопролетных балок, изготовленных из материала, подчиняющегося закону Гука, с любой комбинацией граничных условий по концам от шарнирно опирания до жесткого защемления произведение максимального прогиба w_0 от дей-*

ствия равномерно распределенной нагрузки q на квадрат основной частоты колебаний этих балок в ненагруженном состоянии ω с точностью до размерного множителя q/m есть величина постоянная, численно равная $\approx 1,279 \approx 4/\pi$:

$$w_0 \omega^2 \approx 1,279 q/m \approx 4/\pi \times q/m. \quad (4)$$

В этой формуле коэффициент $4/\pi$ для любых рассматриваемых граничных условий имеет погрешность не выше 1,0%.

Закономерность (4) замечательна тем, что описывающее её выражение не зависит от изгибной жесткости балки EI , длины пролета ℓ , вида граничных условий по её концам и вида используемого материала. Это обстоятельство позволяет при обследовании зданий и сооружений контролировать жесткость упругих балок по их основной частоте колебаний при весьма ограниченной информации об этих балках:

$$w_0 = \frac{4}{\pi} \frac{q}{m} \frac{1}{\omega^2}. \quad (5)$$

В отличие от формул (1) и (2) выражение (6) имеет всего три независимых параметра вместо девяти. Это означает, что ожидаемая погрешность определения максимального прогиба балок по формуле (6) будет существенно ниже, чем по формулам (1) и (2).

Закономерность (4) можно использовать в качестве математической модели для оценки жесткости составных упругих балок при достаточно большом количестве нагелей, поскольку в этом случае влиянием нелинейной составляющей упругопластических деформаций нагелей можно пренебречь.

В соответствии с теорией составных конструкций, разработанной профессором А.Р. Ржаницыным, расчет двухслойной шарнирно опертой составной балки из одного и того же материала с равной толщиной слоев под действием равномерно распределенной нагрузки сводится к решению дифференциального уравнения

$$y^{IV} - \lambda^2 y'' = q/(2EI) + \frac{\lambda^2 M_0}{2EI + c^2 EA/2}, \quad (6)$$

где M_0 – изгибающий момент в рассматриваемом сечении, c – расстояние между центрами тяжести слоев;

$$\lambda = \sqrt{\xi \gamma}; \quad (7) \quad \gamma = \frac{2}{EA} + \frac{\bar{n}^2}{2EI}; \quad (8) \quad \frac{1}{D} = \frac{1}{2EI} - \frac{1}{2EI + \bar{n}^2 EA/2}, \quad (9)$$

ξ – коэффициент жесткости шва. Интегралом уравнения (6) является выражение

$$\delta = \frac{q}{\lambda^4 D} \left[\frac{\text{ch} \lambda x}{\text{ch} \lambda \ell} + \frac{\lambda^2}{2} (\ell^2 - x^2) - 1 \right] + \frac{q}{24(2EI + w^2 EA/2)} (5\ell^2 - x^2) (\ell^2 - x^2), \quad (10)$$

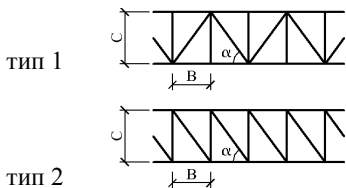
а максимальный прогиб будет определяться по формуле

$$y_0 = \frac{q}{\lambda^4 D} \left[\frac{1}{\text{ch} \lambda \ell} + \frac{\lambda^2 \ell^2}{2} - 1 \right] + \frac{5q \ell^4}{24(2EI + \bar{n}^2 EA/2)}, \quad (11)$$

С помощью зависимости (10), используя математический аппарат сопротивления материалов, можно найти все необходимые параметры напряженно-деформированного состояния составной балки в любом её сечении, если известно значение параметра ξ . К сожалению, в реальных составных конструкциях балочного типа значение этого параметра практически всегда неизвестно.

Определение коэффициента жесткости шва в двухслойных балках способом ста-

тического нагружения основано на использовании формулы (11). Суть этого способа заключается в следующем. Контролируемую балку нагружают некоторой равномерно распределенной нагрузкой q и измеряют величину её максимального прогиба y_0 . Далее подсчитывают значения изгибной жесткости EI , параметра γ по формуле (8) и $1/D$ по формуле (9). Подставляя y_0 , q , A , EI и $1/D$ в формулу (10), найдём значение параметра λ , и затем с помощью выражения (7) – значение коэффициента жёсткости шва ξ .



тип 1

тип 2

Тестирование статического способа было проведено на примере численного эксперимента – расчета стальных ферм с параллельными поясами и регулярной решеткой, нагруженных равномерно распределённой нагрузкой по верхнему поясу. Для некоторых типов решёток (рисунок 1) известны точные формулы для определения коэффициента их жесткости:

$$\text{тип 1} \quad \xi = \frac{E \cdot F_p \cdot \cos^3 \alpha}{B^2}, \quad (12)$$

$$\text{тип 2} \quad \xi = \lambda \sqrt{B^2 \cdot \left(\frac{\cos^3 \alpha}{A_p} + \frac{\tan^2 \alpha}{A_n} \right)}, \quad (13)$$

где A_p , A_n – площадь поперечного сечения соответственно раскосов и стоек.

Принятые параметры ферм: $L = 12,0$ м, $C = 1,5$ м, B – размер панели, величина переменная с шагом $0,5$ м (от $0,50$ м до $3,0$ м). Элементы верхнего и нижнего поясов выполнены из стальных труб $\varnothing 180 \times 6$ мм, раскосы и стойки – труб $\varnothing 140 \times 6$ мм. Интенсивность равномерно распределенной нагрузки $q = 3$ кН/м.

Сопоставление результатов расчета ферм, как составных балок, показало, что предложенный способ позволяет оценивать жесткость решеток рассматриваемых ферм с погрешностью $(1 \dots 4)\%$.

Для разработки вибрационного способа определения коэффициента ξ необходимо построить математическую модель, используя совместно выражения (11) и (5):

$$\frac{1}{\lambda^4 D} \left[\frac{1}{\text{ch} \lambda \ell} + \frac{\lambda^2 \ell^2}{2} - 1 \right] + \frac{5q \ell^4}{24(2EI + w^2 E \lambda / 2)} = 1,268 \frac{1}{m \omega^2}. \quad (14)$$

Полученное выражение связывает неизвестный параметр λ , в который входит коэффициент жесткости шва ξ , с основной частотой колебаний составной балки. Эту частоту в контролируемой конструкции можно определить экспериментально, возбуждая в ней свободные колебания на основной частоте. Из выражения (14) можно найти значение параметра λ , а с помощью зависимостей (8) и (7) – значение коэффициента ξ .

Тестирование этого способа также было проведено с помощью численного эксперимента на тех же фермах, что и статический способ. Основная частота колебаний ферм определялась с использованием программного комплекса «Scad». Результаты расчета и сопоставления их с точными решениями показали, что предложенный вибрационный способ определения коэффициента ξ позволяет оценивать жесткость решеток рассматриваемых ферм с погрешностью $(1,5 \dots 6)\%$.

При выполнении численного эксперимента на фермах были проведены исследования влияния геометрии решетки на их жесткость. Оказалось, что при одном и том же

расходе материала, варьируя углом наклона раскосов и знаком усилия в них (растяжение / сжатие), можно существенно повысить величину коэффициента жесткости решетки. Однако это приводит лишь к небольшим отклонениям значений w_0 и ω (в пределах (3...4)%), поскольку при большом расстоянии между верхним и нижним поясами коэффициент жесткости решетки мало влияет на общую жесткость ферм. Наиболее выгодной является схема с симметрично восходящими от опор раскосами, то есть ферм, у которых большинство элементов являются сжатыми.

Для разработки вибрационного способа определения максимального прогиба (жесткости) балок с вертикальным монтажным стыком необходимо экспериментально построить зависимость $w_0 - \omega$ в широком диапазоне изменения отношения изгибных жесткостей стыка и основного сечения балки $(EI)_c / (EI)_б$, где индекс «б» относится к характеристикам балки, а индекс «с» – к характеристикам сечения. Для этого следует изготовить несколько (8...10 штук) однотипных моделей балок из одного и того же материала с укрупнительным стыком, расположенным в заданном сечении. Одну из балок выполняют без стыков, а остальные – с уменьшающейся изгибной жесткостью стыка. Все балки необходимо испытать вибрационным и статическим способами. При вибрационных испытаниях определяют основную (или первую резонансную) частоту колебаний балок ω в ненагруженном состоянии, а при статических испытаниях – величину максимального прогиба w_0 от действия равномерно распределенной нагрузки q определенной интенсивности. По полученным данным строится аппроксимирующая функция $w_0 - \omega$ (рисунок 2). Имея эту кривую, для контролируемой балки с неизвестной изгибной жесткостью стыка определяют основную или первую резонансную частоту колебаний и с помощью этой зависимости находят величину ее максимального прогиба.

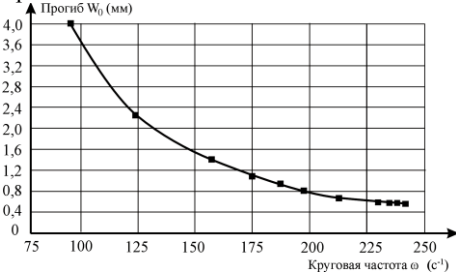


Рисунок 2 – Зависимость $w_0 - \omega$ для балки с укрупнительным стыком

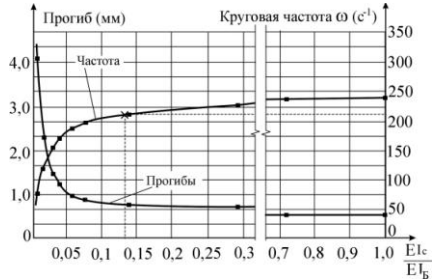


Рисунок 3 – Кривые $w_0 - (EI)_c / (EI)_б$ и $\omega - (EI)_c / (EI)_б$

Для разработки статического и вибрационного способов оценки изгибной жесткости стыкового соединения необходимо, как и в предыдущем случае, экспериментально определить значения w_0 и ω для 8...10 эталонных балок с изменяющимся отношением $(EI)_c / (EI)_б$ и построить аппроксимирующие функции

$$w_0 - (EI)_c / (EI)_б \text{ и } \omega - (EI)_c / (EI)_б$$

(рисунок 3). По этим кривым, зная значения w_0 и ω для новой контролируемой конструкции можно определить значение $(EI)_с$.

Для контроля жесткости балок из физически нелинейного материала был разработан вибрационный способ с использованием известных зависимостей:

$$w_0 = \alpha q \ell^4 / EI, \quad \omega_0 = \beta^2 \sqrt{\dot{A}_0 I / m} / \ell_4, \quad w_0 = \alpha \beta^4 \frac{q}{m} \frac{E_0}{E} \frac{1}{\omega_0^2}, \quad (15)$$

где E_0 – начальный, а E – текущий модули упругости материала; ω_0 – основная частота колебаний в ненагруженном состоянии. В отличие от закономерности (5), справедливой для балок из материала, подчиняющегося закону Гука, в третьей формуле из (15) появилось отношение начального и текущего модулей упругости E_0/E . Объединив это отношение с коэффициентом пропорциональности $\alpha\beta^4$, получим:

$$w_0 = \left(\alpha \beta^4 \frac{E_0}{E} \right) \frac{q}{m} \frac{1}{\omega_0^2} = \frac{4}{\pi} \frac{E_0}{E} \frac{q}{m} \frac{1}{\omega_0^2} = \hat{E} \frac{q}{m} \frac{1}{\omega_0^2}, \quad (16)$$

где $\hat{E} = 4/\pi \times \dot{A}_0/\dot{A}$. Если текущий модуль упругости E равен начальному E_0 , что соответствует материалу, подчиняющемуся закону Гука, то коэффициент $K = 4/\pi$, а выражение (16) приводится к закономерности (5).

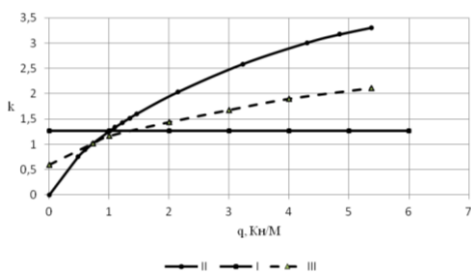


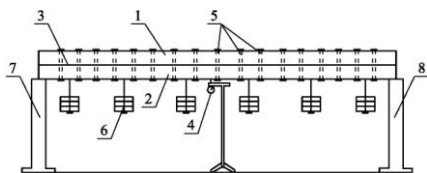
Рисунок 4 – Зависимости $K - q$ для балок из материалов, обладающих физически линейными и нелинейными свойствами

измеряют максимальный прогиб конструкции w_0 . По полученным экспериментальным данным строится графическая или аналитическая зависимость $K - q/m$ (рисунок 4).

При контроле жесткости балок с помощью предлагаемого способа по построенной функции $K - q$ определяют значение коэффициента пропорциональности, соответствующего контрольной нагрузке q_0 . В конструкции возбуждают колебания на основной или первой резонансной частоте, измеряют эту частоту и по формуле (16) находят значение максимального прогиба.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований моделей деревянных составных балок, балок с вертикальными монтажными стыками и железобетонных балок, проведенных с целью проверки работоспособности предложенных в главе 2 статических и вибрационных способов определения коэффициента жесткости горизонтального шва, приведенной изгибной жесткости балки с вертикальным стыком, изгибной жесткости стыкового соединения и максимального прогиба железобетонных балок.

Испытания проводились на специально изготовленной установке, схема которой представлена на рисунке 5. Модель закреплялась на массивных стойках. Загружение осуществлялось стальными тарированными грузами.



1 – верхний слой; 2 – нижний слой;
3 – шов; 4 – прогибомер на штативе;
5 – нагели; 6 – грузы; 7, 8 – опоры

Рисунок 5 – Схема установки

роанализатор был связан с компьютером. Возбуждение колебаний производилось с помощью механического удара молотком по балке в плоскости изгиба. Для каждой модели частота колебаний основного тона измерялась не менее 10 раз.

Для апробации предложенных способов определения жесткости горизонтального шва в составной балке была изготовлена двухслойная деревянная балка 50×50 + 50×50 мм пролётом 2,95 м. Жёсткость горизонтального шва балки изменялась путем последовательной постановки нагелей, начиная с одного до 17-и с равномерным шагом (1, 3, 5, 9 и 17 нагелей). Кроме составной балки была изготовлена из той же древесины балка цельного сечения 50×100 мм, которая служила эталоном для сопоставления получаемых результатов испытаний.

При проведении вибрационных испытаний основная частота колебаний определялась после анализа виброграмм и спектрограмм колебательного процесса в режиме свободных колебаний.

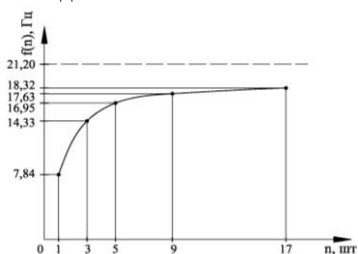
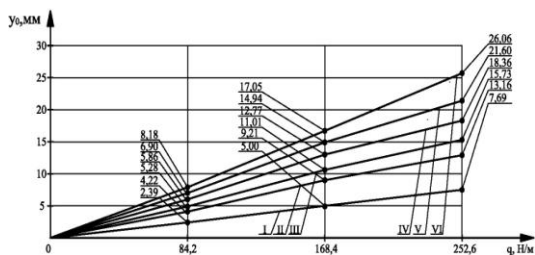


Рисунок 6 – Зависимость $f - n$



I – балка цельного сечения; II – 17 нагелей;
III – 9 нагелей; IV – 5 нагелей;
V – 3 нагеля; VI – 1 нагель

Рисунок 7 – Зависимости $y_0 - q$ при различном количестве нагелей

По данным вибрационных испытаний построен график «основная частота колебаний – количество нагелей» (рисунок 6). Анализ графика показывает, что с ростом числа нагелей основная частота колебаний составной балки растёт, асимптотически приближаясь к частоте колебаний балки цельного сечения.

По данным статических испытаний построены графики зависимостей прогибов (y_0) от нагрузки (рисунок 7). Зависимости $y_0 - q$ носят практически линейный характер.

По результатам испытаний составной балки был определен коэффициент жесткости шва балки при различном числе нагелей с помощью статического и вибрационного способов (таблицы 1 и 2).

Таблица 1 – Значения ξ модели составной балки при различном числе нагелей при использовании статического способа ($q = 168,4 \text{ Н/м}$)

Таблица 2 – Значения ξ модели составной балки при различном числе нагелей при использовании вибрационного способа

Кол-во нагелей, (шт)	y_0 , (мм)	ξ , (Н/м)	Кол-во нагелей, (шт)	f, (Гц)	ξ , (Н/м)
17	9,21	5,821	17	18,3	5,876
9	11,01	4,973	9	17,6	5,030
5	12,77	4,130	5	16,9	4,277
3	14,94	1,752	3	14,3	1,807

Примечание – В последней колонке таблицы в знаменателе приводятся отклонения результатов, полученных статическим и вибрационным способами.

Сопоставление коэффициентов жесткости шва, приведенных в таблицах 1 и 2, полученных статическим и вибрационным способами, показывает, что они различаются на (1...4)%. Ввиду более простой реализации вибрационного способа он является предпочтительнее статического.

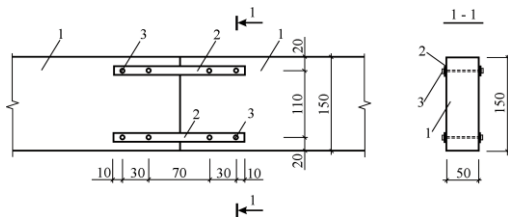


Рисунок 8 – Конструкция укрупнительного стыка модели деревянной балки

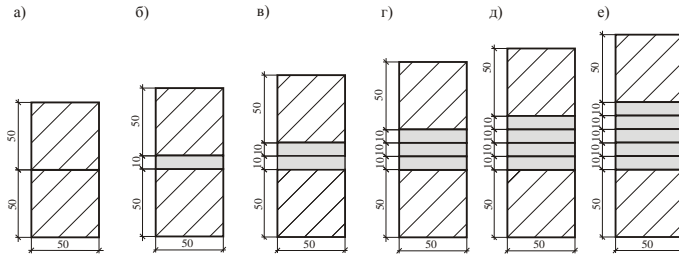
Для определения жесткости балок с укрупнительным вертикальным стыком в ее середине была изготовлена деревянная балка цельного сечения $b \times h = 50 \times 150 \text{ мм}$ и длиной 2,95 м. Для создания жесткого стыка использовались стальные полосы сечением $20 \times 1 \text{ мм}$, крепление которых осуществлялось с помощью болтового соединения (рисунок 8). Для испытания использовалась установка, представленная на рисунке 5, и та же методика. Нагружение производилось калиброванными грузами (металлическими пластинами) с эквивалентной интенсивностью $q = 82,8 \text{ Н/м}$.

Апробация предложенного способа контроля жесткости большегабаритной модели балки со стыком и изгибной жесткости стыкового соединения показала, что оба способа реализуются с погрешностью в пределах 5%.

Были проведены также исследования составных деревянных балок с переменными высотой горизонтального шва и количеством нагелей (рисунок 9).

Для эксперимента были изготовлены модели составных балок пролетом 2,95 м, состоящие из двух брусков $50 \times 50 \text{ мм}$. Высота соединительного шва регулировалась постановкой под каждый нагель прокладок переменной толщины: 10, 20, 30, 40 и 50 мм. Сначала проводились испытания двухслойной балки без прокладок.

Общий вид установки для проведения испытаний показан на рисунке 10. В процессе испытаний изменялось количество нагелей, на каждом этапе нагели расставлялись симметрично относительно середины пролета.



а) $t = 0$ мм б) $t = 10$ мм, в) $t = 20$ мм, г) $t = 30$ мм, д) $t = 40$ мм е) $t = 50$ мм

Рисунок 9 - Сечение моделей составных балок с переменной высотой шва

По результатам экспериментов построены графики изменения максимальных прогибов (рисунок 11) и основной частоты собственных колебаний балок в зависимости от величины приложенной нагрузки (рисунки 12).



Рисунок 10 – Установка для проведения испытаний составной балки с переменной жесткостью шва

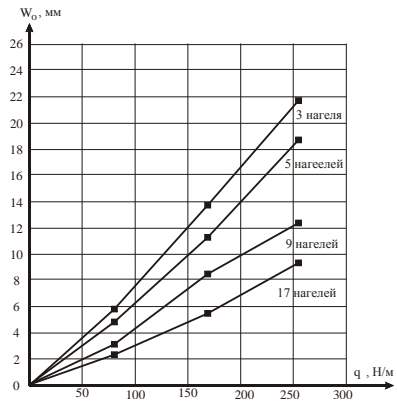


Рисунок 11 - Зависимости $w_0 - q$ от числа нагелей

Анализ графиков на рисунке 11 показывает, что зависимости $w_0 - q$ при любом количестве нагелей носят практически линейный характер, что свидетельствует о работе испытываемых моделей в упругой стадии. Тем не менее, податливость нагельных соединений проявляется в незначительном искривлении этих кривых.

На рисунке 13 представлены графики изменения величины максимального прогиба от количества нагелей, а на рисунке 14 – графики изменения величины максимального прогиба от высоты соединительного шва. Приведенные зависимости изменяются неоднозначно:

- с ростом количества нагелей максимальный прогиб составной балки при любом толщине шва уменьшается, однако при этом кривые для различного количества прокладок пересекаются;

- с ростом количества нагелей при фиксированной высоте шва максимальный прогиб составной балки уменьшается, однако при увеличении числа прокладок от 0 до 5 кривые $w_0 - m$ изменяются волнообразно, причем прогибы резко снижаются при изменении числа прокладок от 4 до 5.

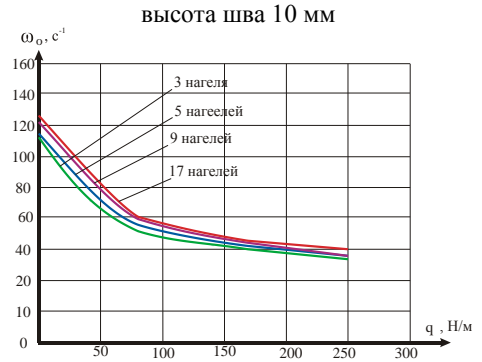
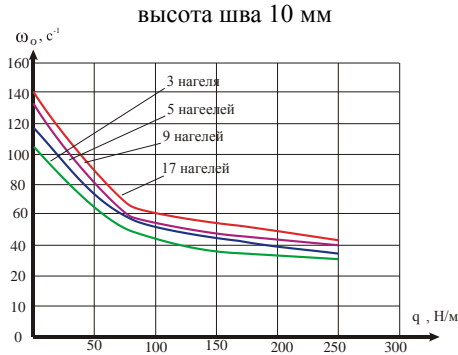


Рисунок 12 - Зависимости $\omega - q$ от интенсивности равномерно распределенной нагрузки q и числа нагелей

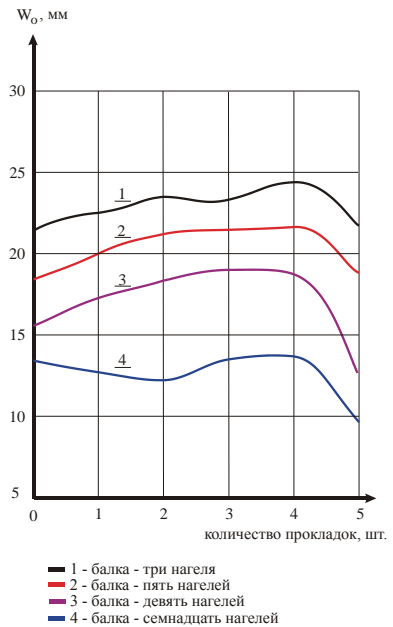
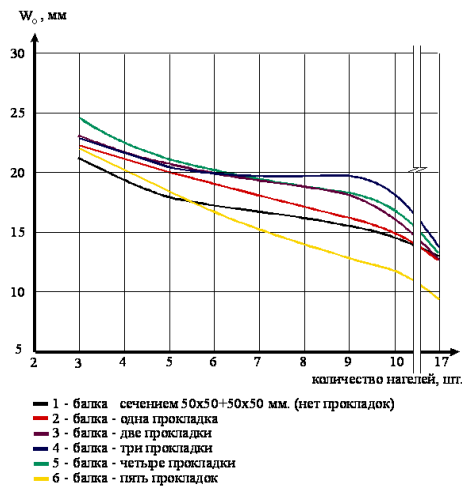


Рисунок 13 – Зависимости $w_0 - n$

Рисунок 14 – Зависимости $w_0 - m$

Такое неоднозначное поведение рассматриваемых кривых объясняется следующими обстоятельствами. С ростом числа прокладок растет момент инерции сечения составной балки, что приводит к снижению максимального прогиба при прочих одинаковых условиях. В то же время с ростом высоты соединительного шва снижается коэффициент жесткости шва составной балки, что должно приводить к увеличению её максимального прогиба. Накладываясь друг на друга, эти факторы обуславливают неоднозначное поведение контролируемого параметра.

Для апробации предложенного способа определения жесткости балок из физически нелинейного материала были изготовлены две железобетонные балки в опалубке перемычек типа 2ПБ-26-4 ($l = 2590$ мм; $b = 120$ мм; $h = 140$ мм, масса балок $m \approx 109,0$ кг). Арматурный каркас состоял из рабочей арматуры нижней зоны (арматура класса А400 диаметром $d_s = 12$ мм), конструктивной арматуры верхней зоны (проволочной арматуры В500 $d_s = 5$ мм) и поперечных связей из арматуры В500 $d_s = 4$ мм. Для замоноличивания использовался бетон с начальным модулем упругости $E_b = 27,5 \cdot 10^3$ МПа. Балки изготавливались в заводских условиях под строгим контролем всех технологических операций согласно ГОСТ Р 53231-2008 (подбор состава бетона и его укладка в опалубку, контроль режимов формования и термообработки, соблюдение геометрических размеров, армирования и др.). Одна балка готовилась по стандартной технологии, а вторая отличалась тем, что приготовленная бетонная смесь была жестче за счет снижения в ней объема воды на 5%, и уплотнялась бетонная смесь для этой балки при укладке в опалубку дольше.

Испытания железобетонных балок проводились на специальном стенде, включавшем набор стандартного оборудования, приборов и средств измерений.

В контролируемой балке измерялась основная частота колебаний в ненагруженном состоянии, а затем осуществлялось статическое нагружение ступенчато возрастающей равномерно распределенной нагрузкой в виде силикатного кирпича массой $\approx 5,2$ кг. Каждая ступень нагрузки согласно требованиям ГОСТ 8829–94 не превышала 10 % от контрольной разрушающей нагрузки.

При динамическом испытании балки в ненагруженном состоянии в режиме свободных колебаний была получена основная частота колебаний $f = 29,9$ Гц ($\omega = 2\pi f = 187,87$ с⁻¹). По результатам статических и динамических испытаний построена аппроксимирующая функция (рисунок 4, сплошная линия)

$$\hat{E} = \sqrt{a + bq + cq^2 + dq^3}, \quad (17)$$

где $a = -0,2496$, $b = 1,5591$, $c = 0,3130$, $d = -0,04021$. Вид этой функции был выбран по результатам наилучшего среднеквадратичного приближения к экспериментальным данным. Графический анализ рисунка 4 показал, что кривая II является монотонно возрастающей без каких-либо заметных переломов в момент появления первых нормальных трещин и вплоть до разрушения балок.

Таким образом, для железобетонных балок рассмотренного типа максимальный прогиб от действия равномерно распределенной нагрузки будет определяться по формуле

$$w_0 = \sqrt{-0,2496 + 1,559 \text{ } \mathfrak{q} + 0,3130 \mathfrak{q}^2 - 0,0402 \mathfrak{q}^3} \frac{\mathfrak{q}}{m} \frac{1}{\omega_0^2}. \quad (18)$$

Оценка максимально возможной абсолютной погрешность Δw_0 при определении максимального прогиба экспериментальной балки проводилась по методу максимума-минимума. Значения абсолютных погрешностей были приняты по существующим

нормативным документам и по результатам проведенных экспериментальных исследований. Относительная погрешность для испытываемой балки в проведенном эксперименте оказалось равной 6,46%.

При испытании второй балки была определена основная частота колебаний $f = 32,47$ Гц ($\omega = 204,015$ с⁻¹). Далее балка была испытана тремя ступенями статически приложенной равномерно распределенной нагрузки: $q_1 = 0,488$ кН/м, $q_2 = 1,466$ кН/м и $q_3 = 3,228$ кН/м. Первая нагрузка соответствовала работе балки при малых упругопластических деформациях, вторая – приблизительно моменту появления первых поперечных трещин, третья – работе балки при больших упругопластических деформациях. Для этих нагрузок экспериментально были определены прогибы: $(w_0)_1 = 0,22$ мм, $(w_0)_2 = 1,28$ мм, $(w_0)_3 = 4,60$ мм. По формуле (18) для заданных нагрузок и найденной экспериментально основной частоте колебаний были подсчитаны значения максимальных прогибов $(w_0)_1 = 0,212$ мм, $(w_0)_2 = 1,345$ мм, $(w_0)_3 = 4,768$ мм. Эти результаты отличаются от полученных экспериментально соответственно на 3,64%, 5,07% и 3,6%.

Таким образом, предложенный способ вибрационного контроля жесткости балок позволил расширить его технологические возможности и распространить на балки, материал которых обладает физически нелинейными свойствами, за счет построения экспериментальной кривой $K(q)$ по результатам динамических и статических испытаний эталонной конструкции.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что в диссертации получили существенное развитие экспериментально-теоретические способы определения жесткостных характеристик составных балок и балок, изготовленных из физически нелинейного материала, с использованием методов статического и вибрационного нагружения конструкций. При этом получены следующие основные научные и практические результаты.

1 Приведено теоретическое обоснование возможности применения вибрационных методов для диагностики состояния составных балок и балок, изготовленных из материала, обладающего физически нелинейными свойствами;

2 Разработаны статический и вибрационный способы контроля жесткости горизонтальных швов составных балок, жесткости балок с укрупнительными монтажными стыками, изгибной жесткости стыковых соединений и методики практической реализации этих способов;

3 Выполнено тестирование статического и вибрационного способов определения жесткости горизонтальных швов составных балок с помощью численных экспериментов на примере определения жесткости решётки металлических ферм с параллельными поясами, имеющем «точное» теоретическое решение. Результаты численного эксперимента и теоретического решения имеют погрешность 5,5%.

4 Разработан вибрационный способ и методика контроля жесткости балок, изготовленных из материала, обладающего физически нелинейными свойствами.

5 Проведены экспериментальные исследования большемерных моделей:

– деревянных составных балок и балок с укрупнительными стыками для отработки методик реализации предложенных способов контроля жесткостных параметров таких конструкций;

– деревянных составных балок с переменной высотой соединительного шва и переменной числом нагелей для выявления зависимостей «нагрузка – деформации»; выявленные физические эффекты легли в основу рекомендаций по конструированию составных балок;

– железобетонных перемычек с использованием вибрационного способа контроля жесткости; результаты экспериментов с удовлетворительной точностью (6,0%) подтвердили правильность теоретических предпосылок.

Обработка результатов измерений при проведении экспериментальных исследований велась методами математической статистики.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1 *Калашникова, О.В.* Экспериментальные исследования стальных ферм с параллельными поясами на статические и вибрационные воздействия. [Текст] / Р.В. Алдушкин, В.И. Коробко, О.В. Калашникова // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009, №2. – С. 39-43 (0,25 / 0,10 п.л. автора).

2 *Калашникова, О.В.* Вибрационный метод оценки жесткости горизонтального шва составных балок [Текст] / К.В. Подмастерьев, О.В. Калашникова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2011. – № 2. – С. 147-150 (0,20 / 0,10 п.л. автора).

3 *Калашникова, О.В.* Влияние геометрии решетки ферм с параллельными поясами на её жесткость [Текст] / О.В. Калашникова // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 4. – С. 41-47 (0,30 / 0,30 п.л. автора).

4 *Калашникова, О.В.* Экспериментальные исследования двухслойных деревянных балок с переменной жесткостью и толщиной соединительного шва [Текст] / П.А. Гвозков, О.В. Калашникова и др. // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 4. – С. 30-34 (0,20 / 0,05 п.л. автора).

5 *Калашникова, О.В.* Контроль жесткости конструкций балочного типа, изготовленных из физически нелинейного материала [Текст] / В.И. Колчунов, О.В. Калашникова // Строительство и реконструкция. – 2013. – № 6. – С. 21-27 (0,40 / 0,20 п.л. автора).

Публикации в других изданиях

6 *Калашникова, О.В.* Экспериментальные методы определения жесткости горизонтального шва в двухслойных балках. [Текст] / К.В. Подмастерьев, В.И. Коробко, О.В. Калашникова // Материалы международной научной конференции «Актуальные проблемы исследований по теории сооружений». Москва: ЦНИИСК. – 2009. – С. 175-183 (0,4 / 0,2, п.л. автора).

7 *Калашникова, О.В.* Способ контроля жесткости конструкций балочного типа, изготовленных из физически нелинейного материала [Текст] / О.В. Калашникова // Проблемы оптимального проектирования сооружений: доклады 2-й Всероссийской конференции. – Новосибирск, НГАСУ (Сибстрин). – 2014. – С. 183-189 (0,20 / 0,20 п.л. автора).

Патенты

8 Пат. № 2306547 Российская Федерация. МПК G01N 3/32. Способ определения изгибной жесткости крупнительного стыка однопролетных составных балок постоянного сечения (варианты) [Текст] / В.И. Коробко, А.В. Турков, П.А. Гвозков, О.В. Бояркина; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет». – № 2006109979/28; заявлен 28.03.2006; опубл. 20.09.2007, Бюл. № 26. – 8 с.

9 Пат. № 2308699 Российская Федерация. МПК G01N 3/32. Способ определения максимального прогиба однопролетных составных деревянных балок с укрупнительными стыками» [Текст] / В.И. Коробко, А.В. Турков, П.А. Гвозков, О.В. Бояркина; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет». - № 2006110024/28; заявлен 28.03.2006; опубл. 20.10.2007, Бюл. № 29. – 6 с.

10 Пат. № 2408864 Российская Федерация. МПК G01N 3/32. Способ определения жесткости горизонтального шва в двухслойных конструкциях балочного типа [Текст] / В.И. Коробко, А.В. Коробко, О.В. Бояркина; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет». - № 2009101870/28; заявлен 21.01.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1. – 8 с.

11 Пат. № 2406075 Российская Федерация. МПК G01N 3/32. Способ определения жесткости горизонтального шва в двухслойных конструкциях балочного типа [Текст] / В.И. Коробко, Р.В. Алдушкин, О.В. Калашикова; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет». - № 200913687/28; заявлен 11.08.2009; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34. – 10 с.

12 Пат. № 2538361 Российская Федерация. МПК G01N 3/32. Способ контроля жесткости однопролетных балок из физически нелинейного материала [Текст] / В.И. Колчунов, О.В. Калашикова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – учебно-научно-производственный комплекс». - № 2013123496/28; заявлен 22.05.2013; опубл. 27.11.2014, Бюл. № 33. – 9 с.

Подписано к печати 03.03.2015 г. Формат 60x84/16
Объем 1,0 усл. п.л., Тираж 100 экз. Заказ № 1245

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29.