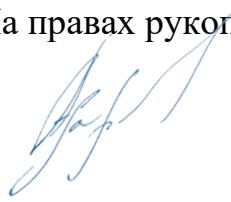


На правах рукописи



Азаров Артур Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГО-АКУСТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ
ПРИ УДАРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ СТЕРЖНЯ**

Специальность 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научные
руководители:

Попов Александр Леонидович
д.ф.-м.н., профессор

Ченцов Александр Викторович

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории механики новых материалов и технологий ФГБУН Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, доцент кафедры «Сопротивление материалов» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Павлов Игорь Сергеевич

д.ф.-м.н., доцент, заместитель директора по научной работе Института проблем машиностроения РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Курбатов Алексей Сергеевич

к.т.н., старший научный сотрудник ФГБУН Института прикладной механики Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Захита диссертации состоится 11 февраля 2026 г. в 13⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.327.07 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте:

https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=186069

Автореферат разослан «___» 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сердюк Д.О.

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации состоит в разработке новых, более оперативных при меньших трудозатратах методов диагностики усилий и качества соединений в стержнях элементов креплений кровли шахт, мостов, сетчатых оболочек и других металлических конструкций по излучаемому акустическому полю послеударных колебаний, их теоретическом обосновании и экспериментальной верификации, а также в исследовании встречающихся, но малоизученных эффектов при колебаниях и звукоизлучении упругих тел. Практическая полезность данного исследования состоит в возможности существенного сокращения длины высвобождаемой части бетонной одежды преднапряжённой арматуры мостов и других строительных конструкций при проверке сохранения в них проектных значений продольных усилий без уменьшения точности получаемых результатов.

Степень разработанности исследования. Исследованиями в области соударения упругих тел занимались Бидерман В.Л., Пановко Я.Г., Товстик П.Е., Беляев А.К., Морозов Н.Ф., Зегжда С.А. и др. В частности, динамика при продольном ударе телом по стержню рассматривалась в ряде работ Товстика П.Е., Беляева А.К., Морозова Н.Ф., в которых основное внимание было уделено определению времени соударения, контактной силы, максимальной амплитуде поперечных колебаний при параметрическом резонансе, динамической потери устойчивости. Обобщая их результаты, первая часть настоящей работы посвящена исследованию послеударных продольных колебаний стержня и особенностей распределения амплитудно-частотных зависимостей перемещений и акустического давления выходного конца стержня.

Исследованиями в области диагностики усилий и дефектов занимались Акуленко Л.Д., Нестеров Л.Д., Шифрин Е.И., Попов А.Л., Челобеев Д.А., Козинцев В.М., Устинов К.Б., Ахтямов А.М., Крутиков О.В., Гершуни И.Ш, Реста, Гентилини, Бриколи Бати и др. В их работах представлены методы идентификации различных дефектов и их влияние на собственные частоты в стержне, разработке численных алгоритмов. В последнее время в литературе также по-

является все больше исследований, посвященных развитию динамических подходов к определению продольных усилий в стяжных стержнях; некоторые из подходов требуют определения модальных форм; для этого, в частности, используются дополнительные массы, сравнение с результатами МКЭ и оптимизация на основе генетических алгоритмов. Актуальным вопросом является влияние граничных условий на концах стержней на динамические характеристики, в том числе, - на частоты свободных колебаний. Таким образом, следующая часть настоящей работы стала продолжением работ по диагностике усилий и жёсткости соединений по более общей модели, направленной на сокращение свободной длины.

Целями диссертационной работы являются:

1. Исследование широкого круга эффектов, встречающихся при колебании и звукоизлучении упругих тел, до сих пор неизученных или малоизученных, таких как, - сдвиг с первой частоты амплитудного максимума акустического давления послеударных продольных колебаний стержня, колебания в окрестности критической частоты Тимошенко, влияния растягивающей силы и дефектов закрепления на собственные частоты послеударных поперечных колебаний стержней, в том числе на положение критической частоты Тимошенко, эффект «разбегания» собственных частот при растяжении стержня в области слабой нелинейности.

2. Разработка нового усовершенствованного частотного метода оценки растягивающей силы в стержневых элементах и коэффициентов узловых жесткостей по нескольким характерным собственным частотам при использовании стержневой модели Тимошенко пригодного для применения на практике.

Объектом исследования являются послеударные упругие колебания стержней.

Для достижения поставленных целей были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка методики и стенда для экспериментального изучения особенностей распределения спектра послеударных продольных колебаний стерж-

ня. Определение времени соударения и зависимости контактной силы от времени из решения задачи о продольных колебаниях стержня при наличии трения, коэффициент которого определяется по совокупности многочастотных затухающих колебаний стержня после ударного воздействия. Определение и анализ амплитудно-частотных зависимостей перемещений и скоростей концов стержня, их связь с акустическим давлением, излучаемым торцами при разных соотношениях между массой ударника и стержня, а также - различных периодах изменяемости напряженно-деформированного состояния стержня.

2. Разработка усовершенствованной методики динамической оценки продольного усилия и коэффициентов угловой жёсткости заделки неидеально закреплённого стержня по спектру его изгибных колебаний путём сравнения экспериментально зарегистрированных частот колебаний с теоретическим спектром частот, сгенерированных на основе аналитической модели балки Тимошенко.

3. Разработка алгоритма и программы для ЭВМ оптимального поиска значений продольного усилия и жёсткости заделки стержня по спектру экспериментально зарегистрированных частот.

4. Проведение экспериментальных исследований на модельных образцах. Определение минимального количества регистрируемых собственных частот колебаний, необходимого для динамической оценки продольного усилия с приемлемой погрешностью.

5. Теоретическое и экспериментальное исследование возможности разнонаправленного изменения собственных частот изгибных колебаний при растяжении стержня в области слабо нелинейной зависимости напряжения от деформации.

6. Уточнение значений механических параметров балки, таких как скорость звука и коэффициент Пуассона, исходя из сопоставления спектров экспериментальных и теоретических частот продольных и поперечных колебаний балки со специально подобранными параметрами, для которых критическая частота по ТБТ (Теория изгиба балок Тимошенко) находится внутри акустическо-

го спектра. Экспериментальная верификация парных частот в сверхкритической области, предсказанных ТБТ.

7. Разработка новой методики и стенда для синхронного съёма спектр-интерферометрической и виброакустической информации с вибрирующих объектов (тестовых пластин). Проведение тестирования методики синхронного съёма виброакустической и спектр-интерферометрической информации для диагностики дефектов и степени их залечивания в закреплениях границ тестовых пластин в форме эллипса и кардиоды.

Научная новизна.

В работе представлены следующие **новые** результаты:

1. Исследованы спектры акустического давления послеударных продольных колебаний при наличии трения, коэффициент которого определяется по совокупности многочастотных затухающих колебаний стержня после ударного воздействия в зависимости от соотношения между массой ударника и стержня, и поперечных колебаний при различной величине статического растяжения и условий закрепления реальных стержневых систем.
2. Разработана методика и стенд для экспериментального изучения спектра акустического давления послеударных продольных колебаний стержня. Выявлен и изучен эффект сдвига по частоте амплитудного максимума в спектре акустического давления при послеударных продольных колебаниях стержня. Показано, что величина этого сдвига может зависеть от параметров, определяющих период осцилляции, а именно от среды распространения звука, расстояния до приёмника и от отношения масс ударника и стержня. При ударе по стержню ударником большей массы амплитуды скорости выходного конца на разных частотах отличаются друг от друга значительно осциллирующего эффекта функции; таким образом, максимум акустического давления соответствует частоте основного тона. При стремлении отношения масс соударяющейся пары к нулю спектр меняется и диктующим максимум оказывается осциллирующий эффект.

3. Разработан новый усовершенствованный частотный метод оценки усилий и узловых жесткостей в стержнях. Выполнены исследования по экспериментальной верификации усовершенствованного частотного метода определения растягивающих усилий и жесткостей закрепления стержневых элементов строительных конструкций на основе модели колебаний балки Тимошенко и разработанных алгоритма и программы для ЭВМ оптимального поиска значений продольного усилия и жёсткости заделки стержня по спектру зарегистрированных частот. Предложенные расчетные модели и методики способны обеспечить существенное снижение трудоемкости проведения таких испытаний.
4. Впервые выявлена и объяснена особенность разнонаправленного изменения собственных частот изгибных колебаний при растяжении стержня в области слабо нелинейной зависимости напряжения от деформации. Показана необходимость учета изменения начального модуля упругости в процессе деформирования при частотной диагностике усилий в стержневых элементах. Так, при изменении начального значения модуля упругости на 3% при статическом растяжении для рассматриваемого тестового образца 3-я собственная частота поперечных колебаний оказывается ниже 1-ой собственной частоты при начальном модуле упругости в отсутствии статического растяжения.
5. Проведен теоретический и экспериментальный анализ спектров частот балки Тимошенко в окрестности критической частоты. При рассмотрении поперечных колебаний используемая методика по определению физических величин на примере скорости звука приводит к согласованию теоретических и экспериментальных наборов частот. Экспериментально верифицированы близкие пары частот за частотой Тимошенко.
6. Создан и протестирован оптико-акустический стенд и новая методика синхронного съёма виброакустической и спекл-интерферометрической информации, пригодная для диагностики дефектов закрепления тонкостенных элементов конструкций и анализа степени их устранения. Про-

веденное тестирование показало преимущества объединения виброакустической и спекл-интерферометрической диагностики дефектов на примере диагностики дефектов в закреплении границы тестовой пластины. Важный признак такого дефекта - снижение резонансной частоты колебаний - является лишь интегральным признаком, по которому невозможно определить конкретное место расположения дефекта на контуре заделки. В то же время по конфигурации полос спекл-интерферограммы, полученной на сниженной резонансной частоте колебаний пластины, однозначно определяется место расположения дефекта заделки контура пластины.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что ее результаты направлены на решение новых задач акустоупругости и на совершенствование широко используемого в технической диагностике частотного метода контроля сил натяжения стержневых элементов строительных конструкций, в частности преднапряжённой арматуры. Результаты выполнения настоящей работы могут быть использованы для обеспечения возможности существенного сокращения материальных, временных и трудовых затрат на диагностику сил натяжения в преднапряжённой арматуре мостов и других строительных конструкций в процессе проверки сохранения в них проектных значений продольных усилий путём использования более совершенных моделей колебаний элементов таких конструкций и оптимизации алгоритма поиска значений продольных усилий и жесткостей заделок арматурных стержней и канатов по спектру зарегистрированных собственных частот после ударных воздействий при значительно меньшей, чем практикуемая, высвобождении длины бетонной одежды без уменьшения точности получаемых результатов.

Методы исследования. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с применением современных приборов и установок. В работе использованы известные методы для решения задач динамики твердого тела. При решении задач, представленных в диссертации, применялись различные математические и вычислительные методы: решение смешанной краевой

задачи методом Фурье, интегральное преобразование Лапласа, теорема Бореля об умножении изображений, методы глобальной и локальной оптимизации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Решение задачи об определении спектра акустического давления послеударных продольных колебаний стержня;
2. Методика динамической оценки продольного усилия и коэффициентов угловой жёсткости заделки неидеально закреплённого стержня по спектру его изгибных колебаний;
3. Авторский программный код (комплекс), реализующий разработанные алгоритмы для определения коэффициентов жесткости и внутренних силовых факторов с использованием локально-стохастического метода «*basin-hopping*» на основе минимизации Монте-Карло функции ошибок по разности теоретических и экспериментальных частот;
4. Теоретический и экспериментальный анализ спектра частот балки Тимошенко в окрестности критической частоты, в том числе, - влияния растягивающей силы на положение критической частоты. Методика по определению физических величин на примере скорости звука приводит к согласованию теоретических и экспериментальных наборов частот. Экспериментально верифицированы близкие пары частот за частотой Тимошенко;
5. Обнаружение и объяснение эффекта разнонаправленного изменения собственных частот поперечных колебаний при растяжении стержня в области слабой нелинейности при котором возникает рост низких частот и уменьшении высоких частот с ростом порядкового номера частоты;
6. Создание оптико-акустического стенда и методики синхронного съёма виброакустической и спектр-интерферометрической информации для диагностики дефектов закрепления тонкостенных элементов конструкций и степени их устранения.

Достоверность и обоснованность результатов исследований, проведенных соискателем ученой степени обеспечена использованием классических математических методов механики деформируемого твёрдого тела и математического анализа, применением апробированных методов оптимизации, сравнением с результатами экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных профильных научных конференциях и семинарах:

1. XLIII международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения», Москва, Россия, 20-23 апреля 2021;
2. Дни студенческой науки 01-05 марта, 2021;
3. Дни студенческой науки 28 февраля-04 марта, 2022;
4. Международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики" 2021, 12 - 14 декабря 2022;
5. XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике 21 - 25 августа, 2023;
6. Международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики" 2021, 4 – 6 декабря 2023;
7. Дни студенческой науки 26 февраля–01 марта, 2024;

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в работах [1-10], изданных в периодических научных изданиях, сборниках материалов и тезисах докладов международных и всероссийских конференций. Четыре статьи из списка публикаций напечатаны в журналах, входящих в перечень ВАК РФ и/или индексируемых в Web of Science, Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [11].

Личный вклад автора состоит в построении аналитических решений об определении спектра перемещения и акустического давления послеударных продольных колебаний конца стержня, реализации метода динамической оцен-

ки усилий и узловых жесткостей соединений стержневых элементов, конкретизации и разработке алгоритма определения усилий и узловых жесткостей с использованием локально-стохастического метода по разности теоретических и экспериментальных частот, анализе и обработке экспериментальных данных, экспериментальной верификации на модельных образцах, участии в создании оптико-акустического стенда и методики синхронного съёма вибраакустической и спекл-интерферометрической информации для диагностики дефектов закрепления тонкостенных элементов конструкций и степени их устранения. Анализ и обобщение полученных результатов. Постановка задач и анализ полученных результатов проводились совместно с научным руководителем - А.Л. Поповым.

В работе [1] участвовал в создании оптико-акустического стенда и методики синхронного съёма вибраакустической и спекл-интерферометрической информации для диагностики дефектов. В работе [2] автором показан эффект разнонаправленного изменения собственных частот изгибных колебаний при растяжении стержня в области слабой нелинейности. В работе [3] автором получено теоретическое и экспериментальное объяснение эффекта сдвига амплитудного максимума спектра акустического давления торца стержня по частоте при послеударных продольных колебаниях. В работе [4] автором предложены расчётные модели и методики, направленные на совершенствование частотного метода диагностики растягивающих усилий и узловых жесткостей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, Заключения, списка литературы и 2 приложений. Текст диссертации составляет 113 страниц, включая 37 рисунков и 5 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 113 наименований.

Содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы, сформулированы ее цели, задачи и методы их реализации, обоснована актуальность темы исследования. Приводятся достижения предшественников и новизна полученных и выносимых на защиту результатов, их теоретическая и практическая значимость.

В первой главе рассмотрены теоретические модели, возбуждаемых ударом, колебаний стержней при раздельном и совместном учете волнового движения и местной деформации в соударяющихся телах. Показана иерархия моделей, описывающих продольные и поперечные колебания стержней.

Во второй главе основное внимание уделено согласованию теоретических моделей удара и послеударных продольных колебаний стержня с экспериментальными данными. Получено решение задачи о продольных колебаниях стержня со свободными концами при наличии трения, коэффициент которого определяется по совокупности много частотных затухающих колебаний стержня после ударного воздействия. Определены и проанализированы амплитудно-частотные зависимости перемещений и скоростей концов стержня, их связь с акустическим давлением, излучаемым торцами при разных соотношениях между массой ударника и стержня.

Рассматривается продольный удар по упругому стержню 1 длиной l , массы M с двумя свободными концами (Рисунок 1). В начальный момент времени по правому концу воздействует с начальной скоростью v_0 шарик или молоток 2 массой m , что приводит к возникновению контактного взаимодействия. Как и в большинстве других исследований, ударник рассматривается как абсолютно твердое тело.

Колебания стержня по модели Сен-Венана с учетом диссипативных сил и излучаемое акустическое давление описываются уравнениями:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - 2\gamma \frac{\partial u}{\partial t}, \quad c^2 = \frac{E}{\rho} \\ \Delta p + k^2 p = 0, \quad p = Z \frac{\partial u}{\partial t}$$

где $u(x, t)$ – функция продольного перемещения стержня, c – скорость звука, ρ – плотность стержня, E – модуль упругости, γ – коэффициент, учитывающий трение, p – акустическое давление, Z – акустический импеданс среды.

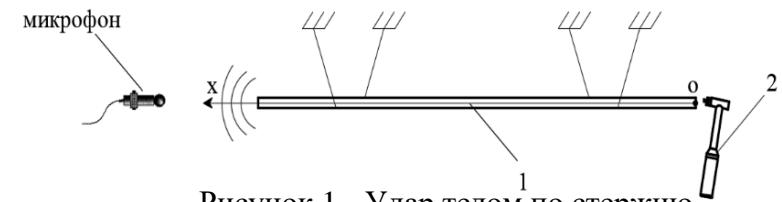


Рисунок 1 – Удар телом по стержню

Условие контакта без учета местного смятия в зоне контакта:

$$v_0 t - \frac{1}{m} \int_0^t P(t_1) (t - t_1) dt_1 = \int_0^t P(t_1) Y(t - t_1) dt_1$$

где v_0 – скорость ударника в момент удара по стержню, m – масса ударника, Y – реакция системы на единичный импульс, $P(t_1)$ – контактная сила.

С учетом найденного выражения для ударной силы, получим, что функция перемещения для стержня со свободными концами:

$$u(x, t) = \int_0^t P(t_1) Y(t - t_1) dt_1 = \frac{2cv_0}{l} \int_0^t e^{-\frac{Mct_1}{ml}} e^{-\gamma(t-t_1)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \omega_n(t - t_1)}{\omega_n} \cos \lambda_n x dt_1$$

Фурье-спектр перемещения $u(x, t)$, являющегося сверткой двух функций $P(t)$ и $Y(t)$, с учетом $u(x, t)=0$ при $t<0$ является Лапласовым изображением:

$$U(x, \omega) = \int_0^{+\infty} u(x, t) e^{-i\omega t} dt = \frac{2cv_0}{l} \int_0^{+\infty} e^{-i\omega t} \int_0^t e^{-\frac{Mct_1}{ml}} e^{-\gamma(t-t_1)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \omega_n(t - t_1)}{\omega_n} \cos \lambda_n x dt_1 dt$$

Согласно теореме свертки двух оригиналов, Фурье-спектр перемещений входного и выходного концов имеет вид произведения изображений; таким образом, с учетом преобразований, зависимость амплитуды колебаний от частоты принимает вид:

$$A(\omega) = \frac{2cv_0}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{((\omega - \omega_n)^2 + \gamma^2)((\omega + \omega_n)^2 + \gamma^2)\left(\omega^2 + \frac{M^2 c^2}{m^2 l^2}\right)}}$$

Фурье-спектр скорости выходного торца стержня при $x=0$ с учетом $v(t)=0$ при $t<0$ является Лапласовым изображением:

$$V(\omega) = \int_0^{+\infty} v(t) e^{-i\omega t} dt = \frac{2\omega cv_0 i}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(\omega_n^2 - \omega^2 + \gamma^2 + 2\gamma\omega i)\left(\omega i + \frac{Mc}{ml}\right)}$$

Для определения акустического давления плоского круглого торца стержня, пульсирующего в обе стороны с амплитудами, зависящими от частот, используется потенциал скоростей:

$$\varphi(\omega) = \frac{|V(\omega)|}{2\pi} \iint_S \frac{e^{-i\frac{\omega}{c_1} r}}{r} dS \quad (1)$$

где c_1 – скорость звука в акустическом пространстве, r – расстояние от элемента излучающей поверхности dS до точки измерения, $|V(\omega)|$ – амплитуда скорости излучающей поверхности.

Для направления вдоль оси стержня интеграл (1) имеет явный вид. В этом случае амплитуда акустического давления на расстоянии l_0 в зависимости от частоты с учетом связи с потенциалом скоростей представляется выражением:

$$|p(\omega)| = \rho_1 c_1 |V(\omega)| |f(\omega)|, \quad |f(\omega)| = 2 \left| \sin \left(\frac{\omega l_0 - \omega \sqrt{l_0^2 + r_0^2}}{2c_1} \right) \right|$$

где r_0 – радиус стержня, ρ_1 – плотность акустической среды.

На рисунке 2 показаны распределения амплитуд в спектре акустического давления при двух вариантах отношения m/M .

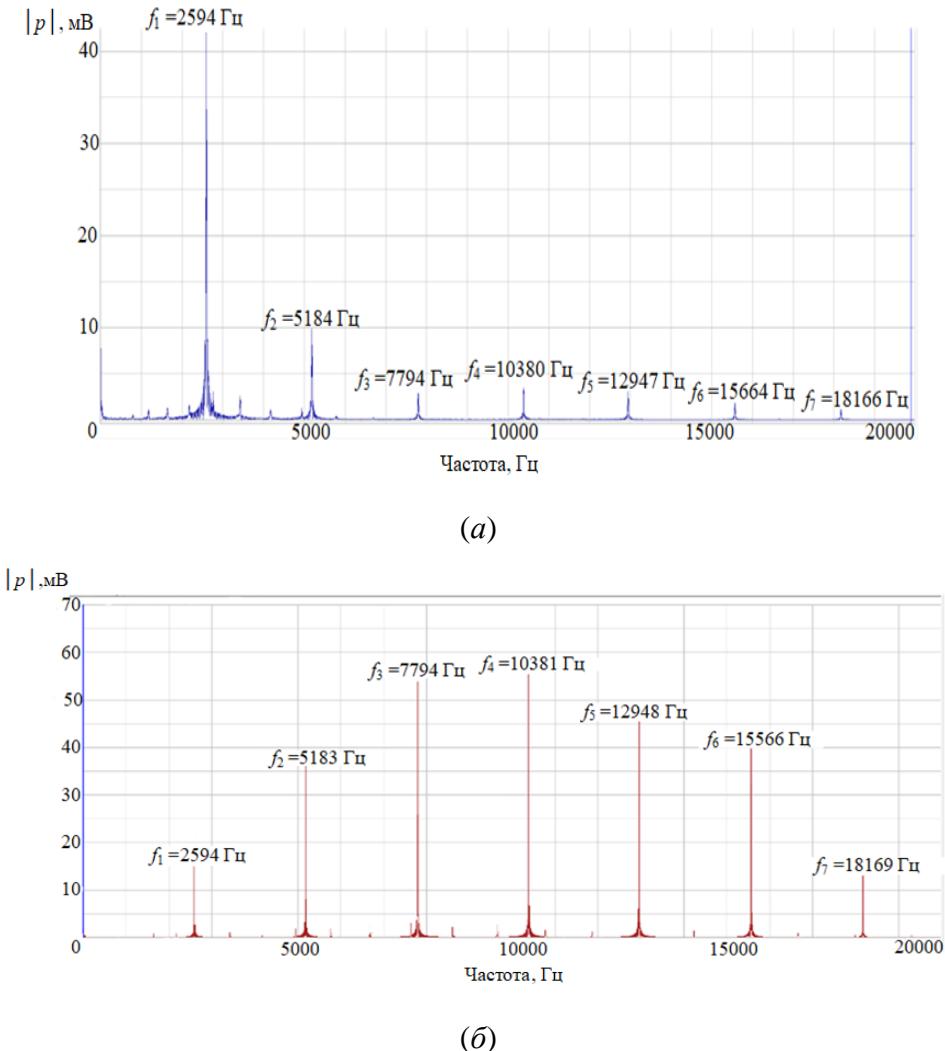


Рисунок 2 – Экспериментальные спектры акустического давления в послеударных колебаниях при отношениях масс $m/M = 0.41$ (а) и $m/M = 0.014$ (б)

На рисунке 2(б) наблюдается сдвиг амплитудного максимума спектра акустического давления с частоты основного тона и соответствует 4-му обертону. Показано, что существование данного эффекта зависит от параметров, определяющих период осцилляции и отношения масс ударника и стержня.

В третьей главе рассматривается методика динамической оценки продольного усилия и коэффициентов угловой жёсткости заделки неидеально закреплённого стержня по спектру его изгибных колебаний путём сравнения экспериментально зарегистрированных частот колебаний с теоретическим спектром частот, сгенерированных на основе аналитической модели балки Тимошенко. Для согласования результатов по теоретической модели с набором экспериментальных частот используется сочетание известных алгоритмов оптимизации, оценка производится по минимуму функции ошибок, называемой квадратичной функцией потерь:

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_i^N (f_{\text{exp},i} - f_{\text{th},i})^2$$

где $f_{\text{exp},i}$ – i-ая экспериментальная, а $f_{\text{th},i}$ - i-ая теоретическая частоты, а N ограничено снизу числом искомых неизвестных при решении обратной задачи.

Предметом экспериментального изучения были также послеударные поперечные колебания стальной полосы 1 (Рисунок 3а), закрепленной в разрывной машине МИМ.2 двумя механическими клиновыми захватами 2, имитирующими упругие заделки, при малом и значительном статическом растяжении силами, равными 0,15 и 1,97 кН. Длина полосы между захватами $l=0,585\text{ м}$, поперечное сечение: 2 на 48 мм.

Также экспериментально изучался спектр поперечных колебаний консольного дюралюминиевого цилиндрического стержня длиной $l=0,745\text{ м}$ с диаметром $d=24.7\text{ мм}$ при различной величине затяжки резьбовой шпильки на конце стержня 1 (Рисунок 3б,в). Для статического измерения угловой жесткости заделки консоли при помощи датчика перемещения 3 типа ЛИР-14 определялся прогиб её конца под действием гири 4 массой 200 г.

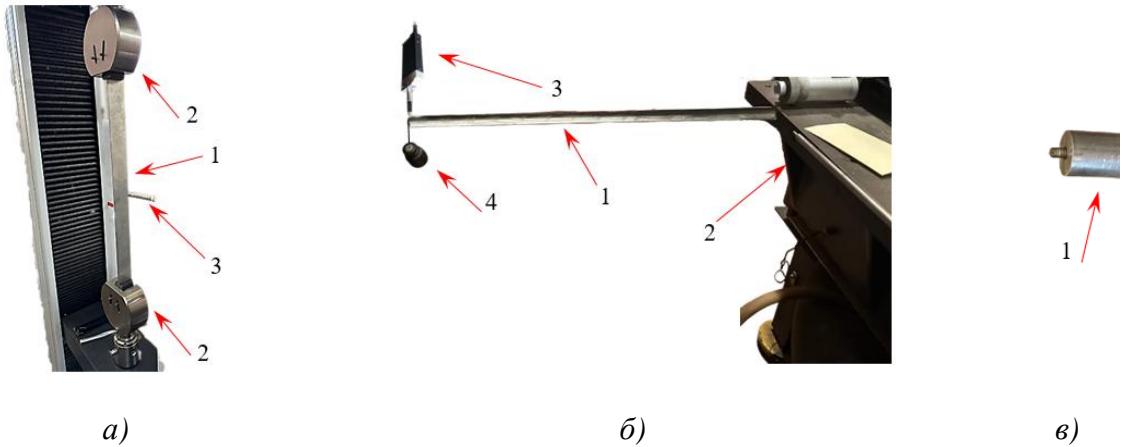


Рисунок 3 – Экспериментальная установка для статического и динамического определения продольной силы (а) и угловой жёсткости крепления (б) образцов; резьбовая шпилька для ввинчивания консоли в массивный стол (в)

На рисунках 4, 5 приведены фрагменты спектров колебаний экспериментальных образцов в акустическом диапазоне при различных условиях.

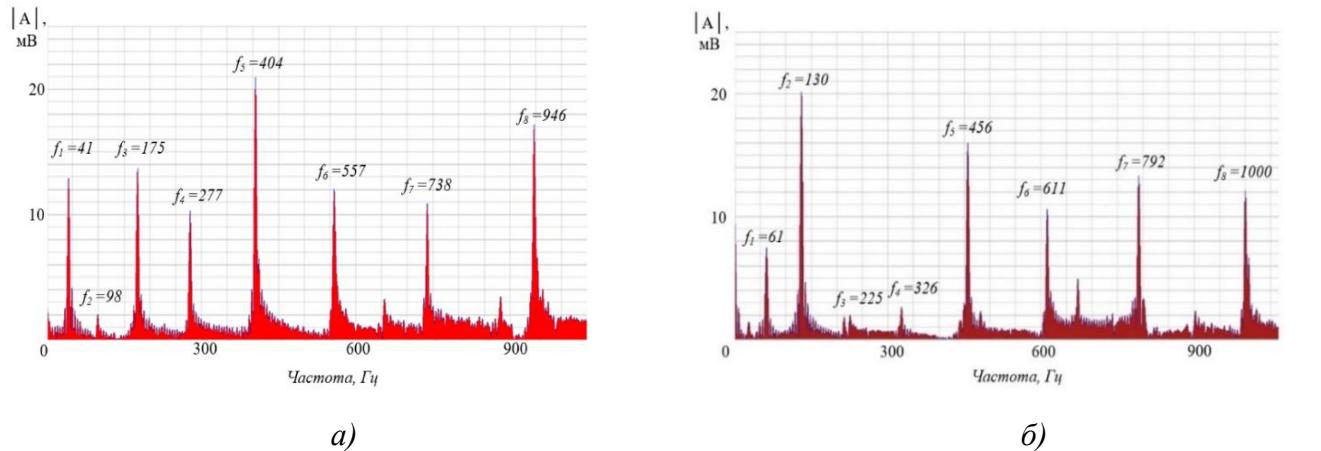


Рисунок 4 – Экспериментальные спектры колебаний полосы при растяжении силой 0,15 кН (а) и 1,97 кН (б)

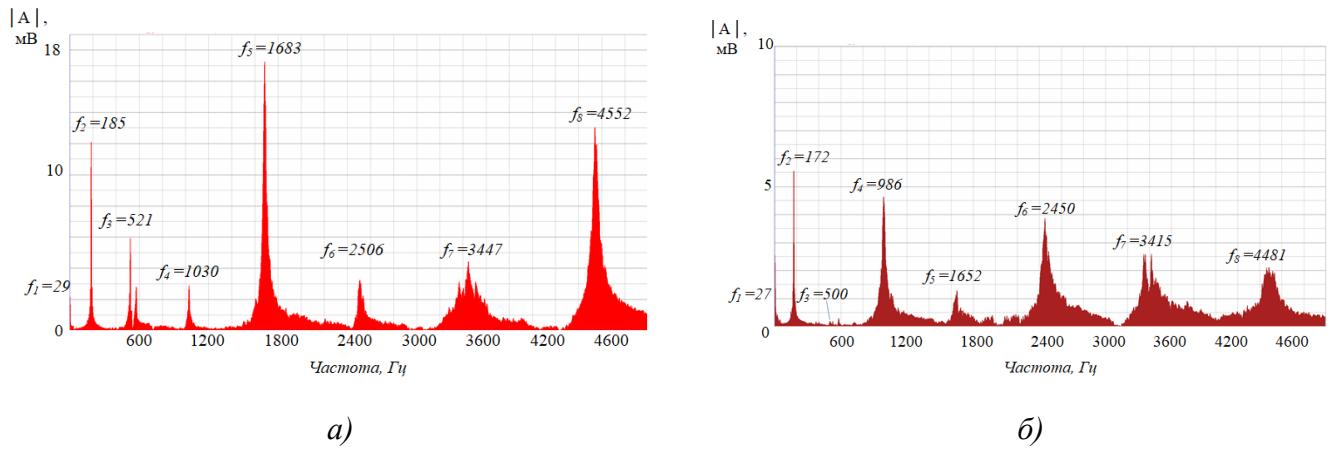


Рисунок 5 – Экспериментальные спектры колебаний консольного стержня при максимальной (а) и слегка ослабленной затяжке (б)

В результате, в зависимости от параметров балки, определено минимальное количество регистрируемых собственных частот её колебаний, необходимое для динамической оценки продольного усилия с приемлемой погрешностью. Определение величины продольной силы и коэффициентов угловой жесткости зажимов

с приемлемой погрешностью. Определение величины продольной силы и коэффициентов угловой жесткости зажимов

полосы по экспериментальным частотам производилось с помощью, описанного выше, стохастического метода. На рисунке 6 видно, что с приемлемой погрешностью менее 2% (1950 Н против 1970 Н в статике) продольная сила определяется при учёте не более чем пяти первых собственных частот поперечных колебаний стержня, что важно при анализе спектров, зашумленных паразитными частотами.

При динамической оценке была выявлена особенность спектра, состоящая в разнонаправленном изменении собственных частот изгибных колебаний при растяжении стержня в области слабо нелинейной зависимости напряжения от деформации. Предметом экспериментального изучения были послеударные колебания стального стержня круглого поперечного сечения 1 (рисунок 7а), закрепленного в разрывной машине МИМ.2 двумя цилиндрическими зубчатыми захватами 2, имитирующими упругие заделки, при различном статическом растяжении силами 0.1, 5, 10, 15.2 кН. Длина стержня между захватами $l = 197$ мм, диаметр 10 мм. Для построения диаграммы растяжения образца использовался навесной экстензометр 3 ДД-25.1.

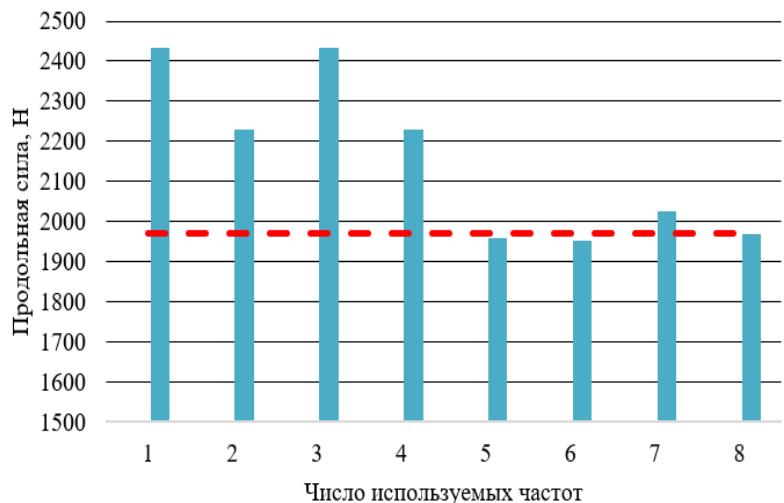


Рисунок 6 – Значения продольной силы, определённые динамическим методом по одной первой, двум..., восьми собственным частотам; штриховой линией показано значение продольной силы, заданное в растягивающей установке

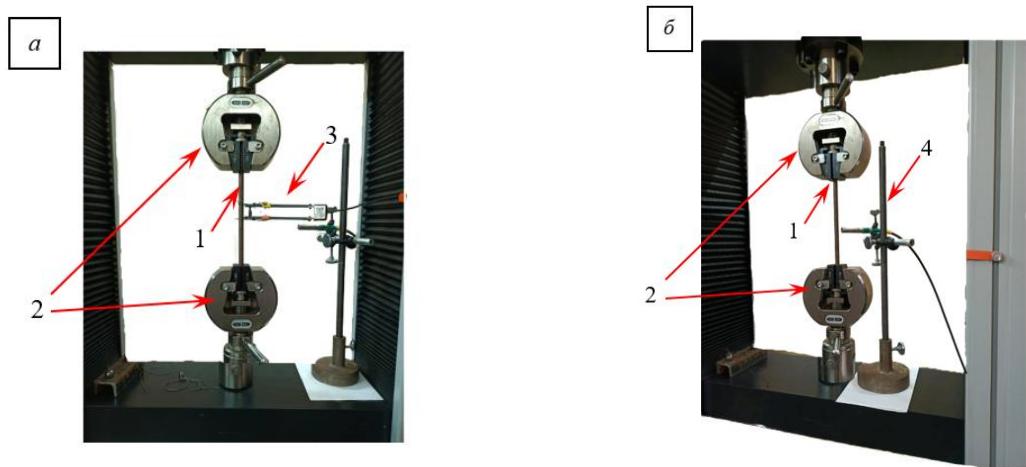


Рисунок 7 – Экспериментальная установка для построения диаграммы растяжения (а) и регистрации собственных частот (б)

Поперечные колебания стержня возбуждались ударом металлического шарика. Регистрация осуществлялась бесконтактно с помощью лабораторного микрофона 4 (рисунок 7б), соединённого со спектроанализатором типа А19-У2, данные из которого поступали в ЭВМ. В таблице 1 приведены по четыре первых собственных частот поперечных колебаний стержня при разных значениях растягивающей силы.

Таблица 1 – Собственные частоты стержня f , Гц в зависимости растягивающей силы N , кН

N , кН	0,1	5	10	15,2
f_1	936	948	963	999
f_2	2521	2524	2526	2582
f_3	4835	4809	4765	4896
f_4	7828	7766	7701	7788

Наблюдаемый эффект можно объяснить последовательным снижением значения модуля упругости с ростом растягивающей силы. На рисунке 8 приведена диаграмма растяжения образца, показанного на рисунке 7 в диапазоне от 0 до 30 кН. Видно, что

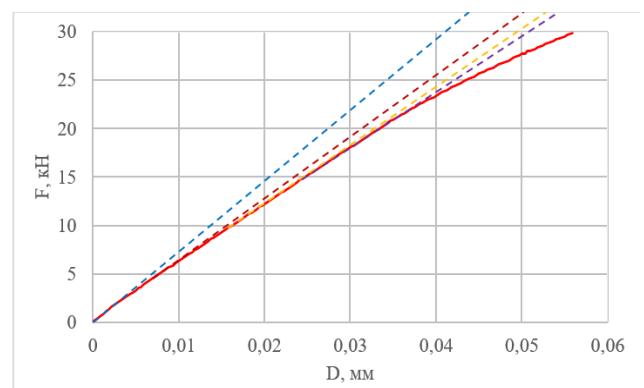


Рисунок 8 – Диаграмма растяжения образца

наклон касательной (штриховые линии) к кривой нагружения в рабочем диапазоне нагрузок уменьшается с ростом нагрузки, что означает снижение модуля упругости материала образца по сравнению со значением при малых нагрузках. Данное обстоятельство обычно не учитывается при расчёте собственных частот поперечных колебаний стержня со значительной растягивающей продольной нагрузкой.

Следующая часть главы продолжает серию исследований, посвящённых соответствию экспериментальным данным предсказаний теории балки Тимошенко (ТБТ) о двойном спектре сверхкритических частот поперечных колебаний на примере балки со свободными концами. В эксперименте были рассмотрены поперечные колебания в плоскости наибольшей жесткости свободно подвешенной латунной полосы длиной $L=0,69\text{ м}$ с поперечным сечением $6\times60\text{ мм}$, для которых расчётная критическая частота по ТБТ находится внутри акустического спектра.

Исходя из сопоставления спектров экспериментальных и теоретических частот продольных и поперечных колебаний балки, было проведено уточнение значений механических параметров балки, таких как скорость звука и коэффициент Пуассона, в результате чего достигнута высокая степень согласования этих спектров, в том числе, - за критической частотой. Экспериментальноverifiedированы парные частоты в сверхкритической области, предсказанные ТБТ. На рисунке 9 показан фрагмент спектра латунной полосы за критической частотой f_{cr} , на котором отчётливо видны две комбинации парных частот f_{15}, f_{16} и f_{17}, f_{18} с максимальным расхождением по частотам менее 3%.

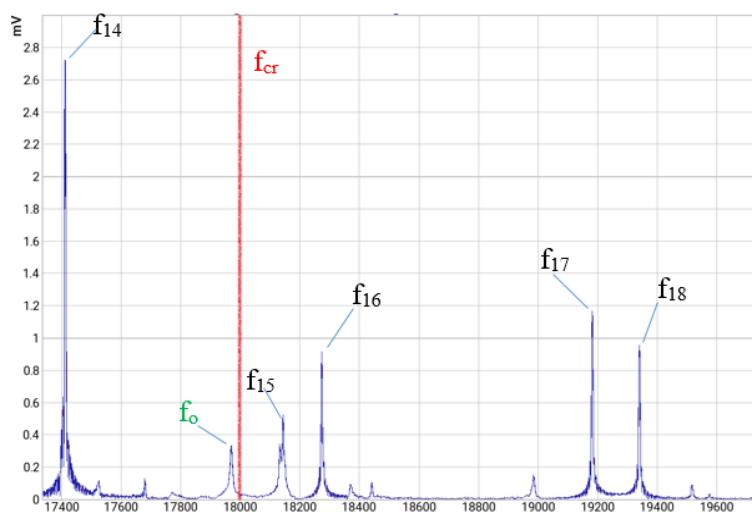


Рисунок 9 – Фрагмент спектра поперечных колебаний полосы в районе критической частоты ТБТ

В четвертой главе рассмотрен метод синхронного съёма виброакустической и спекл-интерферометрической информации для диагностики различных дефектов, в частности, - дефектов закрепления тонкостенных элементов конструкций. Разработан стенд для синхронной оптико-акустической регистрации частот и форм резонансных колебаний наблюдаемых элементов конструкций, выполнена его отработка на примерах диагностики дефектов в закреплении границ пластин сложных форм (Рисунок 10).



Рисунок 10 – Оптико-акустический стенд: слева - оптический блок, в центре - один из образцов, справа - часть акустического блока для возбуждения и регистрации резонансных частот колебаний с тыльной стороны образца

Характерным дефектом при вибрациях конструкций является локальное ослабление её закрепления. В экспериментах такой дефект моделировался уменьшением затяжки части винтов крепления пластины. Это, с одной стороны, вызывает снижение резонансной частоты колебаний пластины, а с другой, - искажение в окрестности заделки системы интерференционных полос, отражающих расположение линий уровня форм резонансных поперечных колебаний пластины-кардиоиды.

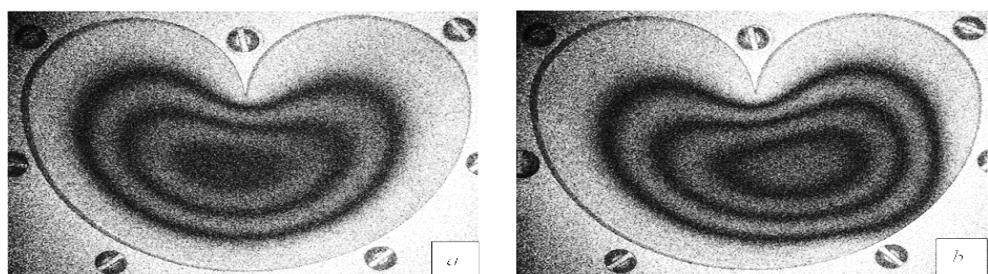


Рисунок 11 – Спекл-интерферограммы первой формы колебаний пластины в форме кардиоиды: *a* - при полной затяжке винтов крепления контура, *b* - при ослабленной затяжке двух винтов заделки

На рисунке 11 представлены спекл-интерферограммы формы резонансных колебаний пластины на первой собственной частоте при полной затяжке винтов (слева) и при ослабленной затяжке двух винтов заделки (справа).

В заключительной части, в результате анализа аналитических, численных и экспериментальных данных сформулированы положения и практические выводы, вытекающие из полученных в настоящей работе научных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Исследованы спектры акустического давления послеударных продольных колебаний при наличии трения, коэффициент которого определяется по совокупности многочастотных затухающих колебаний стержня после ударного воздействия в зависимости от соотношения между массой ударника и стержня, и поперечных колебаний при различной величине статического растяжения и условий закрепления реальных стержневых систем.

2. Разработана методика и стенд для экспериментального изучения спектра акустического давления послеударных продольных колебаний стержня. Выявлен и изучен эффект сдвига по частоте амплитудного максимума в спектре акустического давления при послеударных продольных колебаниях стержня. Показано, что величина этого сдвига может зависеть от параметров, определяющих период осцилляции, а именно от среды распространения звука, расстояния до приёмника и от отношения масс ударника и стержня. Показано, что при ударе по стержню ударником большей массы амплитуды скорости выходного конца на разных частотах отличаются друг от друга значительно осциллирующего эффекта функции; таким образом, максимум акустического давления соответствует частоте основного тона. При стремлении отношения масс соударяющейся пары к нулю спектр меняется и диктующим максимум оказывается осциллирующий эффект.

3. Разработан новый усовершенствованный частотный метод оценки усилий и узловых жесткостей в стержнях. Выполнены исследования по экспериментальной верификации усовершенствованного частотного метода определения растягивающих усилий и жесткостей закрепления стержневых элементов строительных конструкций на основе модели колебаний балки Тимошенко и разработанных алгоритма и программы для ЭВМ оптимального поиска значе-

ний продольного усилия и жёсткости заделки стержня по спектру зарегистрированных частот. Предложенные расчетные модели и методики способны обеспечить существенное снижение трудоемкости проведения таких испытаний.

4. Впервые выявлена и объяснена особенность разнонаправленного изменения собственных частот изгибных колебаний при растяжении стержня в области слабо нелинейной зависимости напряжения от деформации. Показана необходимость учета изменения начального модуля упругости в процессе деформирования при частотной диагностике усилий в стержневых элементах. Так, при изменении начального значения модуля упругости на 3% при статическом растяжении для рассматриваемого тестового образца 3-я собственная частота поперечных колебаний оказывается ниже 1-ой собственной частоты при начальном модуле упругости в отсутствии статического растяжения.

5. Проведен теоретический и экспериментальный анализ спектров частот балки Тимошенко в окрестности критической частоты. При рассмотрении поперечных колебаний используемая методика по определению физических величин на примере скорости звука приводит к согласованию теоретических и экспериментальных наборов частот. Экспериментально верифицированы близкие пары частот за частотой Тимошенко.

6. Создан и протестирован оптико-акустический стенд и новая методика синхронного съёма виброакустической и спекл-интерферометрической информации, пригодная для диагностики дефектов закрепления тонкостенных элементов конструкций и анализа степени их устранения. Проведенное тестирование показало преимущества объединения виброакустической и спекл-интерферометрической диагностики дефектов на примере диагностики дефектов в закреплении границы тестовой пластины. Важный признак такого дефекта - снижение резонансной частоты колебаний - является лишь интегральным признаком, по которому невозможно определить конкретное место расположения дефекта на контуре заделки. В то же время по конфигурации полос спекл-интерферограммы, полученной на сниженной резонансной частоте колебаний

пластины, однозначно определяется место расположения дефекта заделки контура пластины.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий и индексируемых в Web of Science, Scopus:

1. Попов А.Л., Козинцев В.М., Челюбеев Д.А., Азаров А.А. Оптико-акустическая диагностика дефектов элементов тонкостенных конструкций и степени их залечивания // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2022. – № 4(54). – С.25-33.

2. Азаров А.А., Попов А. Л., Челюбеев Д. А. Некоторые особенности частотной идентификации осевой нагрузки в балочных образцах // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2023. – №3(57). – С. 84-90. DOI 10.37972/chgpu.2023.57.3.007.

3. Азаров А.А., Попов А.Л., Челюбеев Д.А. О некоторых особенностях спектра продольных колебаний и звукоизлучения стержня // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2024. – № 88. – С. 53–65. doi: 10.17223/19988621/88/5.

4. Азаров А.А., Попов А.Л. Экспериментальная верификация частотного метода оценки осевой нагрузки и несовершенства граничных условий в арматурных стержнях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 3. – С. 108–117. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.3.09.

Публикации в других научных журналах и изданиях:

5. Азаров А. А., Попов А. Л. Экспериментально-теоретический анализ начальной стадии продольных колебаний стержня после ударного воздействия // XLVII Гагаринские чтения. Сборник трудов Международной молодежной

научной конференции. Секция «Механика и моделирование материалов и технологий» – Москва : ИПМех РАН, 2021. – С. 6-10.

6. Азаров А. А. Ударное возбуждение продольных колебаний стержня со свободными концами // Дни студенческой науки. Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов ИФО НИУ МГСУ. – Москва : НИУ МГСУ, 2021. – С. 216-219.

7. Попов А.Л., Козинцев В.М., Челюбеев Д.А., Азаров А.А. Оптико-акустическая диагностика дефектов элементов тонкостенных конструкций и степени их залечивания // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. Сборник трудов Международной научной конференции. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2023. – С. 1122-1125.

8. Азаров А. А. О соответствии теоретических моделей поперечных колебаний стержня экспериментальным данным // Дни студенческой науки. Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов ИЦТМС НИУ МГСУ. – Москва: НИУ МГСУ, 2022. – С. 418–421.

9. Азаров А. А., Попов А. Л. Теоретический и экспериментальный анализ спектра частот балки Тимошенко в окрестности критической частоты // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Сборник докладов. Том 3. – Санкт-Петербург : Политех-Пресс, 2023. – С. 333-335.

10. Азаров А.А., Попов А.Л., Челюбеев Д.А. Эффект разнонаправленного изменения собственных частот изгибных колебаний при растяжении балки // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. Сборник трудов Международной научной конференции. – Воронеж : Научно-исследовательские публикации, 2024. – С. 1024-1029.

Свидетельства, патенты и др. результаты интеллектуальной деятельности, зарегистрированные в установленном порядке:

11. Азаров А. А. Спектральное определение коэффициентов жесткости и силовых факторов локально-стохастическим методом. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023685946, 1 декабря 2023 г.