

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель

Федерального государственного
бюджетного научного учреждения

Уфимского федерального

исследовательского центра Российской
академии наук

В. Б. Мартыненко

« 27 » марта 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук на диссертационную работу Азарова Артура Александровича «Исследование упруго-акустических эффектов при ударном возбуждении стержня», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа посвящена исследованию упруго-акустических эффектов, возникающих при ударном возбуждении стержневых элементов конструкций, и разработке на этой основе усовершенствованных методов технической диагностики. Актуальность работы обусловлена несколькими факторами. Во-первых, стержневые системы широко применяются в строительстве (арматура мостов и зданий, стяжные элементы, балки перекрытий) и машиностроении. Контроль их напряженно-деформированного состояния и целостности является критически важным для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации. Во-вторых, существующие статические методы диагностики зачастую трудоемки и не всегда применимы в условиях эксплуатации. Развитие динамических (частотных) методов является перспективным направлением, позволяющим проводить неразрушающий контроль с меньшими трудозатратами.

Содержание диссертационной 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.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, указаны ее цели и задачи, методы исследования, представлена апробация результатов. Приводятся достижения предшественников, новизна полученных и выносимых на защиту результатов, их теоретическая и потенциальная практическая значимость.

В **первой главе** приводятся обзор моделей, описывающих продольные и поперечные колебания стержней, а также теоретические модели, описывающие соударение.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

14.04.2026

Вторая глава посвящена исследованию послеударных продольных колебаний стержня и особенностей распределения амплитудно-частотных зависимостей перемещений и акустического давления выходного конца стержня. Для получения спектров колебаний торцов с ограниченными амплитудами в математическую модель колебаний введено внутреннее трение, коэффициент затухания при котором определяется по совокупности многочастотных затухающих колебаний стержня после ударного воздействия. В части определения ударного импульса также используется волновая теория Сен-Венана, что позволяет получить явное аналитическое решение. В экспериментальной части обнаружены некоторые особенности спектра звукоизлучения стержня.

В **третьей главе** рассмотрена методика динамической оценки продольного усилия и коэффициентов угловой жёсткости заделки неидеально закрепленного стержня по спектру его изгибных колебаний путём сравнения экспериментального набора частот с теоретическим. Проведена экспериментальная верификация динамической методики на стержневых моделях с известными значениями продольного усилия и угловой жёсткости заделки. Отмечена особенность разнонаправленного изменения собственных частот изгибных колебаний при растяжении стержня в области слабо нелинейной зависимости напряжения от деформации. Рассмотрение модельного образца с критической частотой Тимошенко в акустическом спектре.

В **четвертой главе** рассмотрен метод синхронного съёма виброакустической и спекл-интерферометрической информации для диагностики дефектов закрепления тонкостенных элементов конструкций. Разработан стенд для синхронной оптико-акустической регистрации частот и форм резонансных колебаний наблюдаемых элементов конструкций, выполнена их верификация на примерах диагностики дефектов в закреплении границ тестовых пластин в форме эллипса и кардиоиды.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Достоверность и научная новизна результатов диссертации

Подтверждением **достоверности** всех аналитических построений и расчётов, выполненных в рамках диссертационной работы, служит верификация результатов с экспериментальными данными и корректное использование классических методов механики деформируемого твердого тела, математической физики и численных методов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм и методика спектрального определения коэффициентов жесткости и внутренних силовых факторов локально-стохастическим методом, обеспечивающая согласование в широком диапазоне отношения длины к габаритам поперечного сечения. Показано что с приемлемой погрешностью менее 2% продольная сила определяется при учёте не более чем пяти первых собственных частот поперечных колебаний стержня, что важно при анализе спектров, зашумленных паразитными частотами.

2. Показана зависимость критической частоты балки Тимошенко от внутреннего силового фактора – растягивающей силы. Отмечена особенность разнонаправленного изменения собственных частот изгибных колебаний при растяжении стержня в области

слабой нелинейности. Проведен теоретический и экспериментальный анализ спектров частот балки Тимошенко в окрестности критической частоты. Экспериментально верифицированы близкие пары частот за частотой Тимошенко.

3. Разработана методика и стенд для экспериментального изучения спектра акустического давления послеударных продольных колебаний стержня. В экспериментальной части было установлено, что спектр акустического давления не всегда повторяет спектр перемещения выходного конца, максимум которого соответствует частоте основного тона и на котором отсутствуют осцилляции.

4. Собран оптико-акустический стенд и разработана методика синхронного съема виброакустической и спекл-интерферометрической информации. Методика позволяет диагностировать дефекты закрепления тонкостенных элементов конструкций и анализировать степени их устранения.

Теоретическая значимость работы состоит в углублении понимания сложных упруго-акустических процессов при ударном возбуждении стержней, включая выявление и объяснение новых эффектов (сдвиг частотного максимума, разнонаправленное изменение частот при нелинейности, верификация спектра ТБТ). Разработанные математические модели и алгоритмы могут быть использованы для дальнейших исследований в области динамики стержневых систем и акустической диагностики.

Практическая значимость результатов диссертационных исследований заключается в разработке метода оптимального поиска значений продольного усилия и жесткости заделки стержня по конечному числу собственных частот колебаний. Предложенный усовершенствованный частотный метод и созданное на его основе программное обеспечение позволяют существенно повысить точность и снизить трудоемкость диагностики усилий натяжения в арматурных стержнях, стяжках и анкерах непосредственно в условиях эксплуатации. Важным практическим результатом является обоснованная возможность сокращения высвобождаемой части бетонной одежды при диагностике преднапряженной арматуры без потери точности. Созданный оптико-акустический стенд и методика могут найти применение в заводских и лабораторных условиях для контроля качества изготовления и монтажа тонкостенных конструкций.

Публикации и апробация результатов исследования, отражающие основное содержание работы. Основные положения работы опубликованы в 10 научных статьях, из которых 4 статьи напечатаны в журналах, входящих в перечень ВАК РФ и/или индексируемых в Web of Science, Scopus. Отдельные разделы диссертации докладывались на профильных научных международных и всероссийских конференциях. Получен акт внедрения и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы.

Полученные результаты целесообразно использовать в организациях, занимающихся проектированием, строительством и эксплуатацией мостов, высотных зданий и других объектов с преднапряженной арматурой, а также в научно-исследовательских институтах и лабораториях, специализирующихся на неразрушающем контроле (например, ИПМех РАН, ИМАШ РАН).

Замечания по диссертационной работе

1. Для описания свободных послеударных продольных колебаний стержня можно было рассмотреть менее распространенную модель, учитывающую поперечное смещение (поправка Релея), или более совершенную модель Бишопа, учитывающая как поперечное смещение, так и деформацию сдвига.

2. Блок-схема алгоритма поиска на рисунке 3.3 не содержит обратную связь в цикле возврата к принятию новых значений, хотя в тексте указано, что алгоритм итерационный. Видимо, оптимизационный блок, подразумевает данную операцию.

3. В разделе 3.1 приведены несколько частотных уравнений для изгибных колебаний стержня с различными краевыми условиями, но не приведены сами спектры частот.

4. При разработке алгоритма поиска параметров (п. 3.2) автор использует комбинацию глобального (basin-hopping) и локального (Нелдера-Мида) методов. Желательно было бы привести более детальное обоснование выбора и применимости именно этих методов, а также оценить их чувствительность к выбору начального приближения и зашумленности исходных частотных данных.

5. В четвертой главе при анализе колебаний эллиптической пластины используется приближенное аналитическое решение, дающее оценку сверху. Следовало бы провести сравнение этих результатов с более точным численным расчетом (например, МКЭ) для оценки погрешности приближенного метода.

6. На рисунке 3.4 (стр. 60) не все стрелки имеют обозначения.

7. В уравнении 1.3.1 площадь поперечного сечения обозначена буквой A , хотя далее по тексту везде обозначено буквой F .

Указанные замечания носят, в основном, рекомендательный и уточняющий характер, не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и не влияют на достоверность и обоснованность выносимых на защиту положений.

Заключение.

Диссертационная работа Азарова Артура Александровича выполнена на высоком уровне и является законченной научно квалификационной работой, которая содержит результаты, имеющие значение для механики деформируемого твердого тела. Отмеченные замечания не снижают теоретической и практической значимости полученных соискателем результатов и не носят принципиального характера. Автореферат в полном объеме отражает содержание диссертации.

Диссертация соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Азаров Артур Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. — «Механика деформируемого твердого тела».

Диссертационная работа Азарова А.А. была заслушана и обсуждена на заседании Ученого совета Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного

подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН). На заседании присутствовало 8 человек. Результаты голосования: «за» – 8, «против» – 0, «воздержались» – 0.

Протокол № 1 заседания от «26» марта 2026 г.

Отзыв составил:

Утяшев Ильнур Мирзович, кандидат физико-математических наук (специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), старший научный сотрудник лаборатории «Механика твердого тела» ИМех УФИЦ РАН

Утяшев Ильнур Мирзович

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН)

Адрес: 450054, г. Уфа, проспект Октября, д. 71

Телефон: +7 (347) 235-52-55

Адрес электронной почты: imran@anrb.ru

Подпись Утяшева И.М. удостоверяю

Ученый секретарь ИМех УФИЦ РАН,

кандидат физико-математических наук



Гайнуллина Э.Ф.

Директор ИМех УФИЦ РАН,

доктор физико-математических наук (специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)

Галимзянов Марат Назипович

С секретаря фракции
14.04.2026