

В диссертационный совет по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 24.2.327.07
при Федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Азарова Артура Александровича «Исследование упруго-акустических эффектов
при ударном возбуждении стержня»,
представленную к защите на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

На отзыв представлены:

- диссертационная работа на 113 страницах машинописного текста, содержащая 37 рисунков, 5 таблиц, 2 приложения и список литературы из 113 наименований;
- автореферат диссертации на 24 страницах со списком из 11 публикаций автора по теме диссертационной работы (2 статьи из этого списка опубликованы в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, 2 статьи опубликованы в в журналах, индексируемых международными базами цитирования Web of Science и Scopus, 6 статей опубликованы в материалах Всероссийских и международных конференций, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ).

1. Актуальность темы. Диссертационная работа Азарова Артура Александровича посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию закономерностей колебаний и звукоизлучения упругих тел. Сложность экспериментального мониторинга и диагностики усилий и качества соединений стержневых элементов креплений кровли шахт, мостов, сетчатых оболочек и др. металлических конструкций по излучаемому акустическому полю послеударных колебаний предопределяет необходимость разработки новых малотрудозатратных экспресс методов, а также их теоретического обоснования и экспериментальной верификации. Все это обуславливает актуальность диссертационной работы.

2. Научная новизна. В диссертационной работе разработана методика, спроектирован и создан стенд для экспериментального изучения спектра акустического давления послеударных продольных колебаний стержней; реализованы преобразования исходных амплитудно-временных зависимостей в амплитудно-частотную область с учетом трения в материале, выявлены новые закономерности амплитудно-частотных зависимостей звукоизлучения послеударных продольных колебаний стержней — сдвиги амплитудных максимумов спектров с частоты основного тона на обертоны, которые зависят от парамет-

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«5» 05 2026г.

ров, определяющих период осцилляции (среда распространения звука, расстояние до приемника, отношение масс ударника и стержня). Разработан новый экспериментальный метод динамической оценки продольного усилия и коэффициентов угловой жесткости заделки растянутых стержней, основанная на анализе изгибных колебаний с использованием гипотез балки Тимошенко. Это позволило при решении соответствующих обратных задач определения напряжений в стержнях и жесткостей граничных условий по спектру экспериментально зарегистрированных частот обходиться существенно меньшей длиной стержня, чем в случае общепринятой струнной модели, при сохранении той же точности определения измеряемых параметров. Проведена экспериментальная верификация метода на стержневых моделях с известными значениями продольного усилия и жесткости заделки. Обнаружен эффект разнонаправленного изменения собственных частот изгибных колебаний при растяжении стержня в области, где зависимость напряжения от деформации проявляет слабую нелинейность. Это важное обстоятельство не принимается во внимание большинство исследователей при расчете собственных частот поперечных колебаний стержней, находящихся под значительной растягивающей нагрузкой. Разработан новый метод синхронного получения виброакустической и спекл-интерферометрической информации при мониторинге и контроле напряженно-деформированного состояния и дефектов тонкостенных элементов конструкций. Спроектирован и создан стенд, на котором выполнена диагностика ослабления затяжки отдельных точек в многоточечном закреплении границ тестовых пластин в форме эллипса и кардиоиды. Установлено, что снижение собственных частот колебаний пластин связано с ослаблением затяжки границы, а искажение резонансных форм колебаний на спекл-интерферограммах позволяет локализовать место ослабления затяжки.

3. Обоснованность и достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается строгой постановкой краевых задач, корректным применением методов математической физики, механики и динамики упругих тел, вычислительной механики и экспериментальной механики деформируемого твердого тела; применением при проведении экспериментальных исследований методологических подходов, проверенных многолетней практикой; использованием испытательного и измерительного оборудования с высокими метрологическими характеристиками.

4. Теоретическая и практическая значимость. Диссертантом сделан серьезный шаг в области разработки новых экспресс-методов неразрушающего мониторинга и контроля сил натяжения в стержневых элементах строительных конструкций и сооружений. Полученные новые теоретические и экспериментальные результаты могут существенно сократить материальные, временные и трудовые затраты на диагностику сил натяжения в преднапряженной арматуре мостов, зданий и сооружений в процессе мониторинга сохранения проектных значений. Это может оказаться возможным благодаря использованию уточненных моделей колебаний, разработанного алгоритма поиска значений продольных усилий и жесткостей заделок арматурных стержней и канатов по спектру зарегистрированных собственных частот после ударных воздействий при значительно меньшем высвобождении длины бетонной одежды без уменьшения точности получаемых результатов.

5. Анализ содержания диссертации. Диссертационная работа включает в себя введение, 4 главы, заключение; изложена на 113 страницах машинописного текста, содержит 37 рисунков, 5 таблиц и 2 приложения. Список литературы состоит из 113 наименований. Диссертация хорошо структурирована, изложение материала выстроено логически грамотно.

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность и обоснованность полученных результатов; показана степень разработанности темы исследования, представлены методология исследования и используемые методы, отражены положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации результатов и отражен личный вклад автора. Представлен краткий аналитический обзор истории развития и современного состояния в области экспериментального и теоретического исследования продольных и поперечных колебаний стержней, а также в области ударного возбуждения колебаний.

В первой главе приведены постановки начально-краевых задач для описания возбуждаемых ударом колебаний стержней при раздельном и совместном учете волнового движения, а также местной деформации в соударяющихся телах. Разработаны модели описания закономерностей продольных и поперечных колебаний стержней.

Во второй главе получено аналитическое решение задачи о продольных колебаниях стержня со свободными концами при наличии трения, коэффициент которого определяется по совокупности многочастотных затухающих колебаний стержня после ударного воздействия. Определены и проанализированы амплитудно-частотные зависимости перемещений и скоростей концов стержня, исследована связь с акустическим давлением, излучаемым торцами при разных соотношениях массы ударника и стержня. Обнаружен эффект сдвига амплитудного максимума акустического давления с частоты основного тона на обертона, зависящий от параметров, определяющих период осцилляции, и отношения масс ударника и стержня. Показано хорошее качественное и количественное согласование теоретических и экспериментальных результатов.

В третьей главе разработана методика динамической оценки продольного усилия и коэффициентов угловой жесткости заделки растянутого стержня по спектру его изгибных колебаний с использованием гипотез балки Тимошенко. Это позволило при решении соответствующих обратных задач определения напряжений в стержнях и жесткостей граничных условий по спектру зарегистрированных экспериментальных частот обходиться существенно меньшим размером длины стержня, чем в случае общепринятой струнной модели, при сохранении той же точности определения диагностируемых параметров. Теоретически объяснен экспериментально обнаруженный эффект разнонаправленного изменения собственных частот изгибных колебаний при растяжении стержня в области слабо нелинейной зависимости напряжения от деформации.

В четвертой главе разработан метод синхронного получения виброакустической и спекл-интерферометрической информации, объединяющий преимущества двух методов при экспресс диагностике напряжённо-деформированного состояния и наличия локализованных дефектов в тонкостенных элементах конструкций (локальное ослабление закрепления границ тестовых пластин). Сделан вывод о том, что экспериментально выяв-

ленный важный признак такого дефекта — снижение резонансной частоты колебаний — является интегральным признаком, по которому не удастся провести локацию 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. Показано, что после устранения этого дефекта восстанавливается исходная собственная частота колебаний пластины и спекл-интерферограмма соответствующей формы резонансных колебаний.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

Основными результатами следует считать:

- полученное новое аналитическое решение задачи об определении спектра акустического давления послеударных продольных колебаний стержня; разработанную новую методику динамической оценки продольного усилия и коэффициентов угловой жесткости заделки неидеально закрепленного стержня по спектру его изгибных колебаний;

- полученные новые результаты теоретического и экспериментального исследования спектра частот балки Тимошенко в окрестности критической частоты; обнаруженные эффекты влияния растягивающей силы на положение критической частоты; экспериментально верифицированные близкие пары частот, располагающиеся в спектре за частотой Тимошенко;

- обнаруженный и объясненный эффект разнонаправленного изменения собственных частот поперечных колебаний при растяжении стержня в области слабой нелинейности, при котором наблюдается увеличение низких частот и уменьшение высоких частот с ростом их порядкового номера;

- спроектированный и созданный оптико-акустический стенд, разработанные новые методы синхронного получения виброакустических сигналов и спекл-интерферометрической информации для диагностики дефектов закрепления тонкостенных элементов конструкций;

- разработанные новые алгоритмы и их авторская программная реализация в виде комплекса программ 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.

6. Замечания. По диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. Список литературы оформлен не по алфавиту, а по мере поступления ссылки на цитируемую работу. Публикации на русском и английском языках идут вперемешку. Это представляет определенное неудобство. Когда необходимо выяснить информацию о наличии научной работы того или иного автора, приходится просматривать весь список. Каждая глава должна содержать вначале перечень публикаций соискателя, в соответствии с которыми изложен материал этой главы. Отсутствуют четко выводы по первой, второй, третьей и четвертой главам.

2. На С. 41 рукописи диссертационной работы при определении амплитуд спектра перемещений было получено выражение контактной силы (2.2.6), учитывающее только волновое распространение. Для наглядности можно было привести графические зависи-

мости с отсутствием восходящей части и наличием только затухающей части контактного импульса. На С. 44 представлено выражение (2.3.1.6) для амплитуды спектра перемещений $A(\omega)$. Для иллюстрации снижения $A(\omega)$ выходного конца послеударных продольных колебаний стержня с ростом порядкового номера частоты было бы логично продемонстрировать отсутствие осцилляций на данном спектре и провести анализ сходимости для более высоких частот.

3. На С. 58 представлена блок-схема алгоритма оценки коэффициентов угловой жесткости заделки и продольной силы по экспериментальному набору собственных частот (рис. 3.3). Для наглядности стоило бы построить более подробную схему с циклом возврата к принятию новых значений для переменных. В приложении А на С. 111 представлен листинг программной реализации алгоритма на языке Python. Эта реализация достаточно громоздка, содержит излишнюю избыточность импорта: импортируются все функции из библиотеки SymPy (первая строка кода), затем вновь импортируются некоторые элементы. Программно оптимальнее было бы лучше использовать один стиль импорта.

4. При описании разработанного метода контроля усилий в преднапряженных конструкциях не конкретизировано его очевидные преимущества по сравнению другими известными методиками (например, авторов [99]), применяемыми для определения усилий в канатах сооружений пролетного строения, где удовлетворительные результаты получаются при значительной (более 10 м) длине вскрытия бетонной одежды.

Высказанные замечания и недостатки имеют частный характер, не затрагивают сути основных выводов и положений, выносимых на защиту, не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы (которая написана и оформлена в соответствии с установленными требованиями) и квалификации ее автора. Результаты работы хорошо апробированы (доклаживались и обсуждались на Всероссийских и международных научных конференциях) и опубликованы в 10 статьях (2 статьи из этого списка опубликованы в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, 2 статьи опубликованы в журналах, индексируемых международными базами цитирования Web of Science и Scopus, 6 статей опубликованы в материалах Всероссийских и международных конференций), получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

7. Автореферат дает ясное представление о постановке исследования и основных результатах, полностью соответствует содержанию диссертации.

8. Диссертационная работа полностью соответствует специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела по пунктам 3, 8 и 13 паспорта специальности.

9. Заключение. Оценивая работу в целом, считаю, что по уровню решаемых задач, объему выполненных исследований, обоснованности вынесенных на защиту положений и выводов, уровню достоверности, научной новизны и оригинальности полученных результатов, их значимости для науки и практики диссертационная работа «Исследование упруго-акустических эффектов при ударном возбуждении стержня» является законченной научно-квалификационной работой, вносящей существенный вклад в решение теоретических и прикладных вопросов соответствующих разделов механики деформируемого твердого тела, выполненной на высоком научном уровне, соответствует пп. II. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание

ученой степени кандидата технических наук, а ее автор — Азаров Артур Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Согласен на обработку своих персональных данных

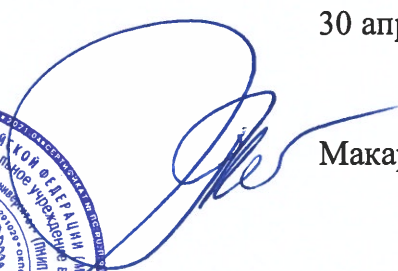
Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Механика композиционных
материалов и конструкций» Федерального
государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Пермский
национальный исследовательский
политехнический университет» (ПНИПУ),
614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29,
Телефон: +7 (342) 239-11-59,
E-mail: a-zaitsev@mail.ru



Зайцев Алексей Вячеславович

30 апреля 2026 г.

Подпись А. В. Зайцева заверено,
секретарь Ученого совета ПНИПУ



Макаревич Владимир Иванович

*С секретарем ознакомлен
05.05.2026*

