

На правах рукописи



Стуленков Андрей Вадимович

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ**

1.3.7 – акустика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: Суворов Анатолий Сергеевич, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Коробов Александр Иванович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва)

Демин Игорь Юрьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (г. Нижний Новгород)

Ведущая организация: Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова» (г. Нижний Новгород)

Защита состоится 02.06. 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.03 в ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ИПФ РАН.

Автореферат разослан _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



А. И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Необходимость виброакустического проектирования возникает в различных областях науки и техники, когда на вибрационные и акустические поля машин или конструкций накладываются определенные требования. Требованиями может задаваться верхняя граница уровня излучения, например, для задач по снижению уровней звука и вибраций от работающих машин, или, наоборот, нижняя граница, если речь идет о создании эффективного акустического излучателя. Целью виброакустического проектирования может также являться управление спектром объекта, например смещение его резонансов из нежелательного частотного диапазона, за счет разных вариантов изменения его конструкции. Исследования в рамках перечисленных выше задач могут проводиться как экспериментально, так и с помощью численного моделирования. Несмотря на серьезное развитие численных методов за последнее время, вопрос об адекватности моделей и результатов, полученных с помощью них, все еще остается актуальным. Поэтому важность выполнения точных и информативных измерений не вызывает сомнений.

Для измерения вибрационных полей традиционно применяются наборы из пьезоакселерометров или пьезопластин. Альтернативным методом измерения вибраций является лазерная доплеровская виброметрия [1–2]. Основным преимуществом лазерной виброметрии перед традиционными средствами является возможность измерять вибрацию в большом наборе точек, не оказывая влияния на динамические характеристики объекта. Благодаря этому преимуществу лазерная виброметрия используется в широком спектре прикладных задач, где необходимо оценивать виброакустические поля относительно легких или труднодоступных объектов [A13, A14].

Описанные преимущества лазерной виброметрии делают ее мощным инструментом для проверки достоверности численных расчетов и моделей [3–4]. Результаты расчетов и измерений могут не совпадать друг с другом из-за большого числа дефектов реальной конструкции, в том числе и скрытых, которые невозможно учесть при моделировании. Поэтому развитие методов автоматической корректировки параметров численной модели актуально и этой задаче уделяется большое внимание [5–6]. Методы, описанные в упомянутых работах, не лишены недостатков и применимы либо для относительно простых изделий, либо требуют задания вручную варьируемых параметров в случае использования для объектов со сложной геометрией. В диссертации для корректировки спектральных характеристик численных виброакустических моделей предлагается подход, основанный на использовании лазерной виброметрии и метода автоматической доводки по резонансным формам колебаний тела [7]. Алгоритм, используя в качестве входных данных информацию о резонансных частотах и формах колебаний конструкции, осуществляет

подбор нового оптимального распределения модуля Юнга, при котором достигается максимально возможное соответствие расчетных и экспериментальных резонансов. Сочетание этих методов позволяет эффективно выполнять корректировку численных моделей, в том числе, легких объектов, динамические характеристики которых могут быть существенно изменены контактными системами измерений.

Предлагаемый подход позволяет также осуществлять поиск дефектов в конструкции. Актуальность задачи поиска дефектов несомненна, что подтверждается большим количеством работ и разнообразием методов. В качестве примера можно упомянуть методы, основанные на сравнении АЧХ и резонансных форм колебаний поврежденного и эталонного образцов [8–9], на анализе разницы передаточных функций между соседними точками для эталонного и поврежденного образца [9], на использовании волн Лэмба [10–12]. Отличие предлагаемого в работе метода заключается в том, что он позволяет находить скрытые дефекты, не используя эталонные измерения с неповрежденным объектом.

Другим вариантом совместного использования лазерных измерений вибраций и численного моделирования является исследование особенностей формирования гидродинамического шума от упругих тел в турбулентном потоке. Источниками гидродинамического шума, зачастую, являются различные вращающиеся механизмы, например, гребные винты. Исследовать акустическое поле винта экспериментально в реальных условиях затруднительно, из-за сложности измерения его упругих резонансов под водой и сопоставления их с максимумами акустического поля. Большинство соответствующих тематике экспериментальных работ, выполненных в натуральных условиях, посвящено исследованию только низкочастотной составляющей поля винта (гармоники лопастных и оборотных частот) [13–14]. Определить резонансы винта удобнее в лабораторных условиях, что и делается в ряде исследований [15], выполненных также и с использованием лазерной виброметрии [16], в том числе для вращающихся винтов [17]. Однако в этих работах сопоставление максимумов акустического поля с упругими резонансами винта не приводится вовсе или приводится не в полной мере. Описанная задача может решаться и численно [18], однако результаты таких сложных расчетов нуждаются в экспериментальной проверке. Из этого следует, что в настоящее время существует необходимость в подходе к анализу акустических полей упругих тел в потоке, причем такой подход должен включать себя и расчетную, и экспериментальную часть.

В диссертации для выполнения такого анализа предлагается расчетно-экспериментальная методология, основанная на применении лазерных измерений вибраций исследуемого объекта в воздухе с последующим учетом внешней жидкости с помощью МКЭ. Полученная новая «водная» численная модель затем используется для интерпретации результатов измерений с объектом на открытой воде. Как показывает практика, разработанная методоло-

гия позволяет моделировать особенности гидроакустического поля упругого тела в потоке, в частности, выявлять в поле его упругие резонансы. Важным преимуществом методологии является отсутствие необходимости выполнения сложных расчетов по прогнозу акустического поля от источников гидродинамического шума.

Исследование усиления звукового поля за счет совпадения срывной гидродинамической частоты и упругого резонанса обтекаемого тела дополняют описанную выше задачу и, в то же время, актуальны сами по себе. Такие исследования, как правило, выполняются с использованием относительно простых объектов (цилиндр, пластина, профиль крыла) и направлены на изучение механизма усиления колебаний и развитие методов численного моделирования. Для решения этих задач также необходима информация о взаимосвязи структурных резонансов и уровней давления. Подробный обзор данной проблематики приводится, например, в [19–21], но в этих работах не приводятся результаты совместных измерений резонансных форм колебаний и акустики, которые могли быть полезны для подтверждения достоверности расчетных методов. В диссертации описываются результаты перекрестных экспериментов (величины измерялись двумя способами) с обтеканием стреловидной пластины на проливном стенде, где такие данные приводятся и, помимо этого, демонстрируется возможность усиления звука при совпадении гармоник срывной частоты с упругим резонансом.

Лазерная виброметрия также активно применяется при анализе шумов и вибраций сложных механоакустических систем. В качестве примера можно привести автомобильную промышленность, где измерение распределения вибраций по поверхности может использоваться для решения двух задач: снижения уровней шума в салоне и за его пределами. Для решения первой задачи необходимо определить резонансы структурных элементов всей конструкции и акустического объема кабины. Из-за бесконтактного принципа измерений лазерная виброметрия идеально подходит для такой задачи. По отдельности, исследованиям структурных резонансов автомобиля [22–23] и акустических мод салона [24–25] уделяется немало внимания. Однако публикаций, в которых описывалось бы определение обоих типов мод, найти не удалось. При этом очевидна актуальность проведения подобных исследований. Вторая задача – прогнозирование поля на некотором удалении от конструкции может быть решена с использованием антенных решеток [26–28] и техники акустической голографии. В качестве альтернативы антенным решеткам с фиксированным шагом можно рассмотреть измерения нормальной компоненты виброскорости на тонком экране [29], где можно задать очень плотную измерительную сетку, повысив тем самым пространственное разрешение. Ранее подобный метод использовался для поиска зон повышенного шумоизлучения конструкции. В диссертации будет рассмотрена возможность его применения для прогнозирования поля на удалении от исследуемого объекта. В целом в диссертации предложен подход к исследованию обеих упо-

мянутых задач с учетом описанных актуальных моментов, основанный на использовании лазерных измерений вибрации.

Важной задачей является измерение вибраций тел, находящихся не в лабораторных, а в рабочих условиях, например, вращающихся тел. В выполнении подобных измерений с помощью лазерных виброметров глобально можно выделить два подхода: с использованием систем, позволяющих лазерному лучу следить за конкретной точкой объекта и без таких систем (луч неподвижен). Наиболее распространены отслеживающие системы двух типов: основанные на применении вращающейся призмы Дове [30], основанные на совместном использовании лазерного виброметра и видеокамеры в совокупности с алгоритмом обработки изображения в режиме реального времени [31].

Альтернативный подход – измерение без систем слежения за конкретной точкой. При этом вращающийся объект проходит через неподвижный луч лазерного виброметра [32–34]. Такой подход хоть и является более примитивным, тем не менее, обладает рядом преимуществ. Во-первых, он применим в том случае, когда вращающаяся деталь (диск, винт, пропеллер) закрыта кожухом или направляющими, которые мешают непрерывному движению луча за точкой. В такой ситуации измерения выполняются неподвижным лазером, направленным в доступную для обзора точку. Во-вторых, измерительная система с неподвижным лучом является более простым и доступным инструментом. Это связано с высокой ценой следящих систем, а также со значительной трудностью их настройки. Понятно, что расширение возможностей применения систем с неподвижным лазером является актуальной задачей. При этом в случае использования неподвижного лазера возникает проблема, связанная с понижением частотного разрешения спектров при увеличении частоты вращения тела. В результате могут перестать разрешаться близко расположенные дискретные составляющие спектра из-за короткого времени скольжения луча по исследуемому объекту. В диссертации предложен способ решения такой проблемы, основанный на методе наименьших квадратов для случая двух гармоник.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель работы – создание экспериментальных и расчетно-экспериментальных методов виброакустического проектирования, основанных на использовании лазерной виброметрии. Основные задачи работы:

1. Создание методологии использования лазерной виброметрии для корректировки спектральных характеристик численных виброакустических моделей.
2. Разработка метода неразрушающей дефектоскопии без использования эталонных измерений, основанного на применении лазерной виброметрии.
3. Разработка методологии прогнозирования и анализа гидроакустического поля, возбуждаемого при обтекании упругого тела потоком жидкости.

4. Исследование степени влияния упругих резонансов тела, возбуждаемого турбулентным потоком на характер гидроакустического поля.

5. Разработка подхода к анализу шумов и вибраций сложной механоакустической системы, основанного на бесконтактных лазерных измерениях вибраций.

6. Повышение разрешающей способности оценки вибраций вращающихся тел по результатам измерений лазером с неподвижным лучом.

Научная новизна

Научная новизна диссертации заключается в разработке базирующихся на лазерной виброметрии методов прогноза и анализа виброакустических полей объектов, колебания которых возбуждаются источниками различных типов.

1. Предложена основанная на использовании лазерной виброметрии методология корректировки вибрационных характеристик конечно-элементных моделей, позволяющая снизить погрешность численного моделирования ВАХ до 2–3 дБ и локализовывать механические дефекты.

2. Разработана расчетно-экспериментальная методология исследования колебаний упругих тел возбуждаемых турбулентным потоком жидкости, с помощью которой показано, что упругие резонансы добротных тел определяют максимальные уровни излучения гидродинамического шума в широком частотном диапазоне.

3. Предложен новый экспериментальный подход к исследованию взаимосвязи между шумами и вибрациями в механоакустических системах. Отличие предложенного подхода от ранее известных заключается в совместном сканирующем измерении распределения вибрации по поверхности тела и его акустического поля. Используя разработанный подход можно восстановить акустическое поле тела по результатам бесконтактных измерений нормальной компоненты виброскорости окружающего источник тонкого невесомого экрана.

4. Разработан новый метод оценки вибраций вращающихся тел по результатам измерений лазером с неподвижным лучом, который в отличие от известных подходов обеспечивает возможность частотного разрешения дискретных составляющих виброускорения.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенная методология корректировки вибрационных характеристик численных моделей легких объектов позволяет снизить погрешность численного моделирования до 2–3 дБ в третьоктавных полосах.

2. Представленный метод бесконтактной дефектоскопии позволяет локализовать дефект без выполнения эталонных измерений.

3. Предложенная методология анализа колебаний упругих тел, возбуждаемых турбулентным потоком жидкости, демонстрирует, что добротные

упругие резонансы определяют максимальные уровни излучения гидродинамического шума в широком частотном диапазоне и могут увеличивать акустическое излучение на величину до 20 дБ.

4. Сканирующая лазерная виброметрия позволяет выделить вклад вибраций во внутреннее акустическое поле механоакустических систем.

5. Зная распределение вибрации на тонком невесомом экране, расположенном перед источником звука можно спрогнозировать поле вдали от источника с погрешностью не более 2–3 дБ.

6. Разработанный метод оценки вибраций вращающегося тела для лазерного виброметра с неподвижным лучом, позволяет преодолеть ограничение, возникающее при использовании фурье-анализа для обработки – ухудшение частотного разрешения с увеличением частоты вращения тела.

Научная и практическая значимость

Научная и практическая значимость работы заключается в создании экспериментальных и расчетно-экспериментальных методов акустического проектирования, направленных на совершенствование виброакустических свойств машин и конструкций.

Разработанная методология исследования колебаний упругих тел в турбулентном потоке в совокупности с методом виброакустических характеристик использовались в совместных работах с АО "СПМБМ "Малахит", направленных на создание малошумных судовых движителей. Предложенный в работе подход к исследованию взаимосвязи между шумами и вибрациями сложной механоакустической конструкции применялся на практике для определения механизма формирования акустического поля внутри салона автомобиля производства ПАО "ГАЗ".

Методология исследования

В значительной степени методология описанных в работе исследований основана на сопоставлении результатов численных расчетов и измерений, выполненных по технике лазерной виброметрии, а также на дополнении расчетных данных экспериментальными и наоборот. Для осуществления численных расчетов использовались программные пакеты «ANSYS» и «CATEC». Для анализа численных и экспериментальных данных в работе используются методы цифровой обработки сигналов и математической статистики.

Степень достоверности и апробация результатов

Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановок задач, применяемыми методами исследования и результатами измерений.

Основные результаты работы докладывались на профильных научных конференциях [А1–А8] и опубликованы в 7 статьях в рецензируемых журна-

лах [A9–A15], неоднократно обсуждались на научных семинарах в ИПФ РАН. Разработанные в диссертации методы использованы при разработке программного обеспечения для ЭВМ, имеющего государственную регистрацию [A16].

Личный вклад автора

Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Помимо разработки методов, автор активно участвовал в их программной реализации и экспериментальной апробации, включая личное выполнение всех описанных в работе экспериментов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Список литературы состоит из 101 наименования. Общий объем работы составляет 120 страниц, включая 90 рисунков и 4 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава I посвящена использованию лазерных измерений вибраций с целью совершенствования численного моделирования.

В разделе 1.1 описывается разработанная методология корректировки вибрационных характеристик численных моделей по результатам измерений, выполненных с помощью лазерного виброметра. Важным преимуществом такого метода измерений является отсутствие искажений частотных характеристик исследуемого объекта, что позволяет осуществлять корректировку численных моделей, в том числе, довольно легких объектов (динамические характеристики которых могут быть искажены контактными измерительными системами). Лазерная виброметрия в сочетании с методом автоматической корректировки численных моделей, основанном на подборе оптимального распределения модуля упругости [7, A10, A16] позволяет эффективно осуществлять процедуру верификации численных моделей, что экспериментально обосновывается в данном разделе. Упомянутый метод основан на подборе нового распределения модуля упругости, при котором расчетные резонансы исследуемой конструкции «подгоняются» под результаты эксперимента. При этом считается, что соответствие расчетных и экспериментальных резонансов означает соответствие численной модели и реального объекта. На примере корректировки спектральных характеристик стальной рамы (рис. 1) продемонстрировано, что погрешность численного моделирования при использовании описанной методологии для отдельных третьоктавных полос может улучшаться на десятки децибел (рис. 2), средняя погрешность после процедуры доводки составляет 2–3 дБ.

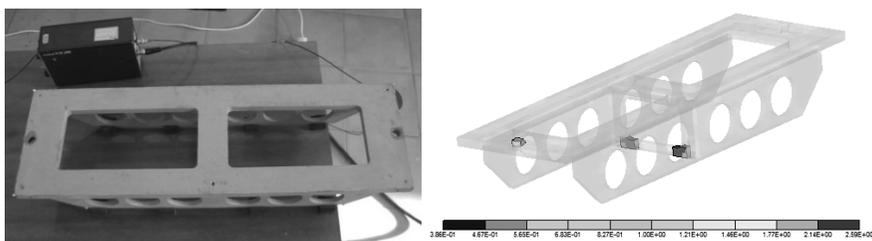


Рис. 1. Исследуемый объект (слева) и новое распределение относительного модуля упругости, найденное по методу [7] (справа)

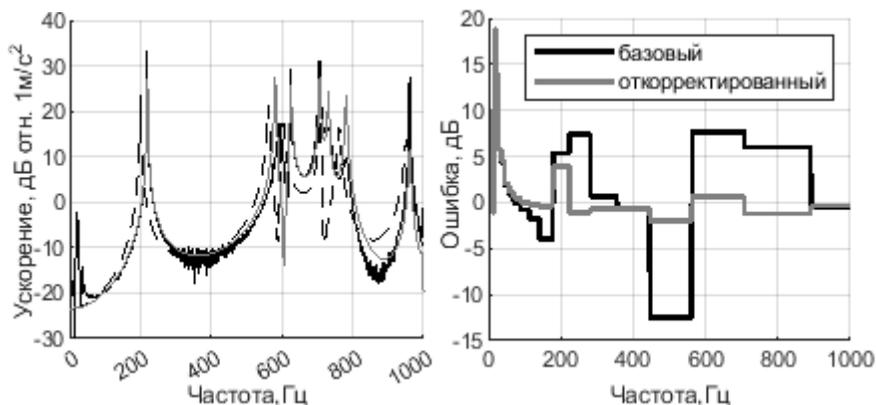


Рис. 2. Слева – сравнение результатов расчета для базового (сплошная черная кривая) и откорректированного (серая кривая) вариантов численной модели с результатами измерений (пунктирная черная кривая). Справа – разница уровней в третьооктавных полосах двух вариантов расчета с экспериментом

В разделе 1.2 предлагается новый метод локализации дефектов, который является следствием из описанной в предыдущем разделе процедуры корректировки спектральных характеристик численных моделей [A10]. Метод позволяет выполнять бесконтактную локализацию дефектов без использования эталонных измерений с неповрежденным образцом. Для этого, с использованием описанного в предыдущем разделе алгоритма корректировки, выполняется подстройка резонансов численной модели неповрежденного образца под экспериментальные резонансы поврежденного образца. На примере верификации численной модели лопатки турбины было выявлено, для соответствия эксперименту у модели должен быть существенно снижен модуль упругости элементов, находящихся в районе искусственно внесенного механического дефекта – пропила (рис. 3). Погрешность локализации дефекта в таком случае составила около 7%.

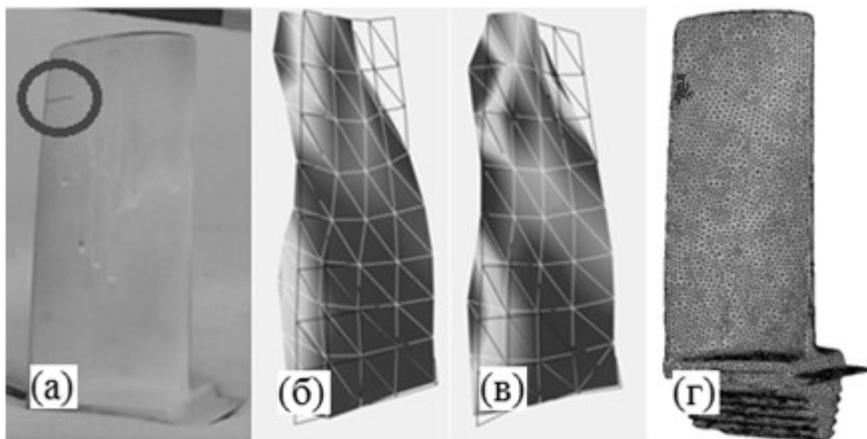


Рис. 3. Поиск дефектов лопатки турбины: *a* – лопатка с дефектом (пропил), *б* – форма колебаний неповрежденной лопатки на частоте 6524 Гц, *в* – форма колебаний поврежденной лопатки на частоте 6086 Гц, *г* – результат работы алгоритма корректировки (черным цветом отмечены элементы, у которых был уменьшен модуль упругости для соответствия измерениям)

Глава II посвящена развитию расчетно-экспериментальных методов исследования акустического поля упругих объектов обтекаемых турбулентным потоком. В **разделе 2.1** на примере измерений с профилем лопасти гребного винта, обтекаемого потоком воды на проточном стенде, демонстрируется прямая связь между упругими резонансами тела и максимумами акустического поля.

В условиях реального водоема сопоставить резонансные формы колебаний некоего обтекаемого тела, входящего в состав морского объекта, с максимумами его акустического поля не представляется возможным из-за сложности идентификации соответствующих максимумов в суммарном поле. Поэтому в **разделе 2.2** предложена расчетно-экспериментальная методология [A15], позволяющая выполнить такое сравнение. Методология основана на верификации численной модели объекта в воздухе по результатам лазерных измерений вибраций. К полученной модели с помощью метода конечных элементов добавляется объем жидкости и, затем, результаты расчетов новой модели в воде используются для интерпретации экспериментов, выполненных в условиях реальных водоемов. Отработка методологии осуществлялась на примере исследования излучения гребного винта в составе подводного аппарата. На рис. 4 сравниваются расчетные и экспериментальные коэффициенты передачи. Применение лазерного виброметра для измерений позволяет создать плотную измерительную сетку и определить формы колебаний, по которым в дальнейшем сопоставляются расчетные и экспериментальные максимумы.

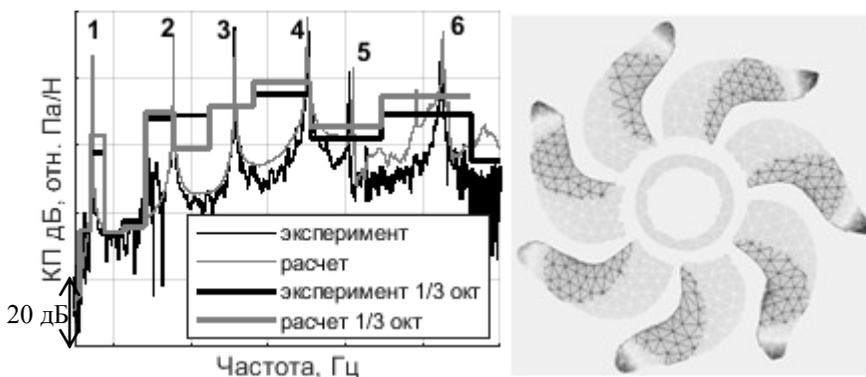


Рис. 4. Сравнение узкополосных и усредненных третьооктавных спектров расчетных и экспериментальных коэффициентов передачи в воздухе. Цифрами обозначены номера синфазных мод лопастей. Справа изображена экспериментальная форма колебаний №3

Расчетные и экспериментальные графики на рис. 4 хорошо соотносятся – разница в значениях резонансных частот составляет не более 1.5%, в уровнях 2–3 дБ. Это означает, что полученную модель, после добавления к ней численного объема воды можно использовать для анализа и расчетной оценки уровней излучения в воде и для интерпретации результатов измерений в водоеме. На рис. 5 представлено сравнение результатов эксперимента с винтом, установленным на подводный аппарат, и результатов расчета численной модели винта в воде.

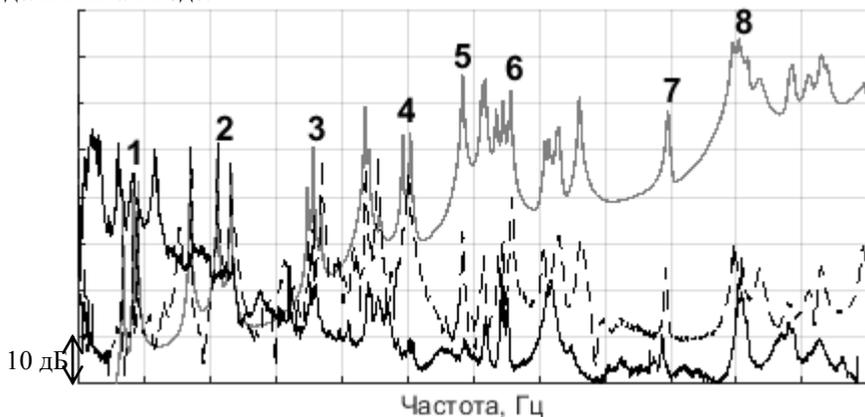


Рис. 5. Сравнение эксперимента с расчетом в воде. Серая кривая – расчетные резонансы свободного винта в воде, черная пунктирная кривая – экспериментальные резонансы винта, прикрепленного к аппарату, черная сплошная кривая – давление вблизи винта при его вращении с заданной частотой

На рис. 5 на расчетных и экспериментальных кривых наблюдаются максимумы с одинаковыми частотами, которые соответствуют изгибным резонансам лопастей винта. Максимумы с этими частотами наблюдаются для режимов с разной частотой вращения винта, в том числе и на ходу и в дальнем поле. Из графика для режима с вращением винта (рис. 5, черная сплошная кривая) следует, что в широком частотном диапазоне максимальные уровни акустического поля обусловлены влиянием упругих резонансов винта. Этот факт делает обязательным учет упругости при проектировании малошумных морских и речных движителей.

Задача развития методов исследования акустического поля, создаваемого при вращении упругого объекта, требует, в том числе, и совершенствования соответствующих расчетных методов. Создание таких сложных методов, требующих учета взаимного влияния гидродинамики и вибрации, невозможно осуществить без экспериментальной верификации результатов расчета. Для этой цели необходим достоверный набор экспериментальных данных – бенчмарк, содержащий информацию о гидродинамических и вибрационных характеристиках. В разделе 2.3 приведены результаты кросс-валидационных измерений (каждая величина измеряется двумя способами) пульсаций давления и вибраций, возникающих при обтекании цилиндра турбулентным потоком с разными скоростями [A9, A11]. Колебания цилиндра измерялись лазерным виброметром и акселерометром, встроенным в цилиндр. Пульсации давления в точке за цилиндром регистрировались с использованием техник PIV (Particle Image Velocity) и LDV (Laser Doppler Velocimetry). В результате разница в уровнях вибраций (рис. 6) и пульсаций давления (рис. 7), измеренная двумя способами на резонансных частотах, составила не более 10%.

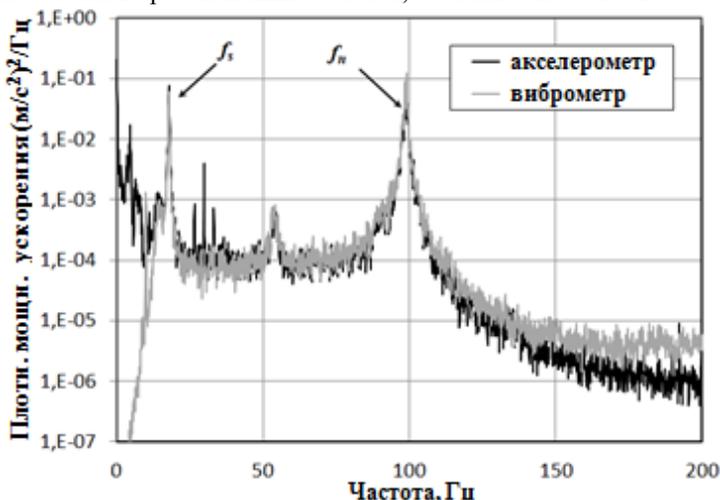


Рис. 6. Вибрации цилиндра, измеренные встроенным акселерометром и лазерным виброметром

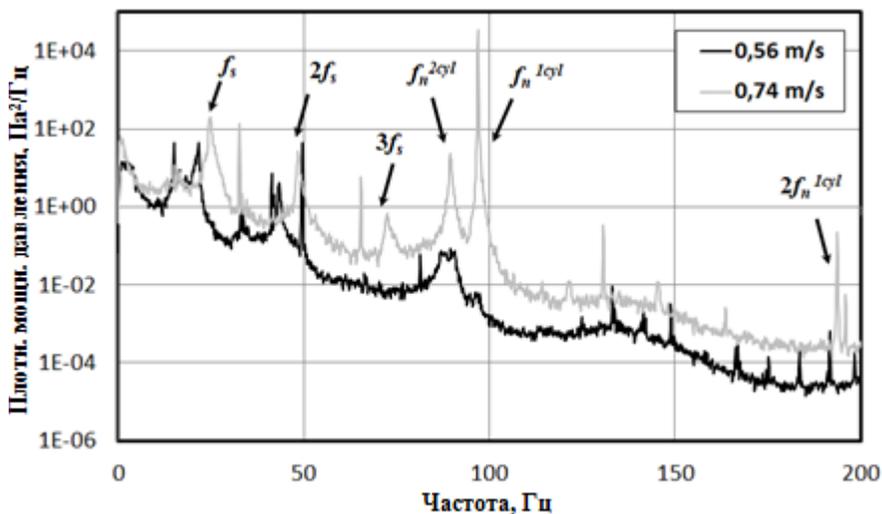


Рис. 7. Пульсации давления за цилиндром, измеренные на разных скоростях, до и после возникновения автоколебаний

Это свидетельствует о том, что полученный набор данных обладает высоким уровнем достоверности и, в дальнейшем, может использоваться для валидации численных расчетов колебаний тел, вызванных турбулентным потоком, с учетом взаимного влияния гидродинамики и вибрации.

Также было установлено, что в некотором диапазоне скоростей уровни давления на изгибном резонансе тела могут усиливаться за счет совпадения с гармоникой срывной гидродинамической частотой (рис. 7). В таком случае повышение уровней относительно режима обтекания без образования автоколебаний может достигать нескольких порядков.

Глава III посвящена исследованию взаимосвязи воздушного шума и вибраций с использованием лазерной виброметрии. Зачастую при решении прикладных задач информация о распределении вибрации по поверхности некоего объекта косвенным образом используется для анализа его акустического поля.

В разделе 3.1 на примере исследования шума в салоне автомобиля показано, как бесконтактные измерения вибрации могут быть применены для анализа акустического поля внутри некоторой замкнутой поверхности. Повышенные уровни шума в салоне могут образовываться за счет прямого переизлучения энергии от трех основных источников (двигатель, контакт колеса с дорогой, обтекание автомобиля потоком воздуха) через панели кабины (двери, крыша, пол, потолок и др.), либо при совпадении резонансов панелей с акустическими модами воздушного объема кабины. Для определения способа формирования поля необходимо в рамках одного исследования выявить резо-

нансы панелей кабины и акустические моды ее объема. В разделе 3.1 предлагается технология выполнения такого исследования, сделанного для автомобиля «ГАЗель Next». Резонансные формы колебаний панелей кабины измерялись сканирующим трехкомпонентным лазерным виброметром, для измерений резонансов воздушного объема кабины использовались многоэлементные антенные решетки микрофонов. На рис. 8 представлены усредненные по приемным элементам уровни давления в кабине автомобиля (слева) и усредненные по точкам на панелях кабины уровни вибрации (справа).

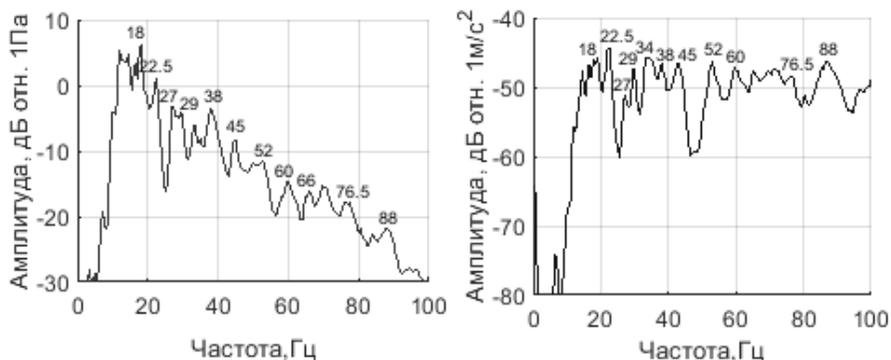


Рис. 8. Усредненные по приемным элементам уровни давления в кабине (слева), усредненные по точкам на панелях кабины уровни вибрации (справа)

В спектре давления замечено много максимумов, значения частот которых сильно расходятся с прогнозом мод в приближении жестких стенок. Такой же набор максимумов наблюдается и в спектре вибраций. По результатам лазерных измерений распределения вибрации по кабине было показано, что каждый из этих максимумов соответствует форме колебаний какой-либо из панелей (примеры форм изображены на рис. 9).

В результате в **разделе 3.1** была предложена технология совместных исследований акустического поля внутри кабины, основанная на лазерных измерениях вибраций на ее поверхности. С помощью предложенной технологии удалось показать, что для конкретного автомобиля повышенные уровни звукового давления в салоне определяется степенью возбуждения резонансных вибраций кабины в целом и ее различных элементов, а не за счет совпадения какого-то из структурных резонансов кабины с акустической модой ее воздушного объема.

В **разделе 3.2** предлагается метод прогнозирования поля вдали от источника по результатам измерения распределения вибраций с помощью лазерного виброметра на тонком невесомом экране [A10]. Использование тонкого невесомого экрана совместно с лазерными бесконтактными измерениями вибрации может являться альтернативой традиционным техническим реше-

ниям, используемым для поиска распределения акустических полей в пространстве – решеткам из микрофонов или гидрофонов. В разделе описывается алгоритм, по которому осуществляется прогноз поля в точке, находящейся на удалении от источника, основанный на формуле Кирхгофа [35]. На рис. 10 изображено характерное мгновенное распределение поля виброскорости по экрану (слева) и результаты апробации метода для некоторой точки в сравнении с полем, измеренным в этой же точке напрямую (справа).

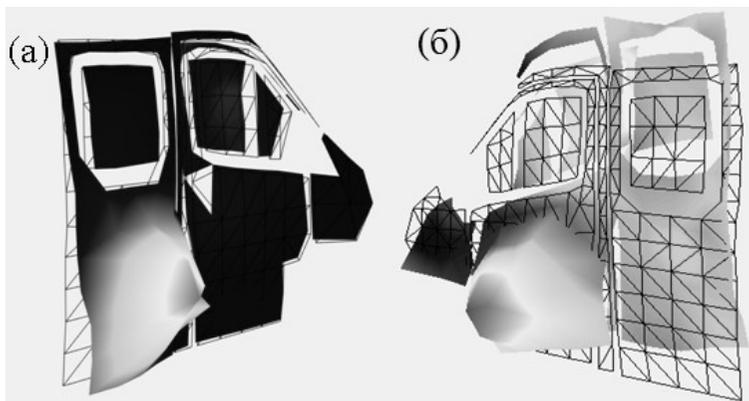


Рис. 9. Формы колебаний кабины на частоте 22.5 Гц (а) и 34 Гц (б)

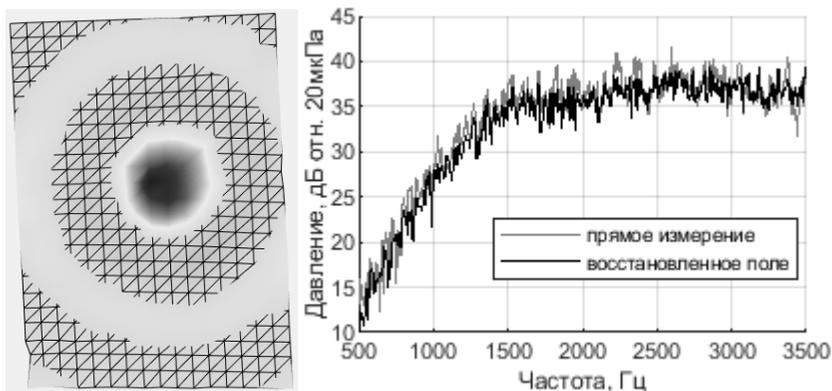


Рис. 10. Мгновенное распределение поля виброскорости по экрану на частоте 1 кГц (слева). Сравнение прямого и восстановленного по описанному в разделе методу акустических полей в некоторой точке (справа)

Из представленного сравнения следует, что спрогнозированное поле хорошо совпадает с измеренным напрямую, разница в широком частотном диапазоне составляет не более 2–3 дБ. Тем самым демонстрируется принципиальная применимость метода для оценки поля вдали от объекта измерений.

В главе IV предложен способ оценки вибраций вращающихся тел, измеренных с помощью лазерного виброметра с неподвижным лучом. В разделе 4.1 описывается основной недостаток такого подхода к измерениям – ухудшение частотного разрешения с увеличением частоты вращения исследуемого объекта. В разделе 4.2 предлагается способ, позволяющий преодолеть указанный недостаток, основанный на методе наименьших квадратов (МНК) [A12]. Показано, что в случае двух близко расположенных дискретных составляющих целесообразно использовать МНК квадратов с моделью сигнала, включающей в явном виде две синусоиды с неизвестными частотами. Работоспособность предложенного подхода продемонстрирована экспериментально по результатам измерений вибраций вращающейся стальной пластины, проходящей через неподвижный луч лазера (рис. 11). Заметно, что при увеличении частоты вращения перестали разрешаться два изгибных резонанса пластины по причине недостаточного времени скольжения луча по лопасти. Использование МНК позволяет разрешить по частоте исследуемые дискретные составляющие и выполнить оценку их амплитуды.

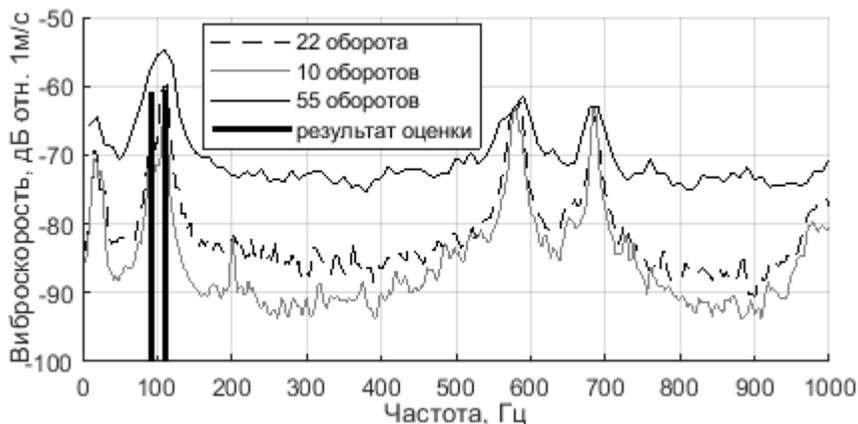


Рис. 11. Результаты применения метода, наложенные на спектры колебаний пластины при разных скоростях вращения. Вертикальные черные линии демонстрируют оценку частоты и амплитуды колебаний

Для увеличения точности оценки частоты и вероятности разрешения частот можно применять некогерентное и когерентное усреднение результатов по количеству проходов измеряемого объекта через луч. Эффективность усреднения продемонстрирована с помощью численного моделирования. В результате, с помощью предложенного метода, оценка вибраций может производиться при скоростях вращения исследуемого объекта минимум в 4 раза, превышающих предельно возможные скорости для использования фурье-анализа.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Решена задача разработки экспериментальных и расчетно-экспериментальных методов виброакустического проектирования, основанных на использовании лазерной виброметрии. Разработанные в диссертации методы применимы для анализа полей, сгенерированных гидродинамическими и силовыми источниками, воздушным шумом, а также для совершенствования методов численного моделирования.

Предложена методология доводки вибрационных характеристик численных моделей. Методология основана на применении лазерной виброметрии и алгоритма автоматической доводки по экспериментальным резонансным формам колебаний. Экспериментальным образом установлена эффективность применения методологии при верификации численных моделей, в том числе, относительно легких объектов (динамические характеристики которых могут быть заметно изменены контактными системами измерений) Погрешность численного моделирования для отдельных третьоктавных полос может улучшаться на десятки децибел, средняя погрешность после процедуры доводки составляет 2–3 дБ. На примере верификации численной модели лопатки турбины показано, что разработанная методология может быть использована для локализации дефектов, погрешность локализации составила 7%.

Разработана методология исследования колебаний упругих тел, возбуждаемых турбулентным потоком жидкости. Методология основана на применении лазерных измерений вибраций исследуемого объекта в воздухе с последующим учетом окружающей жидкости с помощью МКЭ. Результаты практической апробации методологии показали, что упругие резонансы могут определять максимальные уровни излучения гидродинамического шума в широком частотном диапазоне. В частности, для рассматриваемого в диссертации вращающегося судового гребного винта превышение резонансных уровней над постоянной составляющей спектра достигало 20 дБ. Перекрестные экспериментальные исследования, выполненные на проливном стенде, продемонстрировали, что уровни давления на упругих резонансах тела могут получать дополнительное усиление (до нескольких порядков, как в случае с рассматриваемым в работе обтеканием цилиндра) при совпадении значения резонанса и гармоники срывной гидродинамической частоты. Погрешность измерений уровней вибраций на резонансах составила при этом менее 10%.

Предложен экспериментальный подход к анализу шумов и вибраций механоакустической системы. Подход состоит из двух методов. Первый метод основан на поиске распределения акустических полей по измерениям нормальной компоненты скорости на тонком невесомом экране. Результат восстановления поля источника в некоторой точке пространства по описанному методу показал хорошее соответствие с результатом прямого измерения поля, разница в рассматриваемом частотном диапазоне не превышала 3–4 дБ. Второй метод позволяет определить механизм формирования акустического по-

ля, и основан на лазерных бесконтактных измерениях резонансов поверхности некоторой конструкции и поля давления внутри нее. С помощью этого метода, на конкретном примере показано, что звуковое поле в кабине автомобиля определяется, степенью возбуждения резонансных вибраций ее элементов, а не влиянием резонанса ее акустической полости.

Предложен экспериментальный метод оценки вибраций вращающихся тел, позволяющий преодолеть основной недостаток использования лазерного виброметра с неподвижным лучом для таких измерений – ухудшение частотного разрешения с увеличением частоты вращения тела при использовании фурье-анализа для обработки результатов. Показано, что в случае двух расположенных рядом спектральных составляющих целесообразно применять метод наименьших квадратов с моделью сигнала, включающей в явном виде две синусоиды с неизвестными частотами. Работоспособность предложенного подхода продемонстрирована на экспериментальных данных. Для увеличения точности оценки частоты и вероятности разрешения частот предложено использовать некогерентное усреднение между импульсами. В результате, с помощью предложенного метода, оценка вибраций может производиться при скоростях вращения исследуемого объекта минимум в 4 раза, превышающих предельно возможные скорости для использования фурье-анализа.

Разработанные в диссертации методы исследования в перспективе могут быть использованы с целью проектирования более совершенных в плане виброакустических полей объектов техники, колебания которых возбуждаются источниками воздушного шума, силовыми и гидродинамическими источниками. В частности, характерным направлением для применения представленных методов является разработка малошумных судовых движителей.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rothberg S. J., Allen M. S., Castellini P., Di Maio D., Dirckx J. J. J., Ewins D. J., Vignola J. F.*. An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement // *Opt. and Las. in Eng.* 2017. V. 99. P. 11–22.
2. *Staszewski W. J., bin Jenal R., Klepka A., Szwedo M., Uhl T.* A Review of Laser Doppler Vibrometry for Structural Health Monitoring Applications // *Key Eng. Mat.* 2012. V. 518. P. 1–15.
3. *Sharma J. K., Parashar S. K.* Experimental Investigation Using Laser Vibrometer and Finite Element Modeling for Modal Analysis of Camshaft // *Lecture Notes in Electrical Engineering.* 2019. P. 121–129.
4. *Dai K., Boyajian D., Liu W., Chen S.-E., Scott J., Schmieder M.* Laser-Based Field Measurement for a Bridge Finite-Element Model Validation // *Journal of Performance of Constructed Facilities.* 2014. V. 28, № 5. 04014024.

5. *Ranjbar M., Marburg S.* Fast vibroacoustic optimization of mechanical structures using artificial neural networks // *Int. J. Mech. Engineering and Applications*. 2013. V. 1, № 3. P. 64–68.
6. *Kim S. Y.* Topology design optimization for vibration reduction: reducible design variable method: PhD thesis / Queen's University. Canada, 2011.
7. *Суворов А.С., Соков Е.М., Вьюшкина И.А.* Регулярный алгоритм автоматической корректировки спектральных характеристик акустических конечно-элементных моделей // *Акустический журнал*. 2016. Т. 62, № 5. С. 592–599.
8. *Ghoshal A., Sundaresan M. J., Schulz M. J., Frank Pai.* Structural health monitoring techniques for wind turbine blades // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2000. V. 85, № 3. P. 309–324.
9. *Di Maio D., Zampognaro N., Zang C., Ewins D. J.* Effect of vibration excitation locations on structural damage detection using the CSLDV technique: simulation and testing // *Seventh International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*, June 2006. V. 6345. 634500-1.
10. <https://www.polytec.com/sea/vibrometry/areas-of-application/materials-research-and-testing/surface-waves>.
11. *Коробов А.И., Изосимова М.Ю.* Нелинейные волны Лэмба в металлической пластинке с дефектами // *Акустический журнал*. 2006. Т. 52, № 5. С. 683–692.
12. *Коробов А.И., Изосимова М.Ю., Одина Н.И.* Диагностика металлических пластин с остаточными напряжениями и дефектами методами нелинейной лазерной сканирующей виброметрии // *Акустический журнал*. 2015. Т. 61, № 3. С. 317.
13. *Zhu C., Gaggero T., Makris N.C., Raital P.* Underwater Sound Characteristics of a Ship with Controllable Pitch Propeller // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. V. 10, № 3. 328.
14. *Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г.* Оценки акустических шумов, генерируемых вспомогательными судами, работающими с нефтедобывающими платформами // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61, № 5. С. 605–613.
15. *Ильин В.П., Левковский Ю.Л.* Исследование влияния вибраций крыла на его кромочный шум // *Акуст. журн.* 1993. Т. 39, № 3. С. 489–497.
16. *Chae E. J., Akcabay D. T., Lelong A., Astolfi J. A., Young Y. L.* Numerical and experimental investigation of natural flow-induced vibrations of flexible hydrofoils // *Physics of Fluids*. 2016. V. 28, № 7. 075102.
17. *Abbas S. H., Jang J.-K., Kim D.-H., Lee J.-R.* Underwater vibration analysis method for rotating propeller blades using laser Doppler vibrometer // *Optics and Lasers in Engineering*. 2020. V. 132. 106133.
18. *Chevalier F., Bordier L., Leblond C., Sainclair F., Sanchez J.-M., Serre G.* Numerical prediction of the noise radiated from silent non cavitating marine propellers // *OCEANS 2019*, 17-20 June 2019. Marseille, France, 2019. P. 1–4.

19. *Kaneko S., Nakamura T., Inada F.* Flow-Induced Vibrations Classifications and Lessons from Practical Experiences. Elsevier, 2014. 410 p.
20. *Paidoussis M.P.* Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. Vol. 1. Academic press, 1998. 572 p.
21. *Paidoussis M.P.* Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. Vol. 2. Academic press, 2004. 888 p.
22. *Schell J., Johansmann M., Schüssler M., Oliver D., Palan V.* Three Dimensional Vibration Testing in Automotive Applications Utilizing a New Non-Contact Scanning Method // SAE Technical Paper Series, 3-6 April 2006. Detroit, Michigan, USA, 2006. P. 1025–1032.
23. [https://www.polytec.com/eu/vibrometry/areas of application /automotive/ aeroacoustics](https://www.polytec.com/eu/vibrometry/areas%20of%20application/automotive/aeroacoustics)
24. *Yoshimura T., Saito M., Maruyama S., Iba S.* Modal analysis of automotive cabin by multiple acoustic excitation // Proceedings of ISMA2012-USD2012, 17-19 September 2012. Leuven, Belgium, 2012. P. 4051–4060.
25. *Accardo G., El-kafafy M., Peeters B., Bianciardi F., Brandolisio D., Janssens K., Martarelli M.* Experimental Acoustic Modal Analysis of an Automotive Cabin // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. 2015. P. 33–58.
26. *Salin M. B., Kosteev D. A.* Nearfield acoustic holography-based methods for far field prediction // Applied Acoustics. 2020. V. 159. 107099.
27. *Williams E. G., Maynard J. D., Skudrzyk E.* Sound source reconstructions using a microphone array // JASA. 1980. V. 68, № 1. P. 340–344.
28. *E.G. Williams.* Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography. Academic Press, London, 1999. P. 306.
29. *Leclère Q., Laulagnet B.* Nearfield acoustic holography using a laser vibrometer and a light membrane // The Journal of the Acoustical Society of America. 2009. V. 126, № 3. P. 1245–1249.
30. *Johansmann M., Fritzsche M., Schell J.* A New Method for Measurement of Rotating Objects Utilizing Laser Doppler Vibrometry Combined with an Optical Derotator with Focus on Automotive Applications // SAE Technical Paper Series, 19-21 January 2011. SIAT, India, 2011.
31. *Lutzmann P., Göhler B., Hill C.A., van Putten F.* Laser vibration sensing at Fraunhofer IOSB: review and applications // Opt. Eng. 2016. V. 56, № 3. 031215.
32. *Reinhardt A.K., Kadambi J.R., Quinn R.D.* Laser vibrometry measurements of rotating blade vibrations // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1995. V. 117, № 3. P. 484–488.
33. *Oberholster A. J., Heyns P. S.* Online condition monitoring of axial-flow turbomachinery blades using rotor-axial Eulerian laser Doppler vibrometry // Mechanical Systems and Signal Processing. 2009. V. 23, № 5. P. 1634–1643.

34. *Oberholster A. J., Heyns P. S.* Eulerian laser Doppler vibrometry: Online blade damage identification on a multi-blade test rotor // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011. V. 25, № 1. P. 344–359.
35. *Шендеров Е. Л.* Волновые задачи гидроакустики. Л. : Судостроение, 1972. 352 стр.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [A1] *Леонтьев Н. И., Стуленков А. В., Маслов М. Г., Шмелев Е. И., Игрушкин С. И.* Экспериментальное исследование коэффициентов демпфирования образцов из стали и композитного материала // XXIII Нижегородская сессия молодых ученых. Н. Новгород, ННГУ, 2018. Т. 1. С. 16–19.
- [A2] *Стуленков А.В., Суворов А.С.* Современные возможности моделирования и технологии верификации сложных механоакустических систем // *Корабельная ядерная энергетика-2018: тезисы докладов*. Н. Новгород, АО «ОКБМ Африкантов», 2018. С. 66–67.
- [A3] *Стуленков А.В., Бритенков А.К.* Исследование электромеханических характеристик излучающих элементов компактного гидроакустического преобразователя сложной формы методом лазерной виброметрии // XXIII научная конференция по радиофизике. Н. Новгород, ННГУ, 2019. С. 264–266.
- [A4] *Костеев Д.А., Салин М.Б., Стуленков А.В., Суворов А.С.* Восстановление поля колебаний упругого тела по малому числу датчиков // XXIII научная конференция по радиофизике. Н. Новгород, ННГУ, 2019. С. 425–429.
- [A5] *Коротин П.И., Стуленков А.В., Суворов А.С.* Использование бесконтактных сканирующих измерений для исследования характеристик сложных виброакустических систем // Совет по акустике РАН, Успехи акустики – 2019, 21 мая 2019, Москва.
- [A6] *Бритенков А.К., Норкин М.С., Захаров С.Б., Травин Р.В., Стуленков А.В.* Электромеханические характеристики компактного гидроакустического преобразователя со сложной формой излучающей оболочки // XXXIV сессия Российского акустического общества, 14-18 февраля 2022 года, Москва. С. 779–786.
- [A7] *Артельный В.В., Родионов А.А., Стуленков А.В.* Применение лазерной виброметрии с неподвижным лучом для оценки вибраций вращающихся тел // XXXIV сессия Российского акустического общества, 14-18 февраля 2022 года, Москва. С. 1109–1115.
- [A8] *Бритенков А.К., Норкин М.С., Стуленков А.В., Травин Р.В., Захаров С.Б.* Исследование резонансных характеристик компактных низкочастотных гидроакустических преобразователей сложной формы в воздухе с помощью лазерной виброметрии // Труды XXVI научной конференции по

- радиофизике, посвященной 120-летию М.Т. Греховой: материалы конференции. Нижний Новгород, 2022. С. 233–236.
- [A9] Будников А.В., Шмелев Е.И., Куликов Д.А., Логинов А.В., Дмитриев С.М., Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Лобанов П.Д., Стуленков А.Н., Суворов А.С. Измерения гидродинамических и вибрационных характеристик для валидации численных расчетов возбуждения конструкций потоком // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10, № 3. С. 223–232.
- [A10] А.В. Стуленков, П.И. Коротин, А.С. Суворов. Новые применения лазерной виброметрии // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84, № 6.
- [A11] Bolshukhin, M. A., Budnikov, A. V., Shmelev, E. I., Kulikov, D. A., Loginov, A. V., Pribaturin, N. A., Stulenkov, A. V. Dynamic measurements of the flow and structure oscillations to validate FSI calculations // Nuclear Engineering and Design. 2021. V. 381. 111336.
- [A12] В.В. Артельный, А.А. Родионов, А.В. Стуленков. Повышение частотного разрешения при измерении вибраций вращающихся тел с помощью лазерной виброметрии с неподвижным лучом // Акустический журнал. 2023. Т. 69, № 3. С. 351–356.
- [A13] А.К. Бритенков, М.С. Норкин, С.Б. Захаров, Р.В. Травин, А.В. Стуленков. Сравнительные исследования вибромеханических характеристик компактных гидроакустических преобразователей продольно-изгибного типа со сложной формой излучающей оболочки // Акустический журнал. 2023. Т. 69, №6. С. 808–816.
- [A14] А.К. Бритенков, М.С. Норкин, А.В. Стуленков, Р.В. Травин. Исследование электроакустических характеристик компактного 3D НЧИ – низкочастотного гидроакустического преобразователя продольно-изгибного типа сложной формы // Научное приборостроение. 2023. Т. 33, №4. С. 28–39.
- [A15] А.В. Стуленков, В.В. Артельный, П.И. Коротин, А.С. Суворов, И.Е. Горбунцов, М.С. Норкин, С.Г. Зайцева. Физическое моделирование гидроакустического поля гребного винта // Акустический журнал. 2024. Т. 70, №5. С. 99–108.
- [A16] О.Ф. Севрюков, Е.М. Соков, А.С. Суворов, В.В. Евстифеев, К.С. Коновалов, Д.А. Львова, А.А. Родионов, М.Б. Салин, Н.А. Кутузов, А.В. Стуленков. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661249 «САТЕС».

СТУЛЕНКОВ Андрей Вадимович

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ**

Автореферат

Подписано к печати 24.03.2025 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 8(2025).

Отпечатано в типографии ФИЦ
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, Н. Новгород, ул. Ульянова, 46