

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Расчетно-экспериментальное виброакустическое проектирование с
использованием лазерной виброметрии»**

Аспирант: Стуленков Андрей Вадимович

(подпись аспиранта)

Научный руководитель: Суворов Анатолий
Сергеевич, кандидат физ.-мат. наук, зав. отделом 740

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:
03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:
01.04.06 Акустика

Форма обучения: очная

Актуальность. Конечной целью виброакустического проектирования является создание конструкций с заданными виброакустическими характеристиками. Ряд вопросов, связанный с принципом формирования вибрационных и акустических полей конструкции может быть решен путем экспериментальных исследований на масштабных моделях и прототипах. Другим способом достижения подобной цели является применение численных расчетов. Не смотря на сильное развитие численных методов за последнее время, вопрос об адекватности моделей и результатов, полученных с помощью них, все еще остается актуальным. Достоверность численных моделей, как правило, подтверждается результатами измерений. Таким образом, в процессе проектирования возникает необходимость совместного использования результатов расчета и измерений.

Точность измерений является важным фактором, как при выполнении прямых экспериментальных исследований, так и при формировании набора данных для осуществления верификации численных моделей. Для измерения вибрационных полей традиционно применяются наборы из пьезоакселерометров или пьезопластин. Альтернативным методом измерения вибраций является лазерная доплеровская виброметрия. Основным преимуществом лазерной виброметрии перед традиционными средствами является возможность измерять вибрацию в большом наборе точек, не оказывая влияния на динамические характеристики объекта.

В силу своих особенностей лазерная виброметрия активно применяется для исследования колебаний небольших легких объектов. Среди работ, посвященных исследованием вибраций легких объектов, отдельное внимание уделяется исследованием полимерных композитных материалов и конструкциям, изготовленным из них. Существует довольно много работ, в которых для различных целей исследуются динамические характеристики композитных материалов, такие как частотные отклики, формы колебаний, жесткость, коэффициент демпфирования [1-4]. Использование композитных материалов становится все более актуальным в промышленности, в частности для изготовления корабельного оборудования, как один из способов снижения вибрации за счет высокого конструкционного коэффициента демпфирования. Отсюда следует актуальность измерения величины такого коэффициента в воде и воздухе. Существует ряд работ посвященных измерению коэффициента демпфирования с помощью лазерного виброметра [5,6]. В настоящей работе будет описан эксперимент, по результатам которого определяются коэффициенты демпфирования образцов из стали и композита в воде и на воздухе. Цель измерений – выяснить, какой материал больше подходит для изготовления корабельных установок в плане снижения их вибраций.

В автомобильной промышленности одним из наиболее важных требований при проектировании конкурентоспособного автомобиля является обеспечение низкого уровня шума в салоне. Акустическое поле в салоне обусловлено воздействием трех основных источников[7]:

работой двигателя, взаимодействием автомобиля с дорогой (шум от неровного покрытия, удары об кочки, ямы), набегающий поток воздуха (при скоростях движения свыше 100км/ч). Конечным передатчиком энергии от источников в салон являются вибрирующие панели кабины автомобиля. Вибрация на панелях возникает из-за передачи энергии по структурным связям или через воздух. Приемником в салоне может восприниматься напрямую переизлученное панелями поле, также, в случае совпадения резонансов панелей и воздушной полости салона, акустическое поле создаваемое панелями может получить дополнительное усиление. Соответственно, для понимания природы акустических полей в кабине и элементов ответственных за повышенное шумоизлучение необходимо получить информацию о модах кузова (рамы), панелей кузова, воздушного объема кабины. Экспериментальным исследованиям мод воздушного объема кабины также уделяется немало внимания [8-10], также как и измерению колебаний панелей кузова и кабины с помощью лазерного виброметра. При этом в процессе обзора литературы по данной тематике, не удалось найти работ, в которых описывалось бы выполнение этих задач в рамках одного исследования. В данной работе будут приведены результаты подобных совместных измерений с целью описания взаимосвязь между полем внутри салона и резонансами панелей кузова автомобиля.

Измерение вибраций тел, находящихся не в лабораторных, а в рабочих условиях всегда представляло большой интерес. В немалой степени это относится к измерению вибраций вращающихся объектов. В исследовании вибраций вращающихся объектов 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. В системах первого типа слежения лазера за точкой обеспечивается посредством использования вращающейся призмы Дове[11-13]. Системы второго типа основаны на совместном использовании лазерного виброметра и видеокамеры в совокупности с алгоритмом обработки изображения в режиме реального времени[14].

Другой подход – это измерение без систем слежения за конкретной точкой, в таком применяется лазерный виброметр, через неподвижный луч которого проходит вращающийся объект. Такой подход хоть и является более примитивным, тем не менее, обладает рядом преимуществ. Первое преимущество заключается в том, что часто бывает так, что вращающаяся деталь (диск, винт, пропеллер) закрыта кожухом или направляющими, которые мешают непрерывному движению луча за точкой. В таком случае, выполнить измерения получится только неподвижным лазером, направив его в доступную для обзора точку. Второе преимущество заключается в том, что измерительные системы с отслеживанием в силу различных факторов на несколько порядков менее распространены.

В работе [15] была описана экспериментальная установка для измерений вибрации вращающихся тел неподвижным лазером. Была продемонстрирована возможность определения амплитуды и частоты колебаний подобным методом. В данной работе также будет описана техника измерений неподвижным лазером, будут более подробно описаны проблемы, с которыми можно столкнуться при ее использовании. Главным отличием данной работы от всех остальных является метод обработки результатов измерений, который позволяет отчасти преодолеть основной недостаток способа измерений вибраций вращающихся тел неподвижным лазером, а именно понижение частотного разрешения с увеличением частоты вращения. С помощью предложенного метода обработки можно разрешить частоты, которые не разрешаются в случае использования Фурье-обработки. Другим отличием описываемой в разделе техники от применяемой в работе [15], является отсутствие в необходимости использования дополнительного измерительного оборудования – нужен только лазерный виброметр.

Исследование распределения акустических полей источников в пространстве является важной задачей. В ходе различных исследований может возникать необходимость в определении акустических полей как вблизи, так и вдали от источника. Одной из наиболее популярных техник является акустическая голография. Акустическая голография позволяет восстанавливать трехмерное распределение поля давления и скорости, также можно восстанавливать распределение вибраций на источнике звука [16]. Как правило, для осуществления измерений по технике акустической голографии, используются протяженные решетки из микрофонов или гидрофонов. Такие решетки могут быть одномерными [17], плоскими [17-20], в форме креста [21] или иметь более сложную форму.

В работе [22] впервые было предложено использование тонкого невесомого экрана для регистрации скорости колебаний частиц среды вместо планарной антенной решетки. В работах [23, 24] рассматривается совместное применение такого экрана с измерениями нормальной компоненты колебательной скорости сканирующим лазерным виброметром. Подобное решение позволяет значительно повысить количество измерительных точек по сравнению с использованием планарных антенных решеток, вследствие чего можно достичь существенного улучшения пространственного разрешения. Обзор литературы показал, что измерение вибраций лазером на тонком экране применяется для поиска источника звука и распределения уровней вибраций на источнике. В данной работе же приведено исследование возможности применимости измерений распределения вибраций по тонкому экрану для оценки акустического поля вдали от исследуемого объекта.

Возможность выполнять измерения в большом количестве точек без влияния на динамические характеристики исследуемого объекта имеет значение для задачи экспериментальной верификации численных моделей. Для выполнения этой задачи желательно иметь возможность сравнивать численные и экспериментальные данные в большом количестве

точек для определения соответствия расчетных и экспериментальных форм колебаний. Часто, в силу различных причин, удается обеспечить нужное количество измерительных точек в эксперименте. В данной работе будет описан метод повышения пространственного разрешения экспериментальных данных, подразумевающий интерполяцию результатов измерений в относительно небольшом количестве точек, результатами численного расчета.

Другим важным аспектом численного моделирования является возможность исправления КЭМ по результатам эксперимента. Корректировка параметров КЭМ в ручном режиме по измеренным на прототипе или модели конструкции вибрационным или акустическим полям в общем случае является не решаемой задачей, так как количество степеней свободы КЭМ может достигать нескольких миллионов. Известно несколько автоматических способов доводки параметров численных моделей [25-27]. Одним из эффективных методов, позволяющим учитывать, в том числе различные производственные дефекты и геометрические отклонения формы и размеров без глубокой детализации корректируемой численной модели, является метод автоматической доводки, описанный в работе [28]. Предполагается, что для корректного расчета акустического и вибрационного полей необходимо выполнение двух условий: совпадение собственных резонансных частот и форм колебаний объекта и его КЭМ. Алгоритм, описанный в работе [28], позволяет изменять значения параметров КЭМ для приведения вычисленных значений частот в соответствие с экспериментом при сохранении форм собственных колебаний за счет изменения параметров жесткости элементов КЭМ.

Точность доводки численной модели также определяется корректностью измерений. В случае осуществления доводки относительно легкого объекта в широком частотном диапазоне необходимо измерить много резонансных форм колебаний, а значит нужно много измерительных точек. Набора вибродатчиков может существенно повлиять на резонансы конструкции, лазерная виброметрия избавлена от этого недостатка. В настоящей работе будет описана процедура автоматической доводки численной модели по алгоритму [28] по формам колебаний, измеренным трехкомпонентным лазерным виброметром.

Лазерная доплеровская виброметрия зарекомендовала себя как эффективное средство локализации дефектов. Возможность измерять вибрации тел бесконтактно в совокупности плотной измерительной сеткой является важным преимуществом перед другими техниками поиска дефектов. Особенно важными эти преимущества становятся при работе легкими структурами. Поиску дефектов с помощью лазерной виброметрии посвящено довольно много работ. В некоторых из них сам факт наличия дефекта оценивается путем сравнения АЧХ и резонансных форм колебания с неповрежденным эталоном [29,30]. Существуют работы, в которых дефект локализуется путем анализа разницы передаточных функций между соседними точками для эталонного и поврежденного образца [30]. Еще один подход к поиску дефектов основан на использовании волн Лэмба [31]. Данный подход примечателен тем, что позволяет

обнаруживать, в том числе и скрытые в толще материала дефекты. При использовании такого метода дефекты определяются по возмущению поля скорости. В данной работе предполагается использовать для локализации дефекта лазерные измерения вибрации совместно с ранее описанным методом доводки вибрационных характеристик по резонансным частотам [28].

Целью работы является разработка экспериментальных и расчетно-экспериментальных методов исследования с использованием бесконтактных лазерных средств измерения вибраций для создания более совершенных в плане виброакустических полей объектов техники. Для этого были решены следующие задачи:

- разработка технологии исследования динамических характеристик вязкоупругих объектов в части определения коэффициентов демпфирования в воздухе и в воде;
- разработка метода совместного измерения акустического поля внутри салона и резонансов панелей кабины автомобиля;
- предложен метод исследования вибраций вращающихся объектов неподвижным лазером без использования технических средств, обеспечивающих следование луча за фиксированной точкой объекта измерений;
- выполнено исследование возможности поиска распределения акустических полей вдали от источника по измерениям нормальной компоненты скорости на тонком невесомом экране.
- предложен метод повышения пространственного разрешения экспериментальных данных результатами численного расчета;
- описана технология доводки численных моделей по результатам экспериментального модового анализа, выполненного с использованием лазерного виброметра;
- продемонстрирована возможность локализации дефекта при совместном использовании алгоритма автоматической доводки численных моделей и лазерных измерений вибрации.

Научная новизна работы заключается в новых методах исследования:

- была отработана технология измерений коэффициентов демпфирования у малых образцов из композита в воде и на воздухе. Было показано, что влияние воды существенно понижает превосходство композитного образца над стальным в плане демпфирующих свойств;
- была предложена технология совместного измерения акустического поля внутри салона и резонансов панелей кабины автомобиля направленный на определение механизма формирования акустического поля в салоне. На конкретном примере было показано, что звуковое поле в кабине (уровни на резонансных частотах) определяется степенью возбуждения резонансных вибраций кабины в целом (на резонансах ее амортизации и глобальных деформаций) и ее различных элементов (дверей, панелей стенок, пола и крыши);

- была предложена схема измерений вибраций вращающихся объектов лазерным виброметром с неподвижным лучом. Показано, что можно определить значения частот изгибных резонансов объекта без использования дополнительного вспомогательного оборудования. Продемонстрировано, что можно отчасти преодолеть существенный недостаток подобного метода измерений, связанный с понижением частотного разрешения с увеличением частоты вращения с помощью описанного в работе метода обработки.

- была описана техника поиска распределения акустических полей вдали от источника по измерениям нормальной компоненты скорости на тонком невесомом экране. Результат восстановления поля источника в некоторой точке пространства по описанной технике показал хорошее соответствие с результатом прямого измерения поля.

- был разработан метод повышения пространственного разрешения экспериментальных данных, результатами численного расчета;

- описана процедура доводки численных моделей относительно небольших объектов по результатам экспериментального модового анализа, выполненного с использованием лазерного виброметра, продемонстрирована эффективность подобной процедуры;

- был предложен метод локализации дефекта основанный на совместном использовании алгоритма автоматической доводки численных моделей и лазерных измерений вибрации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная в работе методика позволяет определять коэффициент демпфирования образцов в воде и воздухе.

2. Использование описанной в работе технологии совместного измерения акустического поля внутри салона и резонансов панелей кабины автомобиля продемонстрировало на конкретном примере, что звуковое поле в кабине определяется степенью возбуждения резонансных вибраций кабины в целом и ее различных элементов (дверей, панелей стенок, пола и крыши).

3. Использование описанной в работе техники измерений вибраций вращающихся объектов в сочетании с предложенным в работе методом обработки таких измерений позволяет строить спектральные характеристики с частотным разрешением большим чем $\frac{1}{\tau}$, где τ – длительность прохода тела через лазерный луч.

4. Результаты измерений распределения вибрации по тонкому невесомому экрану, расположенному перед источником звука могут быть использованы для прогнозирования поля вдали от источника.

5. Описанный в работе метод интерполяции экспериментальных данных расчетными позволяет повысить пространственное разрешение результатов измерений, отфильтровав при этом аномальные амплитудные выбросы, связанные с неточностью эксперимента.

6. Метод, в основе которого лежит совместное использование автоматического алгоритма доводки численных моделей по значениям экспериментальных резонансных частот и выполнение экспериментального модового анализа с использованием лазерного виброметра, позволяет эффективно осуществлять доводку численных моделей.

7. Описанная методика доводки численных моделей по результатам бесконтактных измерений вибрации может быть использована для локализации дефектов.

Научная и практическая значимость. В работе рассматриваются методы решения актуальных практических задач, работоспособность описанных в работе методов опробована на практике. В работе описываются экспериментальные и расчетно-экспериментальные методы, результаты которых могут быть использованы с целью оптимизации виброакустических полей сложных механических систем и для создания более точных численных моделей.

Методология и методы исследования.

Исследования в первой части работы основаны на выполнении экспериментов. Во второй главе работы применяются методы численного моделирования, реализованные в программных пакетах «ANSYS» и «CATEC». Для анализа результатов в работе используются методы цифровой обработки сигналов и вычислительной статистики.

Степень достоверности.

По теме исследований было опубликовано 4 работы в рецензируемых журналах 5 публикации в трудах конференций. Результаты, изложенные в данной работе, были представлены на следующих конференциях:

1. XXIII Нижегородская сессия молодых ученых, Н. Новгород, 2018.
2. Корабельная ядерная энергетика-2018, Н. Новгород, 2018.
3. XXIII научная конференция по радиофизике, Н. Новгород, 2019.
4. Успехи акустики – 2019, Москва, 2019.

Структура и объем научно-квалификационной работы.

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и списка цитируемой литературы. Список литературы состоит из 50 наименований. Общий объем работы составляет 108 страниц и включает 73 рисунка и 4 таблиц.

Краткое содержание работы.

Во **введении** раскрывается актуальность и практическая значимость рассматриваемых в работе задач и современное состояние проблем, затронутых в работе. Приводятся цели и задачи работы и положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена использованию лазерной виброметрии для измерения виброакустических полей.

В разделе 1.1 кратко описывается принцип работы лазерного виброметра, перечисляются их разновидности.

В разделе 1.2 описывается эксперимент по определению коэффициента демпфирования композитного образца на воздухе и воде. В работе коэффициент демпфирования композитного образца сравнивается с коэффициентом для стального образца такого же размера. Поскольку сами образцы имеют небольшие размеры и массу, использование лазерного виброметра для измерений является оптимальным вариантом, коэффициент демпфирования определялся на первой изгибной моде колебаний. Исследования показали, что наличие воды приводит к изменению частоты и демпфирования интересующего собственного колебания образца. Коэффициент демпфирования образца из композита выше ориентировочно в 3 раза, чем коэффициент демпфирования образца из стали при испытаниях образцов на воздухе. При испытаниях образцов в воде, влияние воды на коэффициент демпфирования образца является определяющим, поэтому коэффициент демпфирования образца из композита превышает коэффициент демпфирования образца из стали всего в 1,2 раза.

В разделе 1.3 описывается экспериментальный метод совместного измерения акустического поля внутри салона и резонансов панелей кабины автомобиля. Цель подобных измерений – выяснить механизм формирования акустического поля в салоне автомобиля. В ходе работы выполнялись измерения частотных откликов и резонансных форм колебаний. В точках на раме и кабине автомобиля набором виброакселерометров, колебания панелей кабины измерялись сканирующим трехкомпонентным лазерным виброметром, для измерений резонансов воздушного объема кабины использовались многоэлементные антенные решетки. В данном разделе описаны особенности, касающиеся способов возбуждения колебаний рамы, кабины и воздушного объема кабины. Анализ результатов показал, что звуковое поле в кабине конкретного автомобиля имеет сложную структуру и определяется степенью возбуждения резонансных вибраций кабины в целом (на резонансах ее амортизации и глобальных деформаций) и ее различных элементов (дверей, панелей стенок, пола и крыши). На Рис. 1 приведены графики усредненного по всем элементам антенных решеток поля давления и усредненное по 10 точкам на панелях кабины поле вибрации. На графиках отмечены значения совпадающих частот.

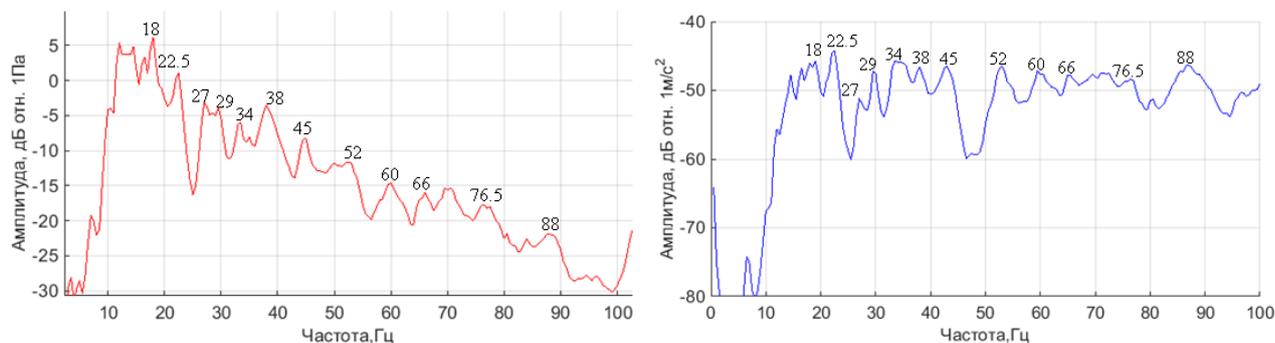


Рис. 1. Картинка слева – усредненное акустическое поле внутри кабины, картинка справа – усредненное поле вибрации на панелях кабины.

Имея информацию о форме колебаний для частот, отвечающих за формирование акустического поля внутри кабины можно предпринимать конкретные действия по снижению уровней этого поля. Примеры таких форм колебаний приведены на Рис. 2.

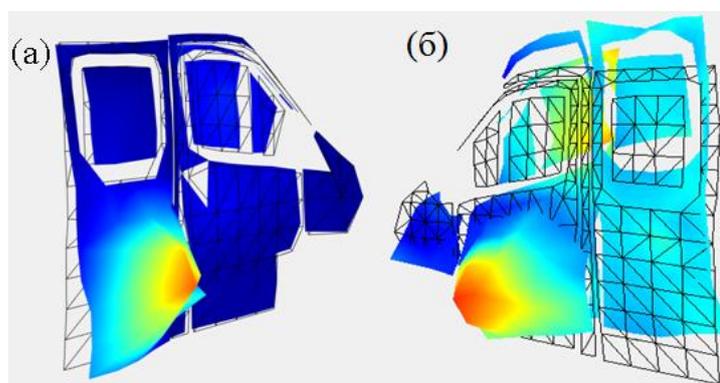
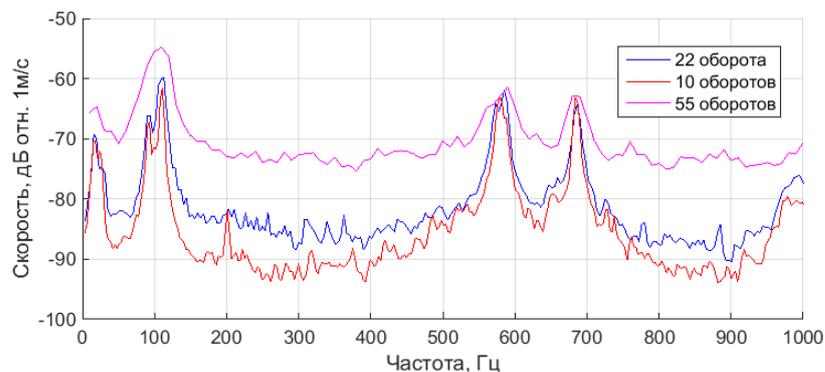


Рис. 2. Формы колебаний панелей кабины на частотах 34Гц(а), 22Гц(б).

Раздел 1.4 посвящен методу измерений вибраций вращающихся объектов неподвижным лазерным лучом. В разделе описываются особенности выполнения измерений по данному методу. На Рис. 3 изображены спектры виброскорости для разной частоты объекта, подобные измерения позволяют определять частоты изгибных колебаний объекта. Однако имеется недостаток – при использовании дискретного преобразования Фурье для анализа результатов частотное разрешение спектров не может превысить величины $\frac{1}{\tau}$, где τ – длительность скольжения луча по исследуемому объекту. По этой же причине перестают разрешаться два максимума на режиме вращения 55 оборотов в минуту (Рис. 3).

Для преодоления этого недостатка в данной работе используется метод наименьших квадратов (МНК). Считается, что спектр узком частотном диапазоне, допустим 70...140Гц, как раз там, где не разрешились две частоты, можно представить в виде 2-х синусоид. Используя подобную двухчастотную модель сигнала и МНК можно подобрать такие значения частот, при которых модель сигнала будет максимально совпадать с измеренной временной реализацией.



На Рис. 4 представлены результаты решения. Можно выбирать любой из двух максимумов на данном рисунке в силу симметрии решения относительно главной диагонали.

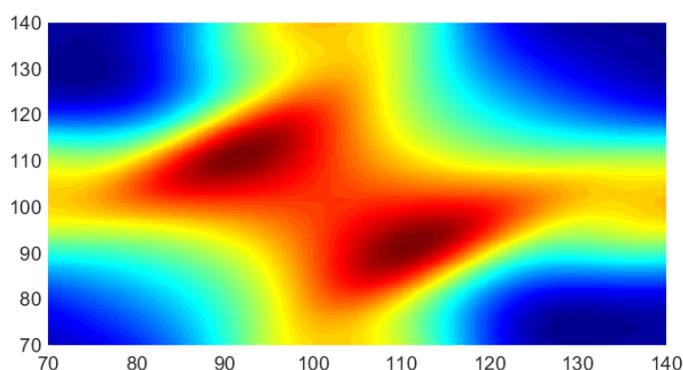


Рис. 4. Результаты решения по методу наименьших квадратов.

Значения аргументов любого из максимумов 91.3 и 110.8 являются оценкой значений частоты в частотном диапазоне 70...140Гц и достаточно хорошо совпадают со значениями изгибных частот, определенных в диапазоне для неподвижной пластины.

В разделе 1.5 приводится исследование возможности применимости измерений распределения вибраций по тонкому экрану для оценки акустического поля вдали от исследуемого объекта. Использование тонкого невесомого экрана совместно с лазерными бесконтактными измерениями вибрации может являться альтернативой традиционным техническим решениям, используемым для поиска распределения акустических полей в пространстве – решеткам из микрофонов или гидрофонов (Рис. 5.). Описывается алгоритм, по которому будет восстанавливаться распределение акустических полей, основанный на формуле Кирхгофа. Приводятся результаты апробации метода, описывается экспериментальная установка, свойства используемого экрана. Скорость, измеренная лазерным виброметром на экране, была сопоставлена со скоростью колебаний среды, определенной в отсутствие экрана. Для выполнения этого сопоставления микрофон помещался в одну из точек измерительной сетки расположенную прямо напротив источника звука. Звуковое давление, определенное в этой точке, затем пересчитывалось во все остальные точки измерительной сетки с учетом того, что их координаты известны. После этого звуковое давление пересчитывалось в нормальную компоненту колебательной скорости. Сопоставление нормальных компонент скоростей

колебаний определенных разными способами продемонстрировало хорошее совпадение (Рис. 5). Восстановленное по описанному методу поле в некоторой точке сравнивалось с результатов прямых измерений. Сравнение продемонстрировало принципиальную применимость метода для выполнения задачи поиска распределения акустических полей.

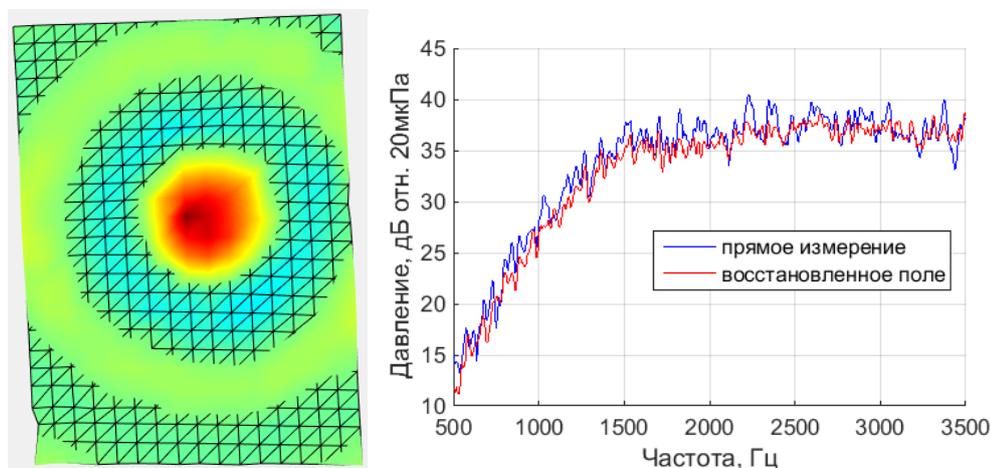


Рис. 5. Мгновенное распределения поля виброскорости по экрану на частоте 1кГц(картинка слева). Сравнение прямого и восстановленного по описанному в разделе методу акустических полей в некоторой точке (картинка справа).

В разделе 1.6. приводится заключение к главе 1.

В Главе2 описываются варианты совместного использования численных расчетов и бесконтактных измерений вибрации в интересах расчетно-экспериментального акустического проектирования.

Важным условием использования любой численной модели является подтверждение ее достоверности результатами экспериментов. В этом случае, точность модели будет зависеть от корректности экспериментальных данных и, что довольно важно, от количества измерительных точек. Для верификации КЭМ необходимо иметь возможность сравнивать численные и экспериментальные данные в большом количестве точек для определения соответствия расчетных и экспериментальных форм колебаний.

Часто получается так, что при измерениях не получается обеспечить нужное количество точек особенно для восстановления высокочастотных форм колебаний. В разделе 2.1 описывается метод повышения пространственного разрешения экспериментальных данных, подразумевающий интерполяцию результатов измерений в относительно небольшом количестве точек, результатами численного расчета. Особенность метода заключается в том, что отсутствует необходимость в верификации используемой численной модели исследуемого объекта. Другой особенностью метода является то, что в восстановленной форме колебаний будут отсутствовать амплитудные выбросы, связанные с дефектами измерений. Демонстрируется работоспособность метода на примере восстановления формы колебаний для измерительных сеток разной плотности (Рис. 6).

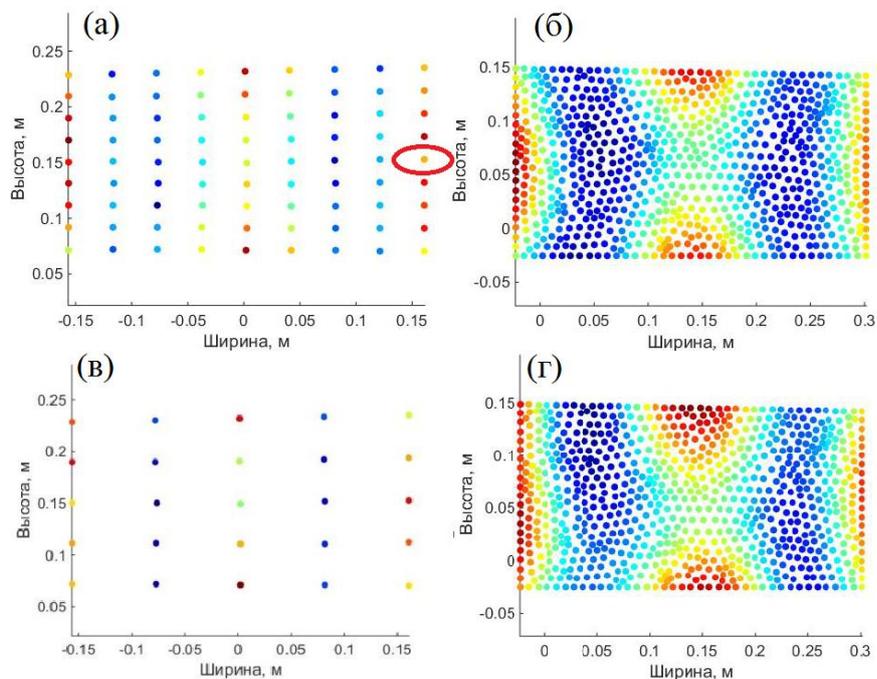


Рис. 6. Результаты апробации алгоритма для формы колебаний с частотой 794.5Гц: (а), (в) – результаты измерений для 81 и 25 точек, соответственно; (б), (г) – результаты восстановления формы колебаний для измерений по 81 и 25 точкам соответственно.

В разделе 2.2 главы описана процедура автоматической доводки вибрационных характеристик численной модели по результатам бесконтактных измерений вибраций. Рассматриваются условия выполнения измерений, приводятся результаты сопоставления результатов измерений с базовым (недоведенным) расчетом и доведенным расчетом. Продемонстрировано улучшение соответствия расчетных и экспериментальных данных представленных в виде частотно-зависимых откликов на единичную силу (Рис. 7(а)). Показано уменьшение разницы уровней в третьоктавах практически для всех полос для расчетной модели после выполнения доводки для разных точек и разных направлений вибрации (Рис. 7(б)). Отмечается, что подобная процедура доводки с использованием лазерного виброметра для измерений, особенно подходит для модификации моделей относительно небольших и легких объектов, динамические характеристики которых могут быть изменены набором вибродатчиков на величину большую точности самой модели.

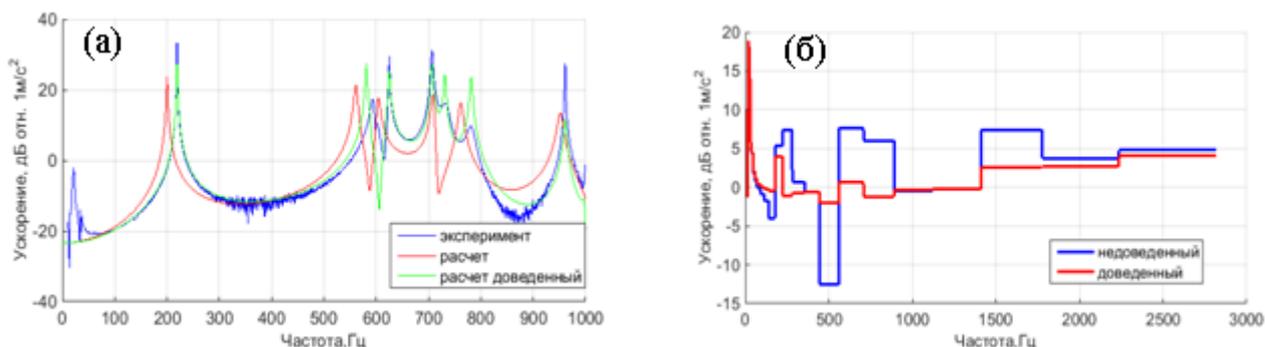


Рис. 7. Сравнение результатов расчета для базового и доведенного вариантов численной модели с результатами измерений – (а). Разница уровней в третьоктавных полосах двух вариантов расчета с экспериментом.

В разделе 2.3 приводится описание метода локализации дефекта, который является следствием из описанной в разделе 2.2. процедуры доводки. На примере верификации численной модели небольшой турбинной лопатки показано (Рис. 8), что при использовании данных полученных с поврежденной лопатки, алгоритм доводки будет изменять модуль упругости элементов, находящихся вблизи дефекта. Подобную процедуру для небольших объектов можно выполнить, только используя бесконтактные методы измерения вибраций.

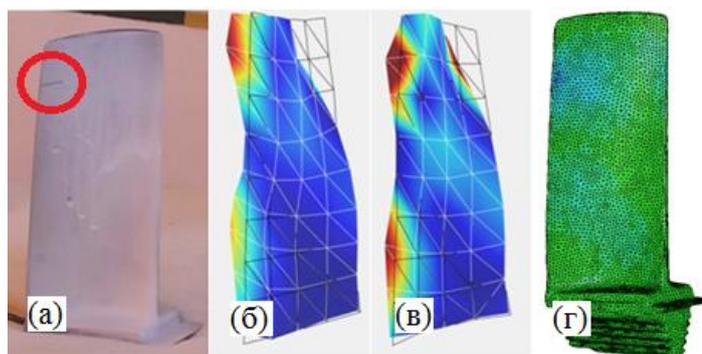


Рис. 8. Поиск дефектов лопатки турбины: рис. 4а. – лопатка с дефектом, рис. 4б – форма колебаний неповрежденной лопатки на частоте 6524 Гц, рис. 4в – форма колебаний поврежденной лопатки на частоте 6086 Гц, рис. 4г – результат работы алгоритма корректировки (темным выделены элементы, у которых уменьшается жесткость для соответствия измерениям).

В разделе 2.4. приводится заключение к главе 2.

В **заключении** приводятся основные результаты работы.

Была достигнута главная цель – были разработаны экспериментальные и расчетно-экспериментальные методы исследования с использованием бесконтактных лазерных средств измерения вибраций для создания более совершенных в плане виброакустических полей объектов техники.

1. Описанный в работе метод измерений позволяет определять коэффициенты демпфирования образцов в воде и в воздухе. Было показано, что добавление воды приводит к изменению частоты и демпфирования интересующего собственного колебания образца. Измеренный в воздухе коэффициент демпфирования образца из композита выше ориентировочно в 3 раза, чем у образца из стали. При испытаниях образцов в воде, влияние воды на коэффициент демпфирования образца является определяющим. В связи с этим, коэффициент демпфирования образца из композита превышает коэффициент демпфирования образца из стали всего в 1,2 раза.

2. Описанный в работе подход к совместному измерению резонансов корпуса, панелей корпуса и воздушного объема кабины автомобиля позволил продемонстрировать, что для конкретной машины звуковое поле в кабине определяется степенью возбуждения резонансных вибраций кабины в целом и ее различных элементов.

3. Сочетание предложенной техники измерений вибрации вращающихся тел неподвижным лазером с использованием метода наименьших квадратов позволяет определять значения изгибных резонансов исследуемых объектов. При этом удается отчасти преодолеть основной недостаток способа измерений вибраций вращающихся тел неподвижным лазером, а именно понижение частотного разрешения с увеличением частоты вращения. С помощью предложенного метода обработки можно разрешить частоты, которые не разрешаются в случае использования Фурье-обработки.

4. В работе предложен метод поиска распределения акустических полей в пространстве вдали от источника основанный на измерениях распределения вибраций с помощью лазерного виброметра на тонком экране. Сравнение прямых измерений давления в некоторой точке с результатами работы описываемого в разделе метода продемонстрировали его принципиальную применимость для выполнения задачи поиска распределения акустических полей.

5. В работе был описан метод повышения пространственного разрешения экспериментальных данных с использованием результатов расчета. Особенностью метода является отсутствие необходимости верификации, по результатам измерений используемой в методе КЭМ объекта. Другой особенностью метода является то, что в восстановленной форме колебаний будут отфильтрованы аномальные амплитудные выбросы, связанные с дефектами измерений. Продемонстрирована работоспособность метода на примере измерительных сеток разной плотности.

6. В работе описана процедура автоматической доводки вибрационных характеристик численной модели по результатам бесконтактных измерений вибраций. Продемонстрировано улучшение соответствия расчетных и экспериментальных данных представленных в виде частотно-зависимых откликов на единичную силу. Показано уменьшение разницы уровней в третьоктавах практически для всех полос для расчетной модели после выполнения доводки для разных точек и разных направлений вибрации. Отмечается, что подобная процедура доводки с использованием лазерного виброметра для измерений, особенно подходит для модификации моделей относительно небольших и легких объектов, динамические характеристики которых могут быть изменены набором вибродатчиков на величину большую точности самой модели.

7. Предложенный в работе метода локализации дефекта является следствием из описанной ранее процедуры доводки. На примере верификации численной модели небольшой турбинной лопатки показано, что при использовании данных полученных с поврежденной лопатки, алгоритм доводки будет изменять модуль упругости элементов, находящихся вблизи дефекта.

Список публикаций

1. 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.
2. 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».
3. А. В. Стуленков, П. И. Коротин, А. С. Суворов. «Новые применения лазерной виброметрии». Известия РАН. Серия физическая. 2020. – Т. 84, №6. 2020.
4. 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. Том 1. 2018. С. 16-19.
5. Стуленков А. В., Суворов А. С. Современные возможности моделирования и технологии верификации сложных механоакустических систем. Корабельная ядерная энергетика-2018. Н. Новгород. АО «ОКБМ Африкантов». 2018. Сборник тезисов. С. 66-67.
6. Стуленков А.В., Бритенков А.К. Исследование электромеханических характеристик излучающих элементов компактного гидроакустического преобразователя сложной формы методом лазерной виброметрии. XXIII научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород: ННГУ, 2019
7. 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. Нижний Новгород: ННГУ, 2019.
8. 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.

Список литературы

- [1] Yarlagadda, S., & Lesieutre, G. (1995). Fiber contribution to modal damping of polymer matrix composite panels. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 32(5), 825–831. doi:10.2514/3.26691.
- [2] Kessler, S. S., Spearing, S. M., Atalla, M. J., Cesnik, C. E. S., & Soutis, C. (2002). Damage detection in composite materials using frequency response methods. *Composites Part B: Engineering*, 33(1), 87–95. doi:10.1016/s1359-8368(01)00050-6.
- [3] Pei, X., Li, J., Chen, K., & Ding, G. (2015). Vibration modal analysis of three-dimensional and four directional braided composites. *Composites Part B: Engineering*, 69, 212–221. doi:10.1016/j.compositesb.2014.10.001.
- [4] Filippov, A. V., Krasnoveikin, V. A., Druzhinin, N. V., & Rubtsov, V. E. (2016). The Use of Laser-Doppler Vibrometry for Modal Analysis of Carbon-Fiber Reinforced Composite. *Key Engineering Materials*, 712, 313–318. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.712.313.
- [5] Sol, H., Rahier, H., & Gu, J. (2020). Prediction and Measurement of the Damping Ratios of Laminated Polymer Composite Plates. *Materials*, 13(15), 3370. doi:10.3390/ma13153370.
- [6] Murčinková, Z., Vojtko, I., Halapi, M., & Šebestová, M. (2019). Damping properties of fibre composite and conventional materials measured by free damped vibration response. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(5), 168781401984700. doi:10.1177/1687814019847009.
- [7] Pang Jian. *Noise and vibration control in automotive bodies*. China Machine Press. 531pp. 2018.
- [8] Sanderson, M. A., & Onsay, T. (2007). CAE Interior Cavity Model Validation using Acoustic Modal Analysis. SAE Technical Paper Series. doi:10.4271/2007-01-2167.
- [9] T. Yoshimura, M. Saito, S. Maruyama, S. Iba. Modal analysis of automotive cabin by multiple acoustic excitation. PROCEEDINGS OF ISMA2012-USD2012.
- [10] Accardo, G., El-kafafy, M., Peeters, B., Bianciardi, F., Brandolisio, D., Janssens, K., & Martarelli, M. (2015). Experimental Acoustic Modal Analysis of an Automotive Cabin. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 33–58. doi:10.1007/978-3-319-15236-3_4.
- [11] Johansmann, M., Fritzsche, M., & Schell, J. (2011). 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. doi:10.4271/2011-26-0043.
- [12] Gasparoni, A., Allen, M. S., Yang, S., Sracic, M. W., Castellini, P., Tomasini, E. P., & Tomasini, E. P. (2010). Experimental Modal Analysis on a Rotating Fan Using Tracking-CSLDV. doi:10.1063/1.3455482.

- [13] Abbas, S. H., Jang, J.-K., Kim, D.-H., & Lee, J.-R. (2020). Underwater vibration analysis method for rotating propeller blades using laser Doppler vibrometer. *Optics and Lasers in Engineering*, 132, 106133. doi:10.1016/j.optlaseng.2020.106133.
- [14] Peter Lutzmann, Benjamin Göhler, Chris A. Hill, Frank van Putten, “Laser vibration sensing at Fraunhofer IOSB: review and applications,” *Opt. Eng.* 56(3), 031215 (2016), doi: 10.1117/1.OE.56.3.031215.
- [15] A.K. Reinhardt, J.R. Kadambi, R.D. Quinn, Laser vibrometry measurements of rotating blade vibrations, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 117 (3) (1995) 484–488, doi:10.1115/1.2814121.
- [16] Maynard, J. D., Williams, E. G., & Lee, Y. (1985). Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 78(4), 1395–1413. doi:10.1121/1.392911.
- [17] Salin, M. B., & Kosteev, D. A. (2020). Nearfield acoustic holography-based methods for far field prediction. *Applied Acoustics*, 159, 107099. doi:10.1016/j.apacoust.2019.107099.
- [18] Williams, E. G., Maynard, J. D., & Skudrzyk, E. (1980). Sound source reconstructions using a microphone array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(1), 340–344. doi:10.1121/1.384602.
- [19] Guozhi, B., Guangsheng, S., Zhaowang, X., & Jianghua, D. (2017). Identification and contribution analysis of vehicle interior noise based on acoustic array technology. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(11), 168781401773003. doi:10.1177/1687814017730031.
- [20] E.G. Williams, *Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*, Academic Press, London (1999).
- [21] Wang, R., & Bei, S. (2017). Optimization of Fixed Microphone Array in High Speed Train Noises Identification Based on Far-Field Acoustic Holography. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2017, 1–11. doi:10.1155/2017/1894918/
- [22] Todoroff, D. G., & Trivett, D. H. (1986). Particle velocity detection using a thin membrane. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 79(S1), S85–S85. doi:10.1121/1.2023429.
- [23] Leclère, Q., & Laulagnet, B. (2008). Particle velocity field measurement using an ultra-light membrane. *Applied Acoustics*, 69(4), 302–310. doi:10.1016/j.apacoust.2006.11.009.
- [24] Leclère, Q., & Laulagnet, B. (2009). Nearfield acoustic holography using a laser vibrometer and a light membrane. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(3), 1245–1249. doi:10.1121/1.3180132.
- [25] Ranjbar M., Marburg S. Fast vibroacoustic optimization of mechanical structures using artificial neural networks // *Int. J. Mech. Engineering and Applications*. 2013. 1(3). P. 64-68.
- [26] Kim S. Y. Topology design optimization for vibration reduction: reducible design variable method. PhD thesis, Canada. 2011. 221 p.

- [27] Carletti E., Miccoli G. Vibroacoustic optimization of a tractor cab / Proc. of ICSV21, China. 2014.
- [28] Суворов А.С., Соков Е.М., Вьюшкина И.А. «Регулярный алгоритм автоматической коррективы спектральных характеристик акустических конечно-элементных моделей» с. 592-599. Акустический журнал, 62, 5, с. 592-599 (2016).
- [29] Ghoshal, A., Sundaresan, M. J., Schulz, M. J., & Frank Pai, P. (2000). Structural health monitoring techniques for wind turbine blades. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(3), 309–324. doi:10.1016/s0167-6105(99)00132-4.
- [30] Di Maio, D., Zampognaro, N., Zang, C., & Ewins, D. J. (2006). 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*. doi:10.1117/12.693077.
- [31] <https://www.polytec.com/sea/vibrometry/areas-of-application/materials-research-and-testing/surface-waves>.