

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук, профессора Коробова Александра Ивановича
на диссертационную работу Стуленкова Андрея Вадимовича
«РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ВИБРОМЕТРИИ»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.7 – Акустика

Создание более совершенных в акустическом плане образцов техники требует разработки и развития современных экспериментальных методов, позволяющих определять причины формирования определенного акустического поля и осуществлять его прогноз. В качестве исходных данных для таких методов может использоваться распределение вибрации на поверхности тела. Актуальным способом измерения вибраций, особенно для относительно легких объектов является лазерная доплеровская виброметрия. Благодаря бесконтактному принципу работы лазерная виброметрия имеет преимущество относительно традиционных вариантов измерения вибрации с помощью наборов пьезоакселерометров и пьезопластин за счет отсутствия влияния массы датчика на колебания исследуемого объекта.

Лазерные измерения вибрации используются для решения широкого спектра прикладных задач уже не одно десятилетие. Среди этого многообразия можно выделить задачи корректировки численных моделей конструкций по результатам вибрационных исследований, моделирования и анализа излучения тел, порождаемого источниками разной природы (например, гидродинамическими источниками и источниками воздушного шума), локализации механических дефектов, оценки спектральных характеристик вращающихся тел. В диссертационной работе предлагаются новые методы решения указанных задач на основе использования лазерной виброметрии. Высокая степень актуальности и новизны поставленных задач сомнений не вызывают.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемых источников, содержащего 101 наименование. Во введении изложено современное состояние рассматриваемых в работе задач, обоснована актуальность темы, практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведено краткое изложение содержания диссертации.

В первой главе изложена процедура корректировки спектральных характеристик численных моделей, основанная на использовании лазерных измерений вибрации в

совокупности с ранее известным численным алгоритмом автоматической корректировки. 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. При этом полагается, что соответствие расчетных и экспериментальных резонансов означает соответствие численной модели и реального объекта.

В данной главе, на примере корректировки спектральных характеристик стальной рамы, продемонстрирована работоспособность предложенной процедуры. Показано, что погрешность численного моделирования для отдельных третьоктавных полос может улучшаться на десятки децибел, средняя погрешность после процедуры доводки составляет 2-3 дБ. Преимуществами предложенной процедуры относительно других методов являются, во-первых, использование бесконтактных измерений, что позволяет выполнять корректировку численных моделей тел, характеристики которых могут быть изменены контактными системами, во-вторых, применение автоматического алгоритма корректировки, позволяющего оперативно и с высокой точностью изменять спектральные характеристики численных моделей. В результате, описанная в главе процедура вносит вклад в развитие численного виброакустического моделирования.

Во второй главе представлена разработанная автором расчетно-экспериментальная методология исследования колебаний упругих тел, возбуждаемых турбулентным потоком жидкости. С ее помощью, на примере исследования излучения корабельного винта в составе морского аппарата, обоснована важность учета упругих резонансов лопастей при моделировании малозумных движительных комплексов.

В данной главе показано, каким именно образом в акустическом спектре корабля можно выделить составляющие, соответствующие упругим колебаниям лопастей, не прибегая при этом к сложным измерениям на акватории, что выгодно отличает предложенную методологию от известных вариантов исследования акустического излучения корабельных винтов. Это делается с использованием верифицированной по экспериментальным данным численной модели винта, при этом верификационный эксперимент выполняется на воздухе в безэховой камере на основе принципа взаимности. Измерения проходят полностью бесконтактно, колебания подвешенного на тросах винта возбуждаются динамиком и регистрируются лазерным виброметром в сотнях точек. По результатам сопоставления расчетных и экспериментальных взаимных коэффициентов передачи в воздухе выявлено хорошее соответствие численной модели реальному объекту. Если к полученной достоверной «воздушной» модели с помощью метода конечных

элементов (МКЭ) добавить численно смоделированный объем воды, что резонансы винта изменяться известным образом за счет влияния присоединенной массы и, в результате, получится новая достоверная численная модель винта в воде. Достоверность моделирования резонансов по новой модели подтверждена соответствующими измерениями резонансов винта в воде. Использование такой модели обосновано для интерпретации результатов экспериментов с винтом в составе морского объекта и идентификации в его акустическом спектре резонансов лопастей. В итоге, на конкретном примере продемонстрировано, что в широком частотном диапазоне максимальные уровни излучения морского объекта могут быть обусловлены влиянием упругих колебаний лопастей винта, причем превышение резонансных уровней колебаний над некоторой постоянной составляющей может достигать величины 20 дБ.

По результатам измерений вибраций и давления, возникающих при обтекании цилиндров на проточном стенде потоком с разными скоростями показано, что превышение уровней колебаний на резонансах обтекаемого тела может увеличиться при совпадении резонансных частот с гармониками гидродинамической срывной частоты. Особенность приведенных в данной главе экспериментальных исследований заключается в том, что давление и вибрации измерялись двумя разными техниками с целью повышения достоверности полученных результатов. Разница резонансных уровней колебаний вибрации составила не более 10%, что говорит о возможности использования лазерной виброметрии для подобных измерений и достоверности полученного набора экспериментальных данных, с помощью которых можно осуществлять верификацию соответствующих расчетов.

Третья глава посвящена использованию лазерной виброметрии для анализа акустического поля по результатам измерения вибраций на поверхности некоего объекта. В главе описывается экспериментальный подход, включающий два метода.

Первый метод позволяет анализировать поле внутри некоторой замкнутой поверхности. На примере автомобиля «ГАЗель» показано, что совместные измерения распределения давления в кабине автомобиля и распределения вибраций по поверхности кабины позволяют выявить причину формирования нежелательно высоких уровней шума в салоне. Установлено, что причиной возникновения сильного шума в кабине являлось не совпадение какого-либо вибрационного резонанса элементов кабины с модой воздушного объема, а непосредственным влиянием резонансных вибраций ее элементов.

Второй метод направлен на прогноз поля на удалении от исследуемого объекта. По итогам измерения распределения вибрации сканирующим лазерным виброметром на тонком невесомом экране можно спрогнозировать акустическое поле, используя для оценки

уровня давления формулу Кирхгофа. Применение подобного экрана вместе с виброметром является альтернативой применению антенных решеток с фиксированным пространственным шагом, поскольку позволяет создать более плотную измерительную сетку. Сравнение такой оценки с результатами прямого измерения поля в произвольной точке демонстрируют принципиальную применимость подобного метода.

Таким образом, достоинством описанного в главе подхода является возможность анализа и прогноза акустического поля внутри сложной механоакустической системы и на удалении от нее.

В **четвертой главе** описывается способ оценки вибраций вращающихся тел с помощью лазерного виброметра с неподвижным лучом. При использовании такого прибора для решения данной задачи может возникнуть проблема, связанная с тем, что из-за ограниченного времени скольжения луча по измеряемой поверхности вращающегося объекта существует ограничение на частотное разрешение оцениваемых спектральных характеристик. Чем выше скорость вращения тем, хуже могут разрешаться близкие дискретные составляющие спектра вплоть до полной невозможности разрешения. Для решения этой проблемы в работе предлагается обрабатывать временной сигнал, записанный виброметром, с использованием метода наименьших квадратов, где в качестве модельного сигнала в некотором частотном диапазоне используется сумма синусоид с неизвестными частотами и амплитудами. Экспериментальная апробация метода показала его работоспособность, а именно, возможность разрешения близко расположенных дискретных составляющих, сливавшихся в один максимум при использовании стандартной техники Фурье-анализа для обработки результатов выполненных измерений. Таким образом, предложенный метод позволяет расширить возможности лазерных виброметров с неподвижным лучом для оценки спектральных характеристик вращающихся тел.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Научные положения и выводы диссертационной работы представляются обоснованными, их достоверность не вызывает сомнений, поскольку они опубликованы в ведущих научных журналах и неоднократно докладывались на профильных конференциях и семинарах.

Несмотря на высокую в целом оценку диссертационной работы, к ней имеется ряд замечаний:

1. Название первой главы диссертации выбрано не совсем удачно. Оно подразумевает рассмотрение различных методов бесконтактного измерения вибраций, однако фактически в работе рассматривается только один метод — лазерная доплеровская виброметрия.

2. В первой главе упоминается метод автоматической корректировки спектральных характеристик численных моделей. В работе про него практически ничего не сказано, хотя он играет определяющую роль в том исследовании, которое описано в данной главе. В частности, отсутствуют комментарии по поводу однозначности решения, найденного с использованием этого метода, и по зависимости точности решения от объема входных параметров.

3. На странице 41 в тексте и на рисунке 2.10 приводятся упоминание и расчёт «функции когерентности». Не ясно, однако, о какой конкретно функции идёт речь, поскольку не приведены соответствующие определение и расчетные выражения.

4. На странице 47 необходимо было дать более подробный комментарий по поводу размера расчетной области, в частности, указать, чем он обусловлен, может ли он быть избыточным, и обосновать тем самым сделанный автором выбор данного размера.

Упомянутые замечания не снижают общей положительной оценки работы, которая является актуальным и законченным научным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Все главы диссертации идейно и методически связаны между собой, основные результаты содержат научную новизну и представляют высокую практическую ценность. Автореферат диссертации корректно отражает ее содержание.

По моему мнению, данная диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям действующей редакции Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Содержание работы полностью соответствует специальности 1.3.7 – Акустика, а ее автор Стуленков Андрей Вадимович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по данной специальности.

Даю свое согласие на обработку моих персональных данных в связи с оформлением диссертационным советом документации по данной диссертации.

Официальный оппонент:

профессор, доктор физико-математических наук (специальность 1.3.7 – Акустика)
профессор кафедры акустики физического факультета МГУ

А.И. Коробов

Дата: 07.04.25

Сведения об авторе отзыва:

Коробов Александр Иванович, доктор физико-математических наук, должность - профессор, ученое звание - профессор.

Место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ)

Адрес: 119234, г. Москва, территория Ленинские Горы, физический факультет МГУ

Телефон: 89161259028

E-mail: aikor42@mail.ru

И.о. декана физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,

д. ф.-м. н., профессор

Белокуров Владимир Викторович

М.П.

