



ОКБМ
АФРИКАНТОВ
РОСАТОМ

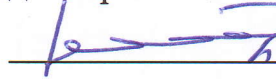
ОРГАНИЗАЦИЯ ООО «РОСАТОМ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

**Акционерное общество
«Опытное Конструкторское Бюро
Машиностроения
имени И. И. Африкантова»
(АО «ОКБМ Африкантов»)**

Бурнаковский проезд, д. 15,
г. Нижний Новгород, 603074
Почтовый адрес: бокс №772,
г. Нижний Новгород, 603951
Телефон (831) 275-26-40, факс (831) 241-87-72
E-mail: okbm@okbm.nnov.ru
ОКПО 08624579, ОГРН 1085259006117
ИНН 5259077666, КПП 525901001

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель
генерального директора –
генерального конструктора,
доктор технических наук

 В.В. Петрунин
« 07 » 05 2025 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию 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

Актуальность темы диссертационной работы

Опыт участия в создании техники широкого спектра назначения свидетельствует о постоянном повышении требований к вибрационным и акустическим полям разрабатываемых машин и конструкций. Традиционный путь удовлетворения этим возрастающим требованиям подразумевает большой объем НИОКР, включающий в себя создание полномасштабных образцов и проведение натурных испытаний, что для отдельных конструкций (к примеру, движительный комплекс образцов морской техники) является весьма дорогостоящей и трудновыполнимой задачей. Альтернативой является использование представительных методов численного моделирования, учитывающие все многообразие происходящих физических процессов.

Предлагаемые автором новые методы моделирования позволяют повысить достоверность численных моделей, описывающих виброакустические свойства реальных конструкций. При этом разработанные в работе методы основываются на использовании экспериментальных данных, полученных путем измерения колебаний поверхности исследуемого тела с помощью бесконтактной лазерной виброметрии. По сравнению с традиционными способами осуществления измерений вибраций (виброакселерометры и пьезопластины), лазерная виброметрия имеет существенные преимущества, связанные с отсутствием влияния системы измерений на колебания объекта и с возможностью получения данных с высоким пространственным разрешением. Представленные в работе изыскания направлены на решение задач повышения точности численного моделирования конструкций, представительности альтернативных средств испытаний, снижения исследовательских затрат. Поэтому представленные в диссертационной работе исследования являются актуальными.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа Стуленкова А.В. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 120 страниц и включает 90 рисунков и 4 таблицы, список литературы состоит из 101 наименования.

Во введении соискатель обосновывает актуальность исследуемой темы и ее прикладную значимость, формулирует цели и задачи исследования, представляет положения, выносимые на защиту. Также во введении отражены научная новизна, практическая значимость, методы исследования, степень достоверности и апробации результатов.

Первая глава посвящена применению лазерной виброметрии с целью создания адекватных численных моделей. Продемонстрированы результаты исследования тестовой конструкции, направленного на уточнение численной вибрационной модели этой конструкции. Для корректировки численной модели использовался созданный автором автоматический итерационный алгоритм, позволяющий изменять распределение жесткости элементов модели, таким образом, чтобы резонансные характеристики модели совпали с экспериментальными. При этом автором полагается, что при совпадении расчетных и экспериментальных резонансов достигается соответствие модели и реального объекта. В работе утверждается, что для корректной работы алгоритма необходимо знать, как можно больше экспериментальных резонансных форм колебаний, которые, особенно для относительно простых объектов, могут быть получены в неискаженном виде с использованием лазерной виброметрии. Показано, что сочетание используемой в работе техники измерений и алгоритма корректировки численной модели позволяет добиться высокой точности численного воспроизведения экспериментальных резонансных форм колебаний. Полагается, что уточненное таким образом распределение жесткости элементов реального объекта далее может использоваться для поиска оптимальных по акустическим характеристикам конструкторских решений.

С помощью предлагаемого автором алгоритма корректировки моделей, таким образом, может осуществляться и локализация дефектов конструкций. В этом случае алгоритм корректировки находит элементы модели, у которых должна быть снижена жесткость для соответствия реальному объекту. Работоспособность такого подхода продемонстрирована экспериментально.

Вторая глава посвящена исследованию акустического поля упругих конструкций в турбулентном потоке воды с использованием лазерной виброметрии. Приводятся результаты изучения акустического поля гребного винта подводного аппарата. Экспериментальная оценка вклада от возбуждения собственных колебаний конструкций винта в общее акустическое поле аппарата в условиях реального водоема является трудоемкой задачей из-за невозможности их прямого измерения. Поэтому предлагается сначала создать достоверную конечно-элементную модель винта по результатам измерений его резонансных форм колебаний в воздухе лазерным виброметром. Применение лазерного виброметра в данной ситуации обосновано небольшими размерами винта, из-за чего измерения без искажения его вибраций можно провести только бесконтактно, и потребностью в визуализации высокочастотных мод, для чего необходимо создать плотную измерительную сетку. После того, как получена качественная модель в воздухе, к ней добавляется численно смоделированный объем воды, который за счет влияния присоединенной массы изменяет резонансы винта. Корректность моделирования резонансных характеристик в воде подтверждается соответствующими экспериментами. В результате проделанных действий, с использованием расчетов уточненной модели винта, появляется возможность выявлять упругие собственные колебания его лопастей в суммарном поле подводного аппарата. С помощью такого подхода экспериментально было показано, что максимальные уровни акустического поля рассматриваемого аппарата, оснащенного гребным винтом, в широком частотном диапазоне обусловлены влиянием преимущественно упругих колебаний конструкций лопастей.

Также приводятся результаты измерений по изучению вибраций конструкции, обтекаемой турбулентным потоком воды с разными скоростями в условиях проточного стенда. Измерения выполнялись в перекрестной постановке – для достижения высокой

достоверности полученных данных вибрация измерялась лазерным виброметром и встроенным в исследуемый образец виброакселерометром. В результате было выявлено, что разница в уровнях резонансных колебаний, определенных двумя методами, составила не более 10%, что позволяет использовать полученные данные с использованием лазерной виброметрии как верификационный базис для проверки расчетов в гидроупругой постановке. Также было показано, что при совпадении резонансных частот обтекаемой конструкции с частотами гидродинамических срывных явлений происходит повышение амплитуд колебаний конструкции на несколько порядков.

В главе 3 исследуется взаимосвязь воздушного шума и вибраций на примере кабины автомобиля. Здесь выделяются две отдельные задачи: анализ воздушного поля внутри замкнутой поверхности и прогноза поля на удалении от исследуемого объекта. Для решения обеих задач необходимо иметь информацию о распределении вибрационного поля на некой поверхности. Первой задачей является выяснение причины формирования сильного шума в кабине автомобиля. Использование лазерной виброметрии в таком случае необходимо, поскольку элементы кузова достаточно мягкие и, как показывает экспериментальная практика, их колебания искажаются под воздействием контактных систем измерения. Приводятся результаты совместных измерений распределения акустического поля внутри кабины автомобиля и распределения вибраций по поверхности кабины, по результатам которых показано, что причиной возникновения сильного шума в кабине в исследуемом автором частотном диапазоне являлось не совпадение какого-либо вибрационного резонанса элементов кабины с модой воздушного объема, а непосредственным влиянием резонансных вибраций ее элементов.

Вторая задача заключается в прогнозировании акустического поля источника по результатам измеренного лазерным виброметром распределения вибрации на тонком невесомом экране. Преимуществом лазерной виброметрии в этом случае является более подробное пространственное описание поля по сравнению с тем, чего можно было бы ожидать от традиционно применяемых для решения такой задачи антенных решеток из микрофонов или гидрофонов. Для прогнозирования поля в точке на удалении от источника применяется формула Кирхгофа. Экспериментальная апробация метода в безэховой камере показала, что погрешность прогнозирования поля таким методом по сравнению с прямыми измерениями поля в этой точке составляет не более 2-3дБ, что демонстрирует возможность корректной оценки акустического поля подобным методом.

В главе 4 рассматривается важная для практических приложений задача оценки вибраций вращающихся тел по результатам измерений лазерным виброметром с неподвижным лучом. Отмечаются достоинства (простота реализации) и недостатки (ухудшение частотного разрешения). Ухудшение частотного разрешения обусловлено сокращением времени наблюдения лазером вращающегося тела (в работе это лопасть) в результате чего дискретные составляющие могут сливаться в один максимум. Для решения такого рода задач используются методы сверхразрешения, использующие дополнительную априорную информацию. Автором для разрешения по частоте дискретных составляющих предложено использовать метод наименьших квадратов (МНК). Продемонстрировано, что использование МНК с модельным сигналом, включающим две синусоиды с неизвестными частотами, позволило разрешить близкорасположенные дискретные составляющие в сигнале и выполнить оценку их амплитуд. В результате показано, что оценка вибраций с помощью предложенного подхода к обработке экспериментальных данных может производиться при скоростях вращения исследуемого объекта, превышающих в 4 раза скорости вращения, используемые при стандартном способе обработки данных (использования Фурье-анализа).

В Заключение приведены основные результаты выполненного в диссертационной работе исследования.

Научная новизна полученных результатов

Научные положения и выводы диссертационной работы являются обоснованными и содержат в себе научную новизну.

К результатам, обладающим научной новизной, следует отнести следующие положения:

1. Методология доводки вибрационных характеристик конечно-элементных моделей объектов с использованием лазерной виброметрии, позволяющая снизить погрешность численного моделирования ВАХ до 2...3дБ и локализовать механические дефекты.

2. 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. Экспериментальный метод исследования 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. Кроме того, метод, позволяет восстановить акустическое поле тела по результатам бесконтактных измерений нормальной компоненты виброскорости окружающего источник тонкого невесомого экрана.

4. 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.

Практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость результатов, представленных в диссертации, заключается в следующем:

Разработаны экспериментальный и расчетно-экспериментальный методы акустического проектирования, направленные на повышения качества численных моделей.

Разработанная методология исследования колебаний упругих тел в турбулентном потоке воды, в совокупности с методом расчета виброакустических характеристик, использовались в работах с АО «СПМБМ «Малахит», направленных на создание малошумных судовых двигателей.

Разработанный 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».

Достоверность результатов исследований

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обусловлена корректной постановкой задач, хорошей степенью соответствия результатов моделирования и результатов эксперимента. Полученные результаты не противоречат результатам, полученным другими исследователями. Основное содержание диссертации представлено в 6 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертации, а также докладывались на профильных конференциях и семинарах. Используемые в диссертации методы содержатся в зарегистрированном программном обеспечении для ЭВМ «САТЕС».

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы Стуленкова А.В. обладают как научной новизной, так и практической значимостью.

Развиваемые автором методы бесконтактных измерений вибрации с использованием лазерного виброметра, а также постобработки полученных данных целесообразно использовать для определения коэффициента демпфирования композитных

конструкций, а также при измерении вибрации вращающихся объектов. Кроме того, предложенная методология доводки вибрационных характеристик конечно-элементных моделей, позволяющая повысить точность численных расчетов вибрации, нашли отражение в отечественном программном обеспечении «САТЕС», одним из авторов которого является соискатель. В настоящее время программное обеспечение «САТЕС» активно используется в АО «ОКБМ Африкантов» при выполнении численных виброакустических расчетов для проектирования натуральных конструкций. Данное ПО и разработанные методы могут найти применение на предприятиях автомобилестроения и судостроения, а также задействованных в акустическом проектировании конструкций. Работа в целом представляет практический интерес для специалистов в области анализа и диагностики виброакустических характеристик машин и конструкций

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. Название диссертации не отражает в полной мере ее содержание. В тексте работы акцент делается на развитие расчетно-экспериментальных методов с использованием лазерного виброметра, применяемых для повышения точности численных моделей. При этом рекомендации по виброакустическому проектированию отсутствуют. Кроме того, следовало бы дополнить вводную часть диссертационной работы разделом «Степень разработанности», а также описанием теоретической значимости работы.

2. В таблице 1.1 диссертации разница по отдельным частотам в исследуемом диапазоне составляет 3.4%, 4.4% и 9%. При этом на странице 24 диссертации автором указано, что разница составляет не более 3%.

3. На рисунке 1.11 показано изменение распределение модуля Юнга относительно исходной численной модели как результат работы алгоритма по доводке значений собственных частот колебаний исследуемой конструкции. При анализе рисунка 1.11, можно отметить локализованную область численной модели, в которой значение модуля Юнга увеличено более чем в 2,5 раза. Целесообразно было бы привести фотографии данного участка исследуемого изделия с объяснением возможной причины изменения жесткости, для подтверждения корректности решения алгоритма доводки. Кроме того, возникает вопрос о единственности полученного при автоматической доводке решения, в том числе, в отсутствии фактических измерений геометрии (исходные данные взяты из чертежа).

4. В разделе 1.2 описывается методология доводки вибрационных характеристик численных моделей, основанной на применении лазерной виброметрии и алгоритма автоматической доводки по экспериментальным резонансным формам колебаний. Автором отмечается, что данная методология может быть использована для локализации дефектов в конструкции, а также приводится оценка погрешности локализации дефекта для тестовой конструкции в 7%. Следует отметить, что данная оценка получена для относительно простой конструкции и геометрии дефекта. Требуется дать пояснения, чем определяется данная погрешность и как она может измениться при рассмотрении натуральных конструкций с дефектами, имеющими усталостную природу?

5. В разделе 2.1 диссертации следовало бы уточнить, что испытания профиля лопатки с вибратором проводились в канале со стоячей водой - без учета условий в потоке.

6. На рисунке 2.7 на приведенных временных реализациях виброскорости наблюдаются вертикальные всплески малой длительности. Автором отмечено, что вероятно их появление связано с рассеянием лазерного излучения на контрастных частицах, содержащихся в потоке. Однако далее по тексту отмечается, что использование более чистой воды не снижает количество регистрируемых всплесков. Данный результат требует дополнительных комментариев.

7. В разделе 2.2 диссертации автором предлагается для идентификации изгибных резонансов лопасти винта в акустическом поле использовать расчетно-экспериментальный подход, основанный на бесконтактных лазерных измерениях винта в

воздухе и дальнейшем учете влияния воды как присоединенной массы на изменение собственных частот численным методом. При этом смещение собственных частот лопасти винта возможно также вследствие статической нагрузки, определяющейся упором винта, что также способно повысить точность анализа АЧХ пульсаций давления. Проводились ли оценки влияния преднагруженного состояния на подобное смещение?

8. В диссертации большое количество внимания уделяется результатам испытаний с использованием лазерного виброметра конструкций в различных средах. На данных результатах осуществляется валидация численных моделей. Оценивалась ли погрешность измерения вибрации с использованием лазерного виброметра? Существует ли влияние на постобработку результатов испытаний изменения воздушной среды на водную среду?

9. В тексте диссертации отсутствует единообразие в части выбора опорного уровня при вычислениях в децибельном масштабе уровней пульсации давления и уровней вибрации.

10. На рисунке 3.15 приведены графики пространственного распределения звукового поля (амплитуда и фаза) в кабине на частотах резонансов при возбуждении вибратором. С чем связано количественное совпадение полей амплитуды и фазы для частоты 88 Гц?

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работы, ее научной и практической значимости.

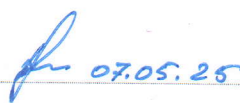
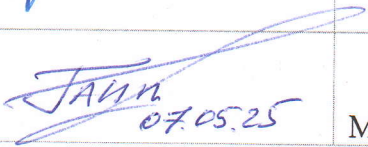
Заключение

Диссертационная работа Стуленкова А.В. на тему «Расчетно-экспериментальное виброакустическое проектирование с использованием лазерной виброметрии» является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлены новые и практически важные экспериментальные и численные результаты по актуальной проблеме, соответствующей научной специальности 1.3.7. – Акустика. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

Диссертационная работа Стуленкова А.В. и отзыв на нее обсуждены на семинаре АО «ОКБМ Африкантов» 22.04.2025 г.

Отзыв подготовили:

Начальник отдела расчетов динамики систем и РУ, доктор технических наук	 07.05.25	Д.Г. Кресов
Начальник бюро отдела акустического проектирования, кандидат технических наук	 07.05.25	М.Ю. Гантман

Сведения о ведущей организации:

Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И. И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов»)

Адрес: 603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, д.15

Факс: (831) 241-87-72

Телефон: (831) 275-26-40

Эл. почта: okbm@okbm.nnov.ru

Интернет-сайт: <https://www.okbm.nnov.ru>