

## ОТЗЫВ

официального оппонента – Павлова Григория Ивановича на диссертационную работу Кустова Олега Юрьевича «Развитие методических основ экспериментального и расчетного определения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций в условиях нормального падения звуковых волн», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.7 – Акустика

Авиационный шум является высокоинтенсивным, негативно влияющим на окружающую среду. В связи с этим, шум самолета регулируется Международной Организацией Гражданской Авиации. Актуальность исследований по снижению шума авиационных двигателей ежегодно растет, поскольку постепенно ужесточаются международные нормы по шуму. В современных турбовентиляторных двигателях из-за высокой степени двухконтурности доминирующим источником шума является вентилятор, а основным средством снижения шума вентилятора - резонансные звукопоглощающие конструкции (ЗПК). К основным характеристикам ЗПК относятся коэффициент звукопоглощения и импеданс. В каналах со звукопоглощающей облицовкой наиболее важной является последняя характеристика. От правильной настройки импеданса ЗПК на условия распространения шума в каналах двигателя зависит эффективность снижения шума. Диссертационная работа Кустова О.Ю. посвящена экспериментальным и численным исследованиям акустических процессов в образцах ЗПК при высоких уровнях звукового давления внутри интерферометра с нормальным падением звуковых волн. Прогнозирование акустических характеристик ЗПК на основе численного моделирования, как дополнительного инструмента для исследования и сравнения, является перспективным подходом, а развитие соответствующих методических основ экспериментального и расчетного определения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций – **актуальной научной задачей.**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка цитированной литературы, который включает в себя 110 работ российских и зарубежных авторов. Общий объем диссертации составляет 137 страниц.

**Во введении** достаточно хорошо отражена актуальность темы, цель и задачи исследования, описана научная новизна, структура, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации проведен широкий обзор экспериментальных, теоретических и расчетных работ, направленных на исследование акустических характеристик ЗПК авиационного двигателя. Проектные значения акустических характеристик ЗПК рассчитывают, используя полуэмпирические модели

импеданса. Суть метода заключается в получении зависимости импеданса от таких важных параметров, как глубина воздушной полости резонатора, процент перфорации панели, диаметр отверстий, толщина панелей, уровень звукового давления, скорость потока на поверхности ЗПК, спектральный состав шума, падающего на ЗПК. Но полумпирические модели импеданса не в полной мере удовлетворяют разработчиков. В первую очередь, это связано с упрощенной математической моделью, которая не учитывает сжимаемость, вязкость и теплопроводность газов, а также вихреобразование у кромки отверстий. При высоких уровнях звукового давления их учет является важным. Кроме того, в моделях используются полумпирические коэффициенты, имеющие большой разброс значений. В последние годы широко применяется численное моделирование физических процессов, происходящих в ЗПК. Результаты расчетов позволяют получать более ясную картину звуковых явлений, возникающих в ЗПК. Однако, для подтверждения адекватности расчетных моделей необходимы экспериментальные результаты с требуемой достоверностью. Одной из главных целей работы и является получение таких данных.

**Вторая глава посвящена** экспериментальной части работы. В ней достаточно подробно описаны методы и способы определения акустических характеристик в ЗПК, а также устройства, принципы действий, преимущества и недостатки различных интерферометров. Детально описана суть нового технического решения. Автором работы модернизирован интерферометр нормального падения звуковых волн, применяемый в Центре акустических исследований ПНИПУ путем разработки автоматизированной системы контроля усилия поджатия образцов ЗПК. Это позволило существенно снизить разброс получаемых акустических характеристик. На данное решение получен патент РФ. Проведены испытания созданного интерферометра с верификацией его работы. Для этого на созданном интерферометре и интерферометре-прототипе измерялись одни и те же образцы резонансных ЗПК при разных условиях окружающей среды, что потребовало проведение исследований в течение нескольких месяцев. Установлено, что созданный интерферометр обеспечивает получение акустических характеристик образцов ЗПК с меньшими разбросами, что особенно заметно в области высоких частот (2,5-6,4 кГц). Данные исследования подтвердили технический результат предложенного изобретения. Выполнен большой объем экспериментов по изучению влияния геометрических особенностей образцов ЗПК на получаемые акустические характеристики. Серия исследований проведенная на интерферометре с контролем поджатия позволила сформулировать важные рекомендации по созданию образцов ЗПК, по акустическим характеристикам которых с большой долей вероятности можно верифицировать расчётные данные.

**В третьей главе** автором приведены результаты подробного анализа теоретических работ по исследованию акустических характеристик в ЗПК. В настоящее время в научной литературе приводится много интересных моделей, с использованием которых решаются задачи с различной постановкой. Но применять их на практике зачастую не представляется возможным из-за трудностей по проверке достоверности того, что рассчитали. Для верификации расчетных данных важно иметь надежные и точно измеренные экспериментальные результаты. Не все параметры, рассчитанные теоретически, можно с требуемой точностью инструментально измерить. В связи с вышеизложенным, к одному из достоинств работы следует отнести удачный выбор модели расчета - расчета акустических давлений в точках установки микрофонов в интерферометре с нормальным падением волн. Данная модель хорошо подходит для верификации результатов численного моделирования путем сравнения с натурным экспериментом, проводимым в соответствии со стандартом на 2-микрофонный МПФ. В работе детально рассмотрены различные постановки численного моделирования физических процессов в интерферометре нормального падения звуковых волн с целью прогнозирования акустических характеристик образцов ЗПК. Исследовано влияние параметров расчетной модели на точность прогнозирования акустических характеристик ЗПК. Предложенная модель верифицирована для случая однослойной и многослойной сотовой ЗПК. Проведены экспериментальные и расчетные исследования разных образцов двух- и трехслойных ЗПК в модернизированном интерферометре. Для верификации разработанного метода прогнозирования акустических характеристик двух- и трехслойных ЗПК исследования проводились для уровней звукового давления 140 дБ в диапазоне частот 500-3000 Гц. Установлено, что акустические характеристики многослойных образцов ЗПК, полученные в натуральных экспериментах, имеют удовлетворительное совпадение с результатами расчетов. Научная задача в виде комплексного исследования (численных расчетов с верификацией полученных значений экспериментальными данными) для многослойных образцов ЗПК, конструкционные параметры которых соответствуют натурным ЗПК, применяемым в авиационных двигателях, решена впервые.

**В четвертой главе** подробно описана методика прогнозирования акустических характеристик звукопоглощающих конструкций локально-реагирующего типа на основе численного моделирования физических процессов в интерферометре с нормальным падением волн, которая обобщенно, состоит из трех этапов. Рассмотрены ближайшие перспективы применения методики в прикладных и научных исследованиях с обоснованием их приемлемости при решении той или иной практической задачи.

**В заключении** кратко описаны основные результаты работы.



### **Научная новизна работы:**

1. Впервые проведены комплексные исследования по оценке влияния серии конструктивных особенностей образцов ЗПК на разбросы акустических характеристик, получаемых по результатам испытаний на интерферометре нормального падения. На основе проведенных исследований сформулированы методические рекомендации проведения верификационных испытаний образцов ЗПК в интерферометре, которые направлены на снижение рассогласования результатов эксперимента и проверяемой теории прогнозирования акустических характеристик ЗПК.

2. Предложена методика прогнозирования акустических характеристик многослойных ЗПК локально-реагирующего типа на основе численного моделирования физических процессов в интерферометре нормального падения при высоком уровне звукового давления. Впервые на основе численного моделирования проведены расчеты акустических характеристик полномасштабных образцов, соответствующих реальным ЗПК, используемым в авиационных двигателях. Продемонстрировано, что получаемые на основе методики акустические характеристики лучше согласуются с результатами натуральных экспериментов, чем предсказанные на основе полуэмпирической теории.

3. Разработан интерферометр с нормальным падением волн, позволяющий проводить испытания образцов ЗПК в условиях контролируемой силы поджатия образца. Поджатие образца осуществляется поршнем, соединенным с пневматическим цилиндром. Для контроля давления блок регулирования оборудован цифровым манометром. Получен патент на изобретение.

4. Разработаны и созданы образцы, имеющие минимальные погрешности изготовления одно-, двух- и трехслойных ЗПК с характеристиками, соответствующими реальным звукопоглощающим облицовкам каналов авиационного двигателя (степень перфорации, толщина пластины перфорации, глубина резонансной полости, диаметр отверстий перфорации). Уровень разработки соответствует современным мировым тенденциям создания посредством аддитивных технологий опытных образцов ЗПК для научных исследований в области аэроакустики.

**Методы и подходы в диссертационной работе.** Экспериментальная часть базируется на измерениях образцов локально-реагирующих ЗПК в интерферометрах нормального падения с диаметрами каналов 30 и 50 мм в диапазонах частот 500-6400 и 400-4200 Гц, соответственно, при уровнях звукового давления до 150 дБ. Результаты измерений обрабатываются стандартизированным двухмикрофонным методом передаточной функции. На модернизированном и запатентованном интерферометре проведены необходимые экспериментальные работы. При измерениях использовались оборудование и программное обеспечение известной на рынке виброакустической аппаратуры фирмы Brüel&Kjær (Дания). Расчетные исследования образцов ЗПК рассмотрены в

частотном диапазоне 500-3500 Гц. Численное моделирование реализовалось путем прямого решения нестационарных уравнений Навье-Стокса с учетом сжимаемости в полной трехмерной постановке, в результате которого в точках, симулирующих работу микрофонов, записывалось акустическое давление. Полученные в численном моделировании зависимости «давление-время» обрабатываются стандартизированным двухмикрофонным методом передаточной функции, в результате чего определяется импеданс и коэффициент звукопоглощения образца ЗПК. Полученные расчетные и экспериментальные акустические характеристики образцов локально-реагирующих ЗПК хорошо согласуются с известными результатами исследований ЗПК подобного класса.

**Практическая значимость.** Модернизированный интерферометр с нормальным падением звуковых волн с автоматизированной системой контроля усилия поджатия образца позволяет получать акустические характеристики звукопоглощающих конструкций с меньшими величинами разбросов. Развитие экспериментального и расчетного определения акустических характеристик образцов ЗПК при высоких уровнях звукового давления улучшит настройку ЗПК на эффективное снижение шума авиационных двигателей, что поможет существенно улучшить их эксплуатационные характеристики.

**Результаты** диссертационной работы Кустова О.Ю. могут быть использованы в учебном процессе, а также при выполнении научно-исследовательских работ в Казанском национальном исследовательском техническом университете им. А. Н. Туполева - КАИ, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Центральном аэрогидродинамическом институте имени профессора Н. Е. Жуковского, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «ОДК-Сатурн».

По работе отмечены следующие **замечания**:

1. При проведении численного моделирования физических процессов в интерферометре стенки модели обычно рассматриваются как абсолютно жесткие, т.е. при любых условиях их перемещения равны нулю. Автор утверждает, что данная ситуация отличается от реальных условий эксперимента, особенно при высоких УЗД, где на стенках интерферометра присутствует виброперемещение. Однако, в работе нет данных, доказывающих это. Есть вероятность того, что это проблема решается утолщением стенки интерферометра. Например, в работе (Ильгамов М.А. Колебания упругих оболочек содержащих жидкость и газ. - М.: Наука, 1969. - 184 с.) об этом и говорится. Для снятия этого вопроса, хорошим дополнением в работе было бы тензометрическое исследование состояния стенок прибора при создании в нем высоких значений УЗД.

2. По результатам сравнительного анализа экспериментальных данных, испытания 4-х образцов ЗПК на интерферометре ЛМГШиМА с новой конструкцией показали хорошее совпадение с результатами интерферометра ЦАИ во всём используемом в данном исследовании диапазоне частот (от 500 до 3000 Гц). Тогда справедливо будет задать вопрос: «Для чего разрабатывался новый интерферометр? Нельзя ли было использовать интерферометр у коллег из ЦАИ?». Если проанализировать результаты полученных исследований в области высоких частот (6000 Гц), то модернизированный интерферометр не решает проблему разброса результатов - разбросы акустических характеристик образца ЗПК, полученных на обоих интерферометрах, практически, не отличаются.

3. Во второй главе автором приведен большой объем экспериментальных данных, который представляет собой ценный материал для практиков. Однако, полученные результаты не сопоставлены с результатами других авторов. Хотя, в этой же главе, автором приведена работа, в которой детально представлены результаты оценки влияния производственного процесса (перфорирование и склеивание перфорированного листа с сотами) на акустические характеристики панели ЗПК.

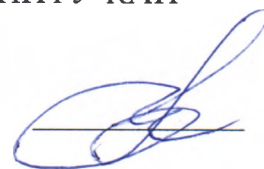
Указанные замечания не снижают научной и практической значимости полученных результатов в диссертации соискателя.

По результатам работы опубликованы 19 научных статей в изданиях, определённых в перечне ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, из них 8 работ опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, по материалам конференций опубликовано 4 работы в журналах, входящих в базу данных Scopus. Тема диссертационной работы соответствует специальности 1.3.7 – Акустика.

**Заключение.** Диссертационная работа Кустова Олега Юрьевича по теме «Развитие методических основ экспериментального и расчетного определения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций в условиях нормального падения звуковых волн» является законченной научно-исследовательской работой, в которой предложено комплексное решение задачи по созданию высокоэффективных звукопоглощающих конструкций, имеющей большое значение для развития авиационного двигателестроения и отвечает требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением №842 Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г., а сам автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

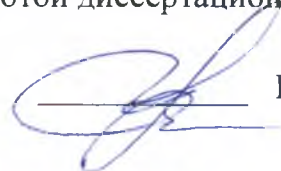


Павлов Григорий Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой специальных технологий в образовании Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева - КАИ.  
420127, Казань, ул. Дементьева 2а, 6-е здание КНИТУ-КАИ  
Тел.:+7(962)5526925; e-mail:  
GIPavlov@kai.ru



Павлов Г.И.

Я, Павлов Григорий Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.



Павлов Г.И.

Подпись Павлова Г.И. удостоверяю

М.П.

Отзыв составлен 14 11 2022 г.

Подпись Алиева Л. Ч.  
заверяю. Начальник управления  
делопроизводства и контроля

