

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.214.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ТИХООКЕАНСКОГО  
ОКЕАНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. В.И. ИЛЬИЧЕВА  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 16 декабря 2022 г. №3

О присуждении Кустову Олегу Юрьевичу, гражданство РФ, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Развитие методических основ экспериментального и расчетного определения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций в условиях нормального падения звуковых волн» по специальности 1.3.7 – «Акустика» принята к защите 16 декабря 2022 г., протокол № 2, диссертационным советом 24.1.214.01 созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 690041, г. Владивосток, Балтийская, 43, утвержденным приказом Минобрнауки России № 714/нк от 2 ноября 2012 г.

Соискатель Кустов Олег Юрьевич, 15 мая 1991 года рождения, в 2015 году окончил ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) по направлению подготовки 141100.62 – «Энергетическое машиностроение».

В 2017 г. Кустов О.Ю. окончил магистратуру по направлению подготовки 24.04.05 – «Двигатели летательных аппаратов» в ФГБОУ ВО ПНИПУ.

С 2017 по 2021 Кустов О.Ю. обучался в очной аспирантуре ПНИПУ по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», направлению подготовки 24.06.01 – «Авиационная и ракетно-космическая техника».

Работает инженером I-категории на кафедре «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГАОУ ВО «ПНИПУ» с 2021 года. В период подготовки диссертации соискатель Кустов О. Ю. работал в «Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа» Центра акустических

исследований ФГАОУ ВО «ПНИПУ» в должности младшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» на кафедре «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» и в «Лаборатории механизмов генерации шума и модального анализа» Центра акустических исследований ФГАОУ ВО «ПНИПУ».

Научный руководитель – Бульбович Роман Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», директор Центра акустических исследований ФГАОУ ВО «ПНИПУ».

Официальные оппоненты:

– Комкин Александр Иванович, гражданство РФ, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», кафедра экологии и промышленной безопасности;

– Павлов Григорий Иванович, гражданство РФ, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ», заведующий кафедрой специальных технологий в образовании (СТиО) Казанского Учебно-исследовательского и методического центра (КУИМЦ) для людей с ограниченными возможностями по слуху;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара, в своем положительном отзыве, подписанном Иголкиным Александром Алексеевичем, доктором технических наук, профессором кафедры «Автоматические системы энергетических установок» и Сафиным Артуром Ильгизаровичем, кандидатом технических наук, доцентом кафедры «Автоматические системы энергетических установок», утвержденном Прокофьевым Андреем Брониславовичем, доктором технических наук, доцентом, первым проректором - проректором по научно-исследовательской работе, указала, что диссертационная работа носит актуальный характер и может улучшить настройку звукопоглощающих конструкций на эффективное снижение шума отечественных авиационных двигателей, что поможет лучше удовлетворять настоящие и перспективные международные нормы по шуму на местности. Результаты диссертационной работы Кустова О.Ю. могут быть использованы в

учебно-методических процессах и научно-исследовательских работах ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», АО «ОДК-Авиадвигатель». Автореферат и публикации автора достаточно полно и точно передают содержание и основную суть диссертационной работы.

Диссертационная работа Кустова Олега Юрьевича «Развитие методических основ экспериментального и расчетного определения акустических характеристик звукопоглощающих конструкций в условиях нормального падения звуковых волн» является полностью законченной научно-исследовательской работой и отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением №842 Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. в текущей редакции, а соискатель Кустов Олег Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.7 – Акустика.

Соискатель имеет 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. Полученные результаты прошли апробацию на 7 международных и 8 всероссийских научных конференциях. В опубликованных работах отражены основные результаты диссертации. Основные работы по теме диссертации:

1. Храмов И.В., **Кустов О.Ю.**, Федотов Е.С., Синер А.А. Численное моделирование механизмов гашения звука в ячейке звукопоглощающей конструкции // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 4. С. 508-514 (вклад соискателя 30 %).

2. Fedotov E.S., **Kustov O.Yu.**, Bulbovich R.V. Determination of end correction of Helmholtz resonator based on numerical simulation // AIP Conference Proceedings, Vol. 2027, No. 030092, 2018 (вклад соискателя 40 %).

3. Khramtsov I.V., **Kustov O.Yu.**, Palchikovskiy V.V. Determination of acoustic characteristics of full-scale sample of single-layered honeycomb liner based on numerical simulation // Akustika, Vol. 32, pp. 182-188, 2019 (вклад соискателя 50 %).

4. **Кустов О.Ю.**, Храмов И.В., Бульбович Р.В. Влияние точности геометрии образцов резонансных звукопоглощающих конструкций на их акустические характеристики // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение, 2019, Т. 18, № 1, с. 67-77 (вклад соискателя 80 %).

5. **Кустов О.Ю.** О влиянии геометрических погрешностей при создании 3D - образцов ЗПК на их акустические характеристики // Научно-технический вестник Поволжья, 2018, № 8, С. 21-23 (вклад соискателя 100 %).

6. Khramtsov, I.V., **Kustov O.Yu.**, Palchikovskiy V.V. Adaptation of the Dean method to determine the acoustic characteristics of liner samples based on numerical simulation of physical processes in a normal incidence impedance tube // International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2020. P. 9243912 (вклад соискателя 40 %).

7. **Kustov O.Yu.**, Palchikovskiy V.V., Khramtsov I.V., Bulbovich R.V. On control of a pressing force applied to acoustic liner sample in a normal incidence impedance tube // Akustika, Vol. 39, pp. 279-283, 2021 (вклад соискателя 80 %).

8. Khramtsov, I.V., Palchikovskiy V.V., **Kustov O.Yu.** Determination of the impedance of a honeycomb resonator by Dean's method and direct method in a computational experiment with grazing incidence of waves // Akustika, Vol. 41, pp. 25-29, 2021 (вклад соискателя 30 %).

На автореферат диссертации поступило 8 отзывов, все отзывы положительные:

- от к.ф.-м.н., Демина И.Ю., доцента кафедры акустики Радиофизического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского». Замечания в отзыве отсутствуют;

- от к.ф.-м.н., Конькова А.И., научного сотрудника лаборатории акустики гетерогенных сред ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук». Замечания:

1. Проведено численное моделирование физических процессов, происходящих внутри ячеек ЗПК, но не представлена подробная визуализация процессов.
2. Рассмотрены расчеты лишь по одному двух- и трехслойному образцу ЗПК.

- от к.ф.-м.н., Миронова М.А., начальника Теоретического отдела, старшего научного сотрудника АО «Акустический институт имени акад. Н.Н. Андреева». Замечания:

1. На рисунках 3-5 и в тексте не указана нормировка импеданса.
2. При выборе сеточного разбиения необходимо ориентироваться на глубину проникновения вязкой волны. В тексте (стр. 13) не указано, выполняется ли это требование.
3. К сожалению, в автореферате, как, впрочем, и в диссертации, нет обсуждения физики нелинейного поведения резонаторов при больших уровнях звука и каких-то простых количественных оценок.

- от к.ф.-м.н., Острикова Н.Н., зам. начальника отделения по научным исследованиям – начальника отдела №1 НИО-9 МК ФАУ «ЦАГИ». Замечания:

1. На стр. 7 в абзаце 2 содержатся два не вполне аккуратных общих утверждения. Первое о том, что в полуэмпирических моделях импеданса ЗПК пренебрегают эффектом сжимаемости, а второе о том, что полуэмпирические модели 2- и 3-слойных ЗПК «практически не разработаны».
2. Из текста не ясно, как усилие поджатия образца влияет на величину измеряемого импеданса, и является ли это следствием конкретной конструкции импедансной трубы, например, из-за наличия шайбы, фиксирующей образец, или эффектом общего положения.
3. На стр. 9 написано, что измерения импеданса одного и того же образца ЗПК проводились в 10 разных дней при разных характеристиках окружающей среды. Хорошо известно, что импеданс сотовых ЗПК зависит от температуры и давления окружающей среды. Является ли разброс реальных частей импеданса, продемонстрированный на рис. 3 и 4, следствием различий указанных характеристик окружающей среды?
4. В тексте не указано какая полуэмпирическая модель однослойных ЗПК (существует много различных моделей) использовалась при расчетах импеданса 2- и 3-слойных ЗПК для проведения сравнения с результатами численного моделирования и экспериментов, представленных на рис. 12 и 13. Поскольку пиковые значения реальных частей импеданса 2- и 3-слойных ЗПК существенно занижены при расчетах по полуэмпирической модели по сравнению с экспериментальными данными (рис. 12 и 13), то возможно при расчете импеданса многослойных ЗПК не учитывалось отличие звуковых давлений на перфорированных листах второго и третьего слоев от звукового давления на лицевой панели.

- от к.т.н., Синера А.А., начальника отдела внешних характеристик АО «ОДК-Авиадвигатель». Замечания:

1. В автореферате отсутствует упоминание других авторов, занимающихся подобными задачами, обзорная часть работы описана в автореферате не очень удачно;
2. В тексте автореферата имеются не очень удачные формулировки, например, на стр.7 указано «вихревых структур, образуемых за счет срыва течений... ». Поскольку рассматривается одно течение, использовать множественное число в данном контексте не очень удачно.
3. На странице 10 после рисунка 4 указано «Видно, что акустический интерферометр с контролем поджатия образца обеспечивает меньший разброс акустических характеристик...». Из сравнения рисунков 3 и 4 на глаз сделать такой вывод довольно трудно. Гораздо более информативным выглядит сравнение по среднеквадратическим отклонениям на рисунке 5. Поэтому указанный вывод было бы логичнее делать после рисунка 5, а не после рисунка 4.

4. Система уравнений движения вязкого теплопроводного термодинамически совершенного газа называется уравнениями Навье-Стокса. Более правильно было бы называть уравнением Навье-Стокса только уравнение движения, а для полной системы использовать название «Система уравнений движения вязкого теплопроводного термодинамически совершенного газа»;

5. На странице 13, где указаны рекомендации по настройке численной модели, отсутствуют рекомендации по сеточному числу Рейнольдса (параметр  $u^+$  в коммерческом пакете) несмотря на то, что далее, в разделе «Основные результаты работы» на странице 19, эти рекомендации приведены.

6. На рисунке 12 приведено сравнение результатов расчета по созданной численной методике с результатами расчета по полуэмпирической модели, но не указано какая именно полуэмпирическая модель была использована, нет ссылки на автора модели.

- от д.ф.-м.н. Шардакова И.Н., заведующего лабораторией Института механики сплошных сред УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра РАН. Замечания:

1. При описании структурной схемы модифицированного интерферометра не сказано, каким образом контролировалась температура образца и температура в камере интерферометра, хотя этот параметр очень значим для акустических характеристик.

2. Для результатов измерений и расчетов, представленных на рисунках 3, 4, 12, 13 также отсутствует информация о значениях температуры.

- от д.т.н. Максименкова В.М, профессора кафедры ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» АО «ОДК-Авиадвигатель». Замечания:

1. В автореферате рассмотрены вопросы, касающиеся совпадения результатов усеченной и полной постановки моделирования по оценке импеданса и коэффициента звукопоглощения ЗПК на низких частотах. Как окажут влияние на оценку импеданса и коэффициента звукопоглощения наличие высоких частот.

- от к.т.н., Бетинской О.А., ведущего конструктора конструкторского отдела разработки программного и математического обеспечения САУ АО «ОДК-Стар». Замечания:

1. При сравнении результатов расчета, приведенных на рисунке 12, по разработанной численной модели и полуэмпирической модели, нет конкретного указания на идентификацию полуэмпирической модели, что это за модель, кто является ее разработчиком.

2. Оформление графического материала не соответствует требованиям ГОСТ 2.105-2019.

Все отзывы положительные на все имеющиеся в отзывах замечания диссертант убедительно ответил. В целом, в отзывах отмечено, что диссертационная работа представляет собой самостоятельно выполненное, завершённое научное исследование на актуальную тему, обладает научной новизной и практической значимостью, содержит результаты развития экспериментального и расчетного определения акустических характеристик образцов ЗПК, применяемых в авиадвигателестроении, при высоких уровнях звукового давления, показано комплексное применение предложенной методики в прикладных и научных исследованиях.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается направлением и особенностями их исследований, которые соответствуют тематике диссертации Кустова О. Ю.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- 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, что подтверждает новизну созданного прибора на мировом уровне.

- 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.

- Разработаны и созданы эталонные (имеют минимальные погрешности изготовления) образцы 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.

- 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. 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.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- развитие экспериментального и расчетного определения акустических характеристик образцов звукопоглощающих конструкций при высоких уровнях звукового давления улучшит разработку новых звукопоглощающих конструкций на эффективное снижение шума отечественных авиационных двигателей, что поможет лучше удовлетворять настоящие и перспективные международные нормы по шуму на местности;

- разработанный интерферометр с нормальным падением звуковых волн с автоматизированной системой контроля усилия поджатия образца позволяет получать акустические характеристики звукопоглощающих конструкций с меньшими величинами разбросов;

- результаты диссертационной работы могут быть использованы в учебно-методических процессах и научно-исследовательских работах Казанского национального исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «ОДК-Сатурн».

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается соответствующими актами и справками. Имеются акты использования результатов диссертации в научных работах и учебном процессе ФГАОУ ВО ПНИПУ, есть учебно-методическое пособие и получен патент на акустический интерферометр.

Результаты проведенных исследований использовались:

- в гранте Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ-р\_а) «Расчетно-экспериментальное исследование механизмов гашения звука в резонансных звукопоглощающих конструкциях» по договору 17-41-590107;

- в гранте Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ-Аспиранты) «Развитие методов прогнозирования акустических характеристик многослойных звукопоглощающих конструкций на основе численного



моделирования физических процессов в резонаторах» по договору № 19-32-90035.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- полученные результаты и выводы основаны на обширном экспериментальном материале и подтверждаются использованием стандартизованного экспериментального метода проведения акустических экспериментов, методов цифровой обработки сигналов и анализа данных, повторяемостью результатов многократных экспериментов и согласованностью экспериментальных данных с результатами численного моделирования;

- численное моделирование реализуется путем прямого решения нестационарных уравнений Навье-Стокса с учетом сжимаемости в полной трехмерной постановке, в результате которого в точках, симулирующих работу микрофонов, записывается акустическое давление. Зависимости «давление-время», полученные в численном моделировании, обрабатываются стандартизованным 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.

Личный вклад соискателя состоит в: непосредственном участии во всех представленных в работе измерениях и расчетах, соискатель участвовал в обработке, анализе и обобщении полученных расчетных и экспериментальных данных. Самостоятельно спроектировал, собрал и верифицировал установку «Интерферометр с нормальным падением волн», выполнил ее настройку, провел на ней испытания образцов ЗПК и полную обработку результатов испытаний. При его непосредственном участии была спроектирована система контроля поджатия образцов ЗПК с учетом всех конструкционных особенностей, написан патент и учебно-методическое пособие. Также под руководством автора реализовано развитие методологии проведения расчетно-экспериментальных исследований ЗПК в целом, позволяющее снизить разбросы определяемых акустических характеристик. Доля автора диссертации в представленных исследованиях составляет от 40% до 100%. Доля автора диссертации в статьях в соавторстве составляет от 30% до 100%.

Соискатель Кустов О.Ю. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию. С замечаниями согласился.

На заседании 16 декабря 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Кустову О. Ю. ученую степень кандидата технических наук по специальности 1.3.7 – «Акустика».

