

На правах рукописи



Сухова Екатерина Александровна

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЫХЛОПА ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ
С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань, 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ» на кафедре «Специальные технологии в образовании».

Научный руководитель: **Павлов Григорий Иванович,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Специальные технологии в образовании» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ».

Официальные оппоненты: **Ларионов Виктор Михайлович,**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Техническая физика и энергетика» ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Максименков Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Самолетостроение» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

Защита состоится 4 марта 2020 года в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.079.02 при ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ» (КНИТУ–КАИ) по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10 (зал заседаний Ученого совета).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим присылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.079.02.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ» и на сайте <http://old.kai.ru/science/disser>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.079.02,
доктор технических наук



В.А. Алтунин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Современные тенденции развития военной промышленности показывают, что с каждым годом происходит расширение рынка военной авиационной техники, в том числе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В зависимости от решаемых задач беспилотные летательные аппараты оснащаются разными видами двигателей: электродвигателями, турбореактивными двигателями, двигателями внутреннего сгорания (ДВС), прямоточными воздушно-реактивными двигателями и т.п. В частности, в разведывательных целях на БПЛА малой и средней дальности ввиду простоты конструкции и большого запаса хода используют ДВС малой мощности. Основными демаскирующими факторами у БПЛА с ДВС, используемых в военных целях, являются тепловое и шумовое излучения. Для уменьшения интенсивности шума ДВС используются глушители, в устройствах ДВС малой мощности их часто называют искрогасителями. Применяемые устройства, как правило, не обеспечивают необходимый низкий уровень шума, а производители подобных агрегатов мало обращают на это внимание. Снижение уровня шума ДВС, эксплуатируемого в составе БПЛА военного назначения, является актуальной задачей.

При проектировании глушителей необходимо учитывать, что эффект снижения акустической энергии в выхлопной системе ДВС напрямую связан с повышением газодинамического сопротивления в глушителе и, как следствие, потерей мощности двигателя. Помимо этого, к глушителям выхлопной системы ДВС малой мощности, используемых в составе БПЛА, предъявляются дополнительные конструктивные требования: небольшие габаритные размеры и малый вес. Эти факторы также необходимо учесть. В конечном итоге, вышеназванные требования при разработке глушителя накладывают ряд ограничений на выбор оптимальных конструкторских решений.

Основной причиной шума выхлопа ДВС являются колебания давления в виде периодически повторяющихся импульсов в потоке отработавших газов. Снижение такого рода шума осуществляется посредством уменьшения интенсивности пульсаций давления отработавших газов до выброса в окружающее пространство. Исследованию механизма образования и снижению шума ДВС посвящены работы В.В. Тупова, Н.И. Иванова, А.И. Комкина, А.А. Иголкина, И.В. Малкина, Ю.Л. Ткаченко, М.Н. Дробахи, А.В. Васильева, А.В. Мокринского, Г.И. Павлова, Р.Н. Старобинского, С.К. Петрова, М.И. Фесина, M.L. Munjal, P.O.A.L. Davies, D. Potente и др. Объектом исследования этих авторов являлись пульсирующие струи, формируемые в основном выхлопными системами четырехтактных ДВС. К работам по исследованию шума выхлопной системы ДВС малой мощности можно отнести труды В.С. Геращенко и В.В. Тупова, Б.А. Егоренкова, А.А. Строкина, А. Fioravanti, M. C. Storm, R. F. Huang, Y. Takahashi, T. Kaneda и др., в которых рассматривались мотоциклетные двигатели. Как показывает анализ научно-технической литературы, работы по снижению шума ДВС малой мощности в открытой печати крайне редки. В одной из этих работ рассмотрены вопросы исследования эффективности шумоглушения системы вы-

хлопа ДВС малой мощности, используемого в составе БПЛА, в которой в качестве звукопоглощающего материала автором, J. Sesler, предлагается огнеупорная пена, имеющая удовлетворительные шумопоглощающие характеристики.

Целью исследования является исследование рабочих процессов в выхлопной системе ДВС малой мощности с целью улучшения его технических характеристик.

Объект исследования – выхлопная система ДВС малой мощности ZDZ–80 RV БПЛА.

Предмет исследования – газодинамические и акустические процессы, происходящие в системе выхлопа ДВС малой мощности.

Задачи исследования:

1. Разработать техническую схему системы выхлопа ДВС малой мощности с оптимальными техническими параметрами.

2. Разработать безмоторный испытательный стенд и методику проведения исследований технических характеристик глушителей шума ДВС малой мощности.

3. Экспериментальным методом установить зависимость снижения уровня шума от конструктивных параметров внутренних элементов глушителя.

4. Провести численные исследования газодинамических характеристик и резонансных частот глушителя.

5. Разработать опытный образец глушителя шума ДВС малой мощности и исследовать его акустические и газодинамические характеристики.

6. Разработать рекомендации по проектированию глушителя шума поршневого ДВС малой мощности для БПЛА малой и средней дальности.

Научная новизна работы:

1. Экспериментальные зависимости снижения уровня шума системы выпуска ДВС малой мощности от конструктивных параметров элементов глушителя шума.

2. Результаты расчета газодинамических параметров и резонансных частот глушителя шума ДВС малой мощности предложенной конструкции.

3. Экспериментальные результаты определения газодинамического сопротивления и резонансных частот разработанного глушителя шума.

Методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы численные и экспериментальные методы исследования.

Достоверность результатов исследования обеспечивается применением современных вычислительных средств и методов исследований, сертифицированных измерительных приборов, сходимостью результатов численных исследований и экспериментов, качественным совпадением полученных результатов с результатами других авторов.

Теоретическая значимость работы. Полученные результаты расчетных исследований верифицированы и дополняют имеющиеся теоретические знания в области газодинамических и акустических процессов в системе выпуска ДВС малой мощности.

Практическая значимость работы:

1. Разработанный глушитель шума используется в составе одноцилиндрового двухтактного двигателя модели ZDZ-80 RV БПЛА и обеспечивает требуемые акустические и газодинамические характеристики.

2. Разработанные испытательные стенды используются при проведении научно-исследовательских работ и лабораторных занятий по дисциплине «Теория рабочих процессов ДВС» КНИТУ-КАИ.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Результаты расчета газодинамических параметров и резонансных частот глушителя шума ДВС малой мощности предложенной конструкции.

2. Методика оценки эффективности работы глушителей шума ДВС малой мощности, основанная на сравнении акустических характеристик и газодинамического сопротивления исследуемых глушителей на безмоторном испытательном стенде.

3. Экспериментальные зависимости снижения уровня шума системы выпуска ДВС малой мощности от конструктивных параметров элементов глушителя шума.

4. Конструктивная схема двухкамерного глушителя шума с плоской внутренней перегородкой и кольцевым зазором.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались на X конференции школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (г. Казань, 2016 г.), на Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2016, 2017 гг.), на XXIII Международной молодежной научной конференции (школы молодых ученых) «Туполевские чтения» (г. Казань, 2017 г.), на X Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.), на VI Всероссийской научно-технической конференции по аэроакустике (г. Звенигород, 2019 г.), на научно-техническом совете КНИТУ-КАИ (г. Казань, 2019 г.).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 24 печатных работах, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 1 патент РФ на изобретение, 4 статьи в изданиях из базы Scopus и Web of Science, 17 публикаций в других изданиях.

Личный вклад автора. Автор работы принимал непосредственное участие в формулировании цели и задач исследований, по результатам литературных исследований разрабатывал различные конструкции глушителей шума выпуска, технические схемы моторного и безмоторного испытательных стендов, проводил численные и экспериментальные исследования и анализ их результатов, сформулировал выводы по диссертации.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов». Полученные в работе научные результаты соответствуют п. 1 «Теория и рабочий процесс тепловых и электроракетных двигателей летательных аппаратов, а также энергетических установок, узлов и

систем, включая элементы силовой установки, сопряженные с двигателем. Оптимизация схем и параметров двигателей», п. 2 «Характеристики тепловых, электроракетных двигателей летательных аппаратов и их энергетических установок, отдельных узлов и систем при различных условиях их использования», п. 8 «Колебания в тепловых двигателях летательных аппаратов. Резонансные явления, автоколебательные и нестационарные процессы в конструкциях двигателей. Способы борьбы с опасными вибрациями в двигателях», п. 10 «Методы испытания двигателей, их элементов и агрегатов, системы автоматизированного сбора, обработки и анализа экспериментальных данных, включая комплексную автоматизацию стендовых испытаний», п. 13 «Математическое моделирование рабочих процессов, характеристик, динамических процессов, рабочих состояний двигателей и энергетических установок, методы их проектирования и конструирования применительно к системам автоматизированного проектирования. Математическое моделирование стадий и этапов жизненного цикла (создания, производства и эксплуатации двигателей и установок)», п. 18 «Процессы создания и доводки двигателей летательных аппаратов. Способы улучшения характеристик и основных данных двигателей, находящихся в серийном производстве и эксплуатации», п. 20 «Методы повышения живучести и снижения повреждаемости».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из списка принятых сокращений, введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников информации и приложений. Общий объем диссертации составляет 113 страниц, включая 54 рисунка, 12 таблиц и 4 приложения. Список использованных источников информации включает 111 наименований. Приложения содержат изображения штатных, лабораторных моделей глушителей и копии актов внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыты актуальность и степень разработанности темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, обоснована достоверность результатов, описана научная новизна работы, изложены теоретическая и практическая значимости работы, приведена краткая характеристика полученных результатов диссертации.

В первой главе раскрыто состояние вопроса исследования по выхлопной системе ДВС малой мощности, приведены отличительные особенности работы системы выпуска двухтактных двигателей внутреннего сгорания от четырехтактных, дана характеристика основным источникам шума двигателя, проанализированы типы и конструкции глушителей шума выхлопа ДВС малой мощности, рассмотрены современные методы, используемые при определении эффективности проектируемых глушителей.

Экспериментально определены характер шума выхлопной системы ДВС малой мощности беспилотного летательного аппарата и его частотный диапазон, а также установлены исходные данные для проектирования глушителя шума системы выхлопа.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям акустических и газодинамических характеристик глушителей на изготовленном мотор-

ном стенде (см. рис.1), с двухтактным одноцилиндровым карбюраторным двигателем малой мощности с техническими характеристиками: мощностью 6 кВт при 8000 об/мин, номинальной частотой вращения коленчатого вала двигателя 5200 об/мин, расходом топлива на номинальном режиме 1,2 л/ч. В данной главе также приведены описания методики и средств измерения акустических и газодинамических параметров глушителей шума, оценены неопределенности измерений исследуемых величин.

Экспериментально установлено, что на крейсерском режиме работы двигателя «энергонесущими» являются низкие и средние частоты в диапазоне от 500 Гц до 800 Гц (см. рис. 2), уровень звука составляет $L = 104$ дБ.

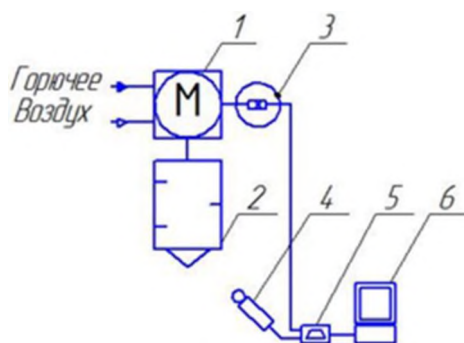


Рисунок 1 – Схема испытательного стенда: 1 – карбюраторный двигатель; 2 – глушитель шума; 3 – датчик Холла; 4 – микрофон; 5 – шумомер; 6 – ПК

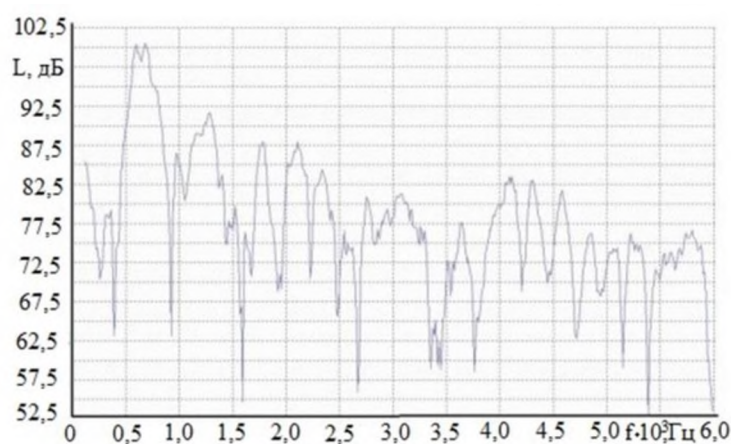


Рисунок 2 – Частотный спектр акустического сигнала в зоне выхлопа ДВС малой мощности без глушителя при частоте вращения вала двигателя 5000 об/мин

По результатам анализа научно-технической литературы были выбраны наиболее перспективные конструктивные схемы глушителей шума и на их основе разработаны свои схемы, по которым было создано пять экспериментальных моделей глушителей шума ДВС малой мощности (см. рис. 3).

На моторном стенде были определены акустические газодинамические характеристики данных вариантов глушителей (см.табл.1, 2), по результатам сравнения полученных данных был выявлено, что эффективным вариантом глушителя является образец с внутренней вставкой и перфорированной перегородкой (см. рис. 3). Конструкция выбранного варианта глушителя была выполнена разборной для проведения детальных исследований.

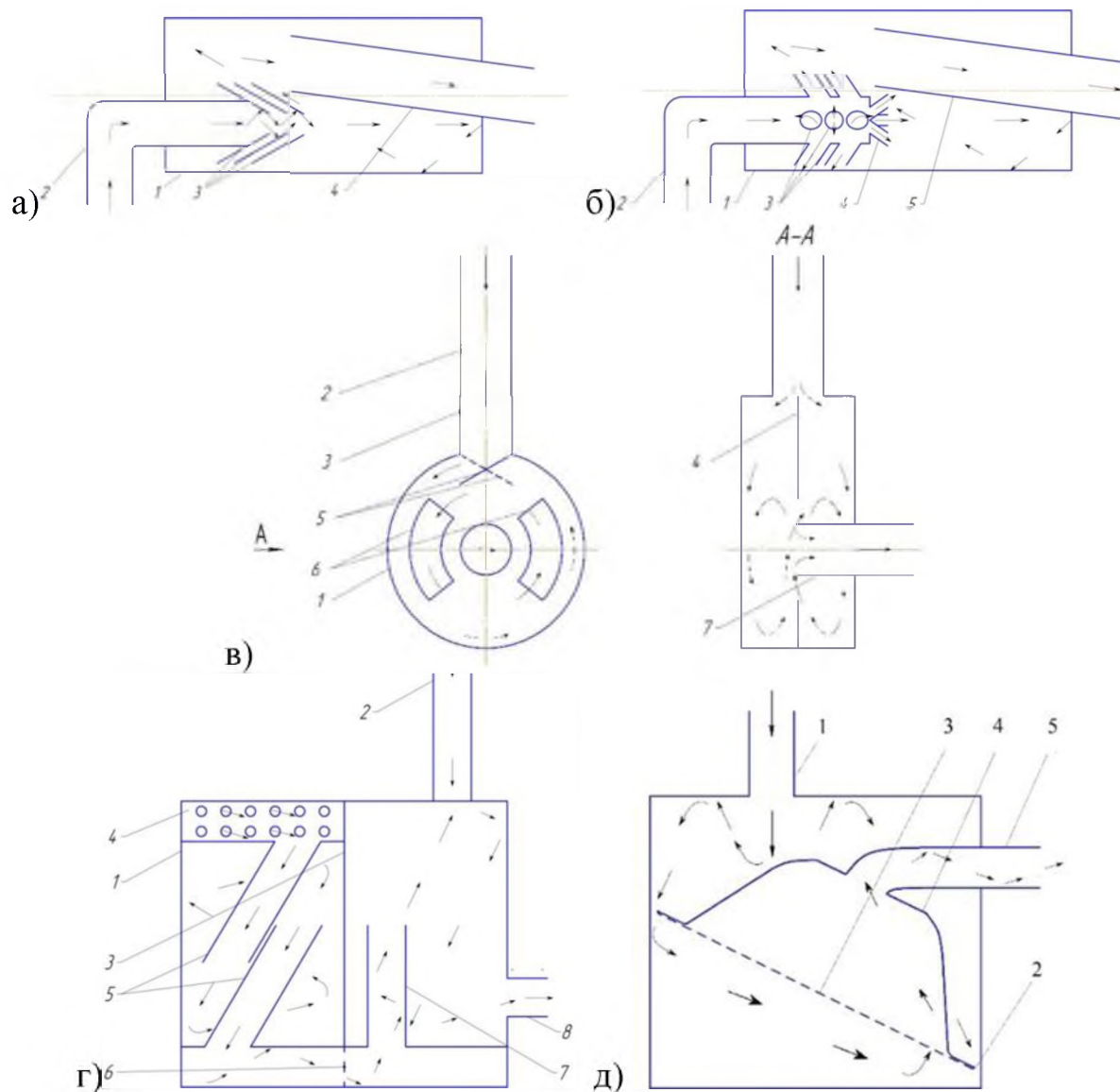


Рисунок 3 – Конструктивные схемы глушителя шума: а) с конусами; б) с наклонными патрубками; в) со встречными потоками; г) четырехкамерного; д) с полуэллипсовидной вставкой

Таблица 1 – Уровни звука (L, дБ) созданных глушителей шума на испытательном стенде при $Q_1 = 0,7$ л/ч и $Q_2 = 0,95$ л/ч

Вариант глушителя шума	n, об/мин	
	3800	4800
Без глушителя	97,6	99,0
Глушитель с конусами	92,3	94,2
Глушитель с наклонными патрубками	94,3	97,9
Глушитель со встречными потоками	90,9	93,1
Четырехкамерный глушитель	88,7	89,6
Глушитель с полуэллипсовидной вставкой и перфорированной перегородкой	90,0	91,1

Таблица 2 – Газодинамическое сопротивление (Δp , Па) созданных глушителей шума на испытательном стенде при $Q_1 = 0,7$ л/ч и $Q_2 = 0,95$ л/ч

Вариант глушителя шума	n, об/мин	
	3800	4800
Глушитель с конусами	245	343
Глушитель с наклонными патрубками	392	505
Глушитель со встречными потоками	490	686
Четырехкамерный глушитель	588	882
Глушитель с полуэллипсовидной вставкой и перфорированной перегородкой	78	82

В третьей главе приведены результаты детальных исследований акустических и газодинамических характеристик разборной модели глушителя шума в зависимости от конструкции и геометрических параметров внутренних элементов глушителя на специально созданном безмоторном испытательном стенде (БИС). Даны описание и принцип действия БИС, приведены методика испытаний характеристик глушителей, подробное описание варианта глушителя, выбранного в качестве опытного образца, и экспериментально определены его резонансные частоты.

Влияние тех или иных конструктивных элементов выбранного глушителя на эффективность его работы изучалось на безмоторном испытательном стенде, структурная схема которого изображена на рис. 4. БИС позволял изменять следующие параметры пульсирующей струи на входе в глушитель в соответствующих диапазонах: частоту от 30 до 475 Гц, уровень звука от 95 до 125 дБ, расход воздуха от 0,001 до 0,026 кг/с.

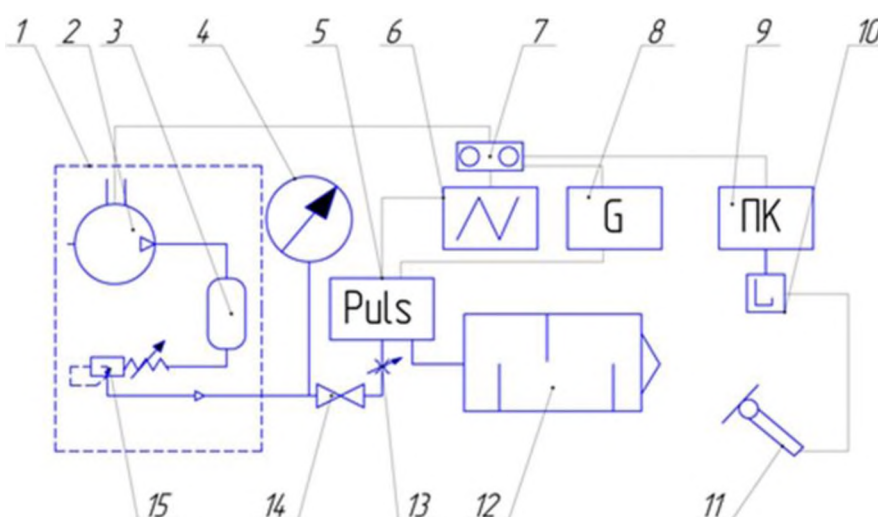


Рисунок 4 – Структурная схема безмоторного испытательного стенда: 1 – звукоизолированная камера, 2 – компрессор, 3 – ресивер, 4 – манометр, 5 – генератор пульсаций (пульсатор), 6 – осциллограф, 7 – пульт управления, 8 – частотный преобразователь, 9 – персональный компьютер, 10 – шумомер, 11 – микрофон, 12 – глушитель шума, 13 – диафрагма, 14 – кран, 15 – редуктор

Работа БИС заключалась в следующем. Для генерации периодических возмущений давления сжатый воздух из ресивера подавался на пульсатор, который представлял собой устройство с ротором и двумя патрубками: входным и выходным. Амплитуда пульсаций давления регулировалась изменением давления воздуха в ресивере, а частота – изменением количества оборотов пульсатора. Основные узлы и агрегаты испытательного стенда располагались в звукоизолированной камере, из которой наружу через боковую стенку выводился выходной патрубок БИС. К выходному патрубку присоединялась исследуемая модель глушителя шума. В ходе экспериментов на входе в глушитель регистрировалось его газодинамическое сопротивление, а в зоне истечения газов – уровень звука. Методом сравнения газодинамических сопротивлений и уровней звука глушителей определялся эффективный образец.

На рис. 5 приведен спектр акустического сигнала пульсирующей воздушной струи из БИС на режиме работы пульсатора, соответствующего частоте вращения коленчатого вала ДВС малой мощности 5200 об/мин. Из частотного спектра видно, что все «энергонесущие» частоты кратны заданной частоте пульсатора – 87 Гц. На основании этого было заключено, что предложенный метод позволяет моделировать основные моды колебаний, возникающих в системе выхлопа ДВС малой мощности.

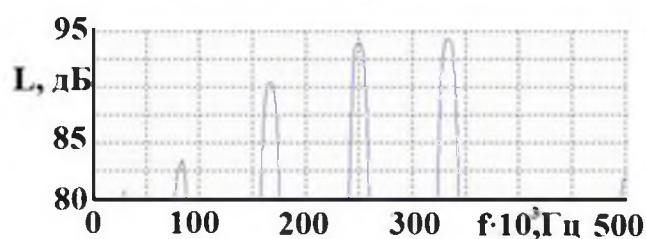


Рисунок 5 – Частотный спектр акустического сигнала в зоне выхлопа воздушной струи при 5200 об/мин

На БИС детально исследовалось влияние элементов конструкции глушителя на эффективность его работы: степени перфорации внутренней перегородки глушителя и объема полуэллипсоидной вставки. Степень перфорации перегородки варьировалась и составляла 3%, 6% и 9%. Объем полуэллипсоидной вставки менялся в следующих пределах: 0 см³, 389 см³, 407 см³ и 664 см³. Условно принималось, что глушитель с объемом вставки $V = 664$ см³ – глушитель с большой полуэллипсоидной вставкой, с объемом вставки $V = 407$ см³ – глушитель со средней полуэллипсоидной вставкой, с объемом вставки $V = 389$ см³ – глушитель с малой полуэллипсоидной вставкой, с $V = 0$ см³ именовался как глушитель с плоской перегородкой. Испытания проводились на двух режимах работы стенда, которые соответствовали 2500 об/мин и 5200 об/мин. Расход воздуха при $n = 2500$ об/мин соответствовал $Q_1 = 0,008$ кг/с, при $n = 5200$ об/мин – $Q_2 = 0,009$ кг/с. Результаты испытаний детальных исследований глушителей и штатного образца JMB SSA–ZDZ 80 приведены в табл. 3, 4 и на рис.6.

Таблица 3 – Газодинамическое сопротивление (Δp , Па) исследуемых глушителей

Вариант глушителя шума	ω , об/мин	
	2500	5200
Штатный глушитель марки JMB SSA-ZDZ 80	460,9	588,4
Глушитель с 6 % перфорированной перегородкой и большой полуэллипсовидной вставкой	1618,1	2353,5
Глушитель с 3 % перфорированной перегородкой	1078,7	1176,8
Глушитель с 6 % перфорированной перегородкой	833,5	882,6
Глушитель с 9 % перфорированной перегородкой	490,3	539,4
Глушитель с малой полуэллипсовидной вставкой	117,7	166,7
Глушитель со средней полуэллипсовидной вставкой	686,5	735,5
Глушитель с большой полуэллипсовидной вставкой	735,5	784,5
Глушитель с плоской перегородкой	294,2	343,2

Таблица 4 – Уровни звука (L, дБ) выхлопной системы БИС при различных режимах работы

Вариант глушителя шума	ω , об/мин	
	2500	5200
Без глушителя	91,1	94,1
Штатный глушитель марки JMB SSA-ZDZ 80	92,6	93,9
Глушитель с 6 % перфорированной перегородкой и большой полуэллипсовидной вставкой	84,2	85,8
Глушитель с 3 % перфорированной перегородкой	84,7	84,9
Глушитель с 6 % перфорированной перегородкой	82,7	84,1
Глушитель с 9 % перфорированной перегородкой	84,0	85,3
Глушитель с малой полуэллипсовидной вставкой	79,9	80,1
Глушитель со средней полуэллипсовидной вставкой	79,8	80,7
Глушитель с большой полуэллипсовидной вставкой	79,0	79,3
Глушитель с плоской перегородкой	75,0	76,8

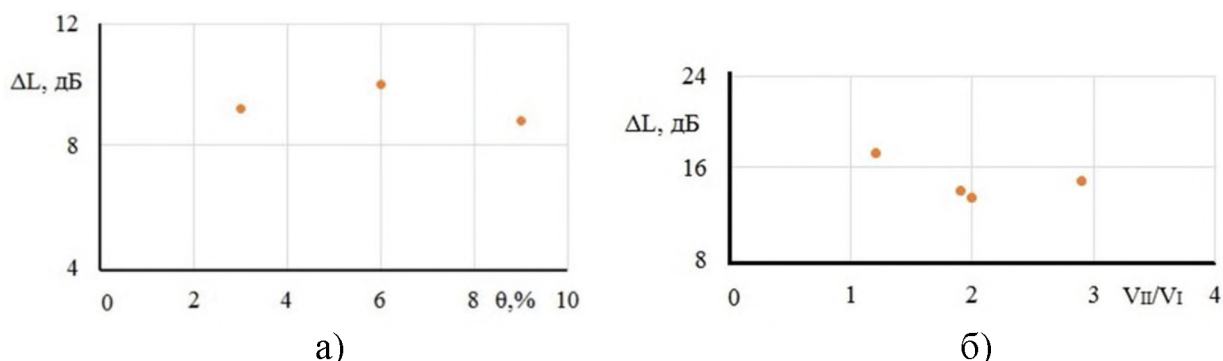


Рисунок 6 – Зависимость снижения шума (ΔL) при $n = 5200$ об/мин: а) от степени перфорации внутренней перегородки глушителя (θ); б) от отношения внутренних объемов камеры глушителя (V_{II}/V_I)

Экспериментальные результаты (см. рис. 6а) показали, что степень перфорации перегородки существенного влияния на шумоглушение не оказывает. С увеличением степени перфорации гидродинамическое сопротивление в глушителе уменьшается. Увеличение объема эллипсовидной вставки на эффект шумоглушения (см. рис 6б) влияет также незначительно. Из исследованных образцов глушителей, включая штатный, наиболее эффективным по шумоглушению и обладающим небольшим газодинамическим сопротивлением оказался глушитель с плоской перегородкой. Схема такого глушителя приведена на рис. 7. Плоская перегородка 3 в глушителе располагается перпендикулярно оси цилиндрического корпуса и делит его объем на две полузамкнутые камеры. Между перегородкой 3 и стенкой корпуса глушителя имеется кольцевой зазор 2, предназначенный для прохода газов.

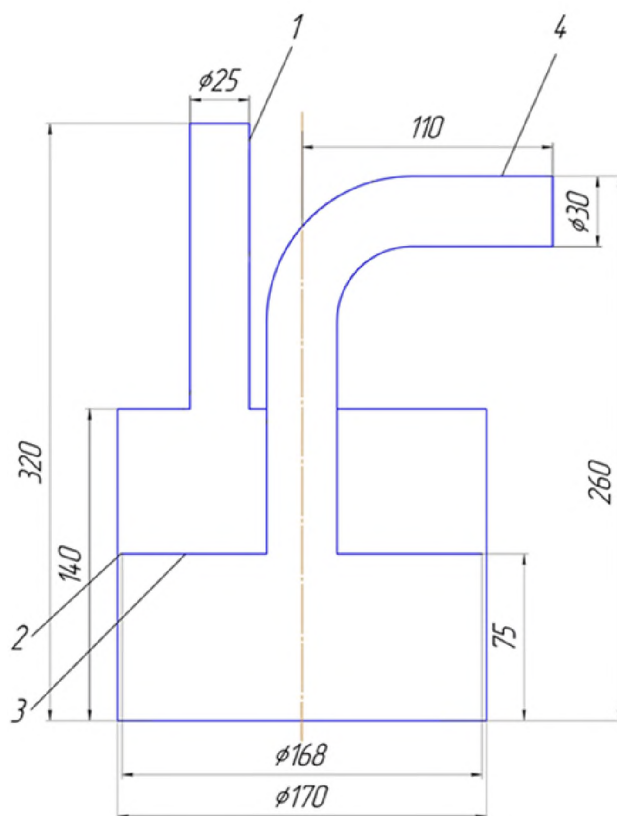


Рисунок 7 – Схема глушителя с плоской перегородкой: 1 – входной патрубок, 2 – кольцевой зазор, 3 – плоская перегородка, 4 – выходной патрубок

Необходимо отметить, что кроме улучшенных акустических характеристик, данный глушитель на крейсерском режиме работы имеет наименьшее газодинамическое сопротивление по сравнению с другими вариантами. Он конструктивно прост и обладает небольшой массой. Данная модель была принята за основу для создания опытного образца глушителя шума для системы выхлопа поршневого ДВС малой мощности БПЛА.

В процессе проектирования во избежание характерных для каждой акустической системы резонансных явлений, сопровождаемых усилением уровня звука, опытным путем были определены резонансные частоты исследуемого глушителя шума.

Сначала с помощью импульсного источника шума в исследуемом глушителе возбуждались свободные акустические колебания, отклик которых регистрировался многофункциональным измерительным комплексом «ЭКОФИЗИКА». Частотный спектр сигнала - отклика показал, что рассматриваемый глушитель имеет резонансные частоты – 50 Гц и 67 Гц (см. рис. 8).

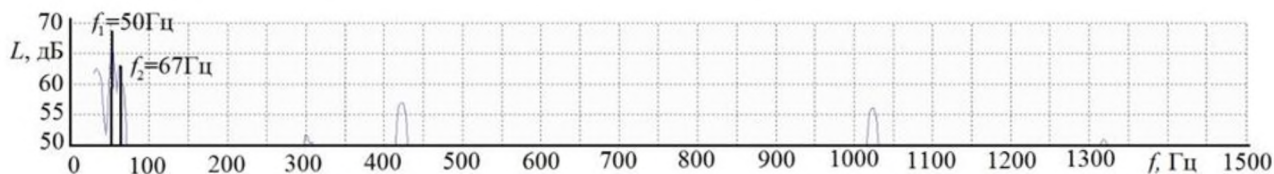


Рисунок 8 – Спектр акустического сигнала - отклика глушителя

Для последующих исследований был выбран диапазон частот, лежащий в области собственных частот глушителя шума с кольцевым зазором – от 47 Гц до 137 Гц (47, 50, 55,63, 67, 74, 87, 100, 137 Гц). В дальнейшем на этих частотах определялся коэффициент шумоподавления глушителя. Эксперименты проводились на безмоторном испытательном стенде с пульсатором. На входе глушителя задавался пульсационный поток при расходе воздуха $Q = 0,017$ кг/с. Запись акустических сигналов проводилась конденсаторными микрофонами одновременно на входе и выходе глушителя. По полученным данным был соответственно построен график зависимости коэффициента подавления шума, равного отношению уровня звука на выходе из глушителя к уровню звука на входе в глушитель (θ''), от частоты вращения коленчатого вала двигателя (f). Изображенный на рис. 9 график зависимости $\theta''(f)$ демонстрирует, что на частотах 50 Гц и 67 Гц возникают резонансные явления.

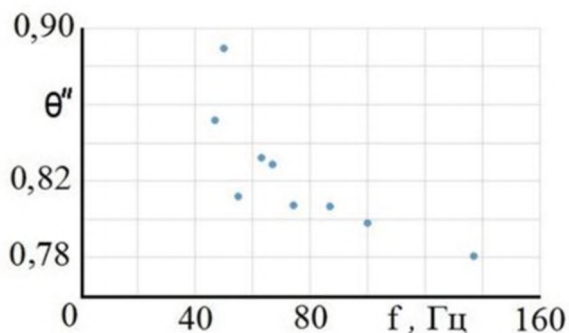


Рисунок 9 – График зависимости коэффициента подавления шума (θ'') от частоты вращения коленчатого вала двигателя (f)

В четвертой главе приведены результаты численных исследований по определению газодинамического сопротивления и резонансных частот двухкамерного глушителя шума, результаты верификация расчета, рекомендации по проектированию глушителя шума реактивного типа системы выхлопа ДВС малой мощности, используемой в составе БПЛА.

Численные исследования проводились в программном комплексе ANSYS Fluent. Построение трехмерной геометрической модели глушителя, на которую наносилась расчетная сетка, выполнялось средствами сеточного генератора

Gambit. Расчету подвергалась только проточная часть глушителя, сопряженная задача теплообмена не решалась.

Моделирование газодинамического сопротивления глушителя шума осуществлялось в рамках стационарной задачи, а резонансных частот - нестационарной задачи. В качестве рабочей среды глушителя шума принимался идеальный газ. Условия были нормальные.

При решении стационарной задачи в качестве граничных условий на входе в глушитель задавались: массовый расход воздуха (0,004 – 0,022 кг/с), интенсивность турбулентных пульсаций (5%) и гидравлический диаметр (0,025 м); на выходе из глушителя – атмосферное давление, условия принимались нормальные. При нестационарном расчете вместо массового расхода воздуха на входе глушителя задавалась функция полного давления. Полное давление равнялось сумме атмосферного и пульсационного давлений. При этом пульсационное давление изменялось по синусоидальному закону:

$$p_{\text{puls } i} = A \sin \omega t, \quad (1)$$

где $p_{\text{puls } i}$ – пульсационное давление на i -ой частоте колебания, Па; A – амплитуда колебаний пульсаций давления, Па:

$$A = K * \Delta p, \quad (2)$$

$K = 0,1$ – коэффициент, определяющий величину амплитуды колебаний давления; Δp – газодинамическое сопротивление глушителя, равное 608 Па; ω – круговая частота, соответствующая i -ой частоте колебания пульсаций давления, рад/с.

При расчете резонансных частот исследуемого глушителя в соответствии с опытными данными задавался частотный диапазон от 47 Гц до 137 Гц. Для моделирования газодинамических процессов по тракту двухкамерного глушителя из семейства k - ε моделей турбулентности применялась RNG модель.

В ходе стационарного расчета определялись значения перепадов полного давления воздуха Δp_t по тракту движения в глушителе. Аналогичные результаты при тех же входных параметрах были получены экспериментально на безмоторном испытательном стенде. Стенд работал в стационарном режиме – пульсатор не запускался. На входе в глушитель путем изменения давления воздуха в ресивере задавались такие же расходы, как и при расчетах: 0,004, 0,009, 0,013, 0,017, 0,022 кг/с. Перепад давления в глушителе измерялся с помощью U-образного манометра. Среднеарифметические значения результатов измерений совместно с расчетными значениями графически отображены на рис. 10.

Из полученных результатов видно, что предложенная расчётная модель адекватно описывает газодинамические процессы в глушителе шума заданной конструкции и расхождение расчетных данных с экспериментальными не превышает 7 %.

В процессе нестационарного расчета двухкамерного глушителя были определены значения амплитуд пульсаций давления и резонансные частоты, получены диаграммы распределения пульсационного давления и векторные поля мгновенной пульсационной скорости в глушителе на некоторых частотах для понимания его принципа действия. Из диаграммы векторного поля скорости (см. рис. 11) видно, что диссипация энергии волны сжатия воздушного потока происходит за счет генерации в камерах глушителя интенсивных тороидальных вихрей и эффекта дросселирования.

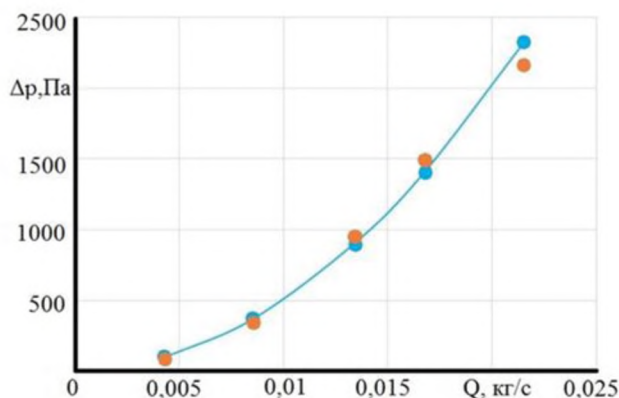


Рисунок 10 – График зависимости противодействия глушителя от расхода воздуха: линия – расчетные данные, точки – экспериментальные

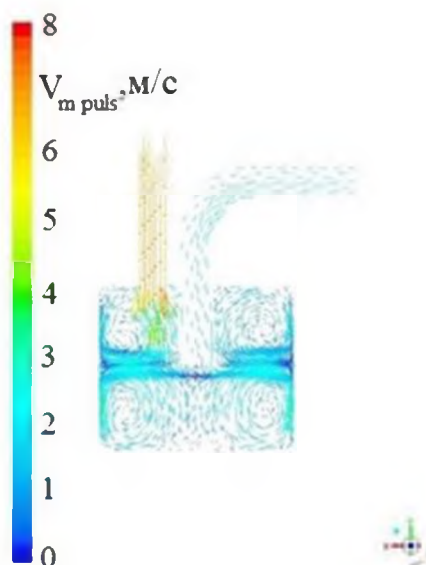


Рисунок 11 – Векторное поле мгновенной пульсационной скорости в глушителе шума на резонансной частоте 74 Гц

По расчетным данным был построен график (см. рис. 12) зависимости коэффициента подавления шума (θ''') от частоты колебания пульсаций давления (f), который определялся по формуле:

$$\theta''' = \frac{A_{puls\ out}}{A_{puls\ in}} \quad (3)$$

где $A_{\text{puls out}}$ – максимальное значение амплитуды пульсаций давления воздушного потока на выходе из глушителя на i -ой частоте колебания, Па; $A_{\text{puls in}}$ – значение амплитуды пульсаций давления на входе в глушитель на i -ой частоте колебания, Па.

Из рис.12 заметно, что на частотах 50 Гц и 74 Гц происходит увеличение амплитуды пульсации давления и наблюдается резонанс системы. Сходимость полученных расчетных (см. рис.12) и экспериментальных данных (см. рис. 9) составила 96%

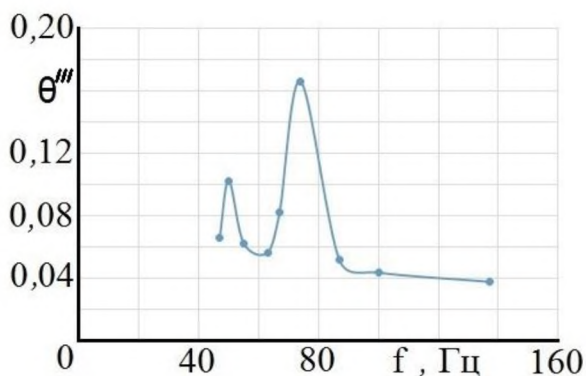


Рисунок 12 – График зависимости коэффициента подавления шума (θ''') от частоты колебания пульсаций давления (f)

Принимая во внимание то, что оптимальной схемой глушителя являлся глушитель, имеющий схему резонатора Гельмгольца, его резонансные частоты также были рассчитаны по инженерной формуле:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}} \quad (4)$$

где c – скорость звука в воздухе при температуре 20 °С, равная 343,1 м/с; S – площадь сечения горла (узкого места) резонатора, м^2 ; l – длина горла резонатора, м; V – объем резонатора, м^3 .

Предполагалось, что глушитель состоит из трех резонаторных контуров, образующихся: входным патрубком и первой камерой до внутренней перегородки; выходным патрубком и второй камерой после перегородки; выходным патрубком и полным объемом корпуса. По результатам расчетов были получены следующие резонансные частоты: для первого контура – $f_1 = 74$ Гц, для второго контура – $f_2 = 67$ Гц, для третьего контура – $f_3 = 49$ Гц. Расхождение рассчитанных величин с теоретическими и экспериментальными значениями составило 4 %, что подтверждает адекватность расчётной модели.

Далее, учитывая удовлетворяющие результаты сходимости, с помощью данного инженерного метода был проведен пересчет резонансных частот на реальные условия работы ДВС, которые соответствовали значениям: 85, 117,

130 Гц. Сравнивая эти значения частот с частотами в частотном спектре акустического сигнала, записанного у выхлопной системы ДВС малой мощности без глушителя на крейсерском режиме (см. рис. 13), было выявлено, что эти частоты не совпадают, следовательно, резонансные явления в глушителе не должны возникать.

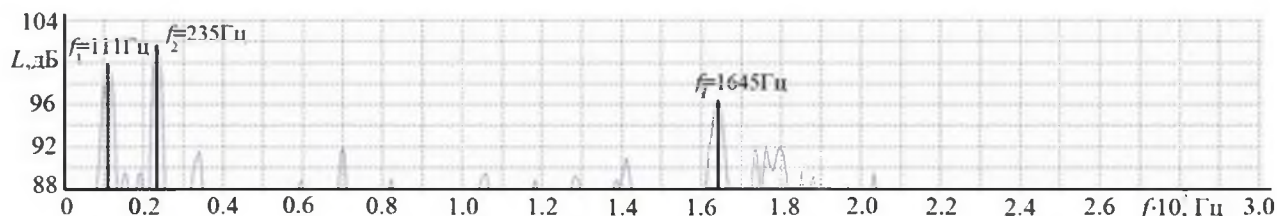


Рисунок 13 – Частотный спектр акустического сигнала в зоне выхлопа двигателя на моторном испытательном стенде на крейсерском режиме работы при $n = 5200$ об/мин

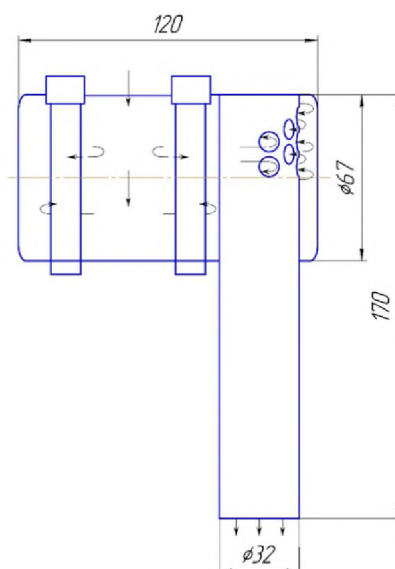


Рисунок 14 – Конструктивная схема глушителя марки JMB SSA–ZDZ 80

На завершающем этапе работы был проведен сравнительный анализ технических характеристик разработанного глушителя шума и штатного образца (см. рис. 14) на моторном испытательном стенде. Результаты измерений газодинамических и акустических характеристик этих глушителей (см. табл. 5 – 6) свидетельствуют о преимуществе нового разработанного образца по всем параметрам. На крейсерском режиме работы ДВС при расходе топлива 1,2 л/ч газодинамическое сопротивление штатного глушителя шума составило 736 Па, нового – 429 Па, уменьшение уровня звука штатного глушителя – 2 дБ, нового – 7 дБ.

Таблица 5 – Уровни звука глушителей шума на моторном испытательном стенде при $n = 5200$ об/мин и $Q = 1,2$ л/ч

Вариант глушителя шума	L, дБ
Без глушителя	104,6
Штатный глушитель марки JMB SSA–ZDZ 80	102,2
Новый двухкамерный глушитель	97,5

Таблица 6 – Газодинамическое сопротивление глушителей шума на моторном испытательном стенде при $n = 5200$ об/мин и $Q = 1,2$ л/ч

Вариант глушителя шума	Δp , Па
Штатный глушитель марки JMB SSA-ZDZ 80	736
Новый двухкамерный глушитель	429

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа научно-технической литературы выбраны наиболее эффективные конструктивные схемы глушителей ДВС малой мощности, по выбранным схемам изготовлены пять вариантов глушителей шума выхлопной системы, на моторном стенде экспериментально исследованы их характеристики и по наилучшим показателям выбрана оптимальная конструкция глушителя шума.

2. Экспериментально определено, что акустический сигнал выхлопных газов двухтактного двигателя малой мощности (до 6 кВт), используемого в составе БПЛА малой и средней дальности, имеет импульсный характер, при этом уровень шума выхлопной системы на крейсерском режиме в частотном диапазоне от 500 Гц и до 800 Гц составляет 104 дБ.

3. На разборной модели глушителя с использованием безмоторного испытательного стенда проведены детальные исследования влияния конструктивных параметров элементов на ее технические характеристики. Получены экспериментальные зависимости снижения шума от степени перфорации внутренней перегородки и отношения внутренних объемов камеры глушителя при $n = 5200$ об/мин.

4. Проведены численные исследования газодинамических характеристик и резонансных частот глушителя. Анализ расчетных исследований показал, что в камерах глушителя возникают тороидальные вихри, которые являются одной из причин диссипации энергии воздушных волн сжатия.

5. Спроектирована экспериментальная модель глушителя для выхлопной системы ДВС малой мощности. Исследованы его акустические и газодинамические характеристики. Подтверждена сходимость результатов численных исследований и опытных данных: отклонения в значениях газодинамического сопротивления глушителя составили не более 7%, резонансных частот – 4%.

6. Разработаны рекомендации по проектированию глушителей шума реактивного типа системы выхлопа ДВС малой мощности, используемой в составе БПЛА.

7. Основные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс КНИТУ–КАИ и используются при проведении научных исследований по шумоглушению. Практические рекомендации, сформулированные в данной диссертации, были использованы специалистами ООО «СТД–РАДИКС» при создании глушителя шума для ДВС, используемого в составе БПЛА малой дальности.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки РФ по специальности диссертации:

1. Суховая, Е. А. Экспериментально-теоретические исследования резонансных явлений в глушителе шума для ДВС малой мощности / Е. А. Суховая // Тепловые процессы в технике. – 2019. – Т. 11. – №7. – С. 320–327 (100%).

2. Суховая, Е. А. Оценка эффективности системы выхлопа двигателей внутреннего сгорания малой мощности беспилотного летательного аппарата на безмоторном испытательном стенде / Е.А. Суховая, Д.А. Теляшов, Г.И. Павлов, П.В. Накоряков, М.А. Никитин// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2019. – № 5. – С. 22–33. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-5-22-33 9 (50%).

Патент:

3. Пат. 2657040 Российская федерация, МПК F01N/24. Глушитель шума [Текст] / Г.И. Павлов, А.В. Кочергин, Д.А. Теляшов, Е.А. Суховая и др.; заявитель и патентообладатель «Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «КНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ».– №2017127421; заявл. 31.07.2017; опубл. 08.06.2018, Бюл. №16. – 2 с. (15%).

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных SCOPUS и Web of Science:

4. Sukhovaya, E.A. Development of a silencer for internal combustion engines of low power / G.I. Pavlov, P.V. Nakoryakov, E.A. Sukhovaya // Procedia Engineering. -2017. - V. 206. - P. 1690–1695. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2017.10.699> (Accessed 28 June 2019) (50%).

5. Sukhovaya, E.A. Researching of the reduction of shock waves intensivity in the "pseudo boiling" layer / G.I. Pavlov, D.A. Telyashov, A.V. Kochergin, P.V. Nakoryakov, E.A. Sukhovaya // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 824. – No. 042007. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/899/4/042007> (Accessed 28 June 2019) (15%).

6. Sukhovaya, E.A. Recommendations for creating a noise silencer for the aerodynamic valve of the pulsating combustion chamber / G.I. Pavlov, D.A. Telyashov, P.V. Nakoryakov, E.A. Sukhovaya // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. - V.1261. - No. 012026. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1261/1/012026> (Accessed 28 June 2019) (20%).

7. Sukhovaya, Ekaterina. Experimental and theoretical researches of the gas-dynamic resistance of the silencer for the exhaust system of low power ICE / Ekaterina

Sukhovaya, Andrey Sabirzyanov, Pavel Nakoryakov, Julia Khakimzyanova // Journal AKUSTIKA. – 2019. – V.33. – No. 248/2019. – P. 78–82 (50%).

Публикации в сборниках научных трудов, материалов конференций:

8. Суховая, Е.А. Разработка глушителя-нейтрализатора шума на основе «псевдокипящего» слоя для ДВС малой мощности / Г.И. Павлов, Д.А. Теляшов, Р.Р. Халиулин, Е.А. Суховая, А.И. Ахметшина, Р.Р. Сиразиева // Труды XV Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», г. Казань, 1–3 апреля 2015 г. – Казань: Изд-во: ИП Шайхутдинов А.И., 2015. – С. 275–278 (10%).

9. Суховая, Е.А. Разработка глушителя-нейтрализатора с каталитическим блоком с ячеисто-каркасной металлической структурой / Г.И. Павлов, Д.А. Теляшов, А.И. Ахметшина, Е.А. Суховая, Р.Р. Халиулин, Р.Р. Зиннатуллин // Труды XV Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», г. Казань, 1-3 апреля 2015 г. – Казань: Изд-во: ИП Шайхутдинов А.И., 2015. – С. 398–401 (15%).

10. Суховая, Е.А. Исследование акустических характеристик турбины под влиянием шума пульсирующей струи / О.Х. Ягофаров, П.В. Накоряков, Р.Р. Зиннатуллин, Д.А. Теляшов, Е.А. Суховая, Е.А. Драницина // Труды XV Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», г. Казань, 1–3 апреля 2015 г. – Казань: Изд-во: ИП Шайхутдинов А.И., 2015. – С. 475–478 (7%).

11. Суховая, Е.А. О роли керамического каталитического блока сотовой структуры в глушении шума ДВС [Тезисы] / Г.И. Павлов, О.Р. Ситников, П.В. Накоряков, Е.А. Суховая // Машиностроение: Сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3. – № 4. – С. 63–64 (25%).

12. Суховая, Е.А. Разработка глушителя-нейтрализатора с каталитическим блоком с ячеисто-каркасной металлической структурой / Г.И. Павлов, Д.А. Теляшов, Е.А. Суховая, А.И. Ахметшина // Материалы Международной молодежной научной конференции «XXII Туполевские чтения» (школа молодых ученых), г. Казань, 19–21 октября 2015 г. - Казань: Фолиант, 2015. – Т.2. – С. 483–487 (20%).

13. Суховая, Е.А. Экспериментальное определение эффективности глушителей шума ДВС малой мощности на моторном стенде [Тезисы] / Е.А. Суховая // Материалы докладов XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», г. Казань, 23–25 марта 2016 г. - Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – Т.1. – С. 314 (100%).

14. Суховая, Е.А. Разработка глушителя-нейтрализатора шума маломощных двигателей внутреннего сгорания [Тезисы] / Д.А. Теляшов, Е.А. Суховая, О.Х. Ягофаров // Материалы докладов XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», г. Казань, 23–25 марта 2016 г. - Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – Т.2. – С. 60. (20%).

15. Суховая, Е.А. Методы снижения шума камеры пульсирующего горения, используемой в составе двигателя внутреннего сгорания с внешним подводом тепла [Тезисы] / Д.А. Теляшов, Е.А. Суховая, О.Х. Ягофаров // Материалы докладов XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», г. Казань, 23–25 марта 2016 г. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – Т.2. – С. 61 (20%).

16. Суховая, Е.А. Экспериментальные исследования глушителей шума разной конструкции, предназначенных для ДВС малой мощности / Г.И. Павлов, Д.А. Теляшов, Е.А. Суховая // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: материалы докладов X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, г. Казань, 13 – 15 сентября 2016 г. – Казань: КазНЦ РАН, 2016. – С. 351–354 (35%).

17. Суховая, Е. А. Разработка шумоглушителей камеры пульсирующего горения, основанных на эффекте псевдооживления / Г.И. Павлов, Д.А. Теляшов, Е.А. Суховая, О.Х. Ягофаров, П.В. Накоряков // Труды XVII Междунар. симп. «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», г. Казань, 14–16 марта 2017 г. – Казань: Изд-во ИП Шайхутдинов А.И., 2017. – С. 369–372 (10%).

18. Суховая, Е.А. О проблеме снижения шума выхлопа ДВС малой мощности, применяемых на переносных электрогенераторах [Тезисы] / Е.А. Суховая, П.В. Накоряков, Д.А. Теляшов // Материалы докладов XII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», г. Казань, 26 – 28 апреля 2017 г. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – Т.1. – С.405–406 (50%).

19. Суховая, Е.А. Использование псевдокипящего слоя в глушителе шума аэродинамического клапана камеры пульсирующего горения [Тезисы] / Д.А. Теляшов, О.Х. Ягофаров, П.В. Накоряков, Е.А. Суховая // Материалы докладов XII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», г. Казань, 26 – 28 апреля 2017 г. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – Т.2. – С.126–127 (10%).

20. Суховая, Е.А. Разработка глушителя шума ДВС малой мощности применительно к беспилотным летательным аппаратам / Е.А. Суховая, Д.А. Теляшов, М.А. Никитин // Материалы докладов XXIII Международной молодежной

научной конференции (школы молодых ученых) «Туполевские чтения», г. Казань, 8–10 ноября 2017 г. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2017. – Т.1. – С. 982–987 (50%).

21. Суховая, Е.А. Разработка глушителя шума аэродинамического клапана камеры пульсирующего горения / Д.А. Теляшов, Е.А. Суховая, А.И. Ахметшина // Материалы докладов XXIII Международной молодёжной научной конференции (школы молодых ученых) «Туполевские чтения», г. Казань, 8–10 ноября 2017 г. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2017. – Т.1. – С. 95–100 (15%).

22. Суховая, Е.А. Исследование системы выхлопа ДВС малой мощности БПЛА [Тезисы] / Е.А. Суховая, Д.А. Теляшов, Г.И. Павлов, П.В. Накоряков // Тезисы докладов X Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», г. Санкт-Петербург, 18 – 20 апреля 2018 г. – СПб.: Изд-во Инфо-Да, 2018. – Т.2. – С.66 (50%).

23. Суховая, Е.А. Исследование системы выхлопа ДВС малой мощности БПЛА / Е.А. Суховая, Д.А. Теляшов, Г.И. Павлов, П.В. Накоряков // Труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», г. Санкт-Петербург, 18 – 20 апреля 2018 г. – СПб.: Изд-во Инфо-Да, 2018. – Т.1. – С.439–442 (50%).

24. Суховая, Е.А. Разработка системы выхлопа ДВС малой мощности с улучшенными характеристиками [Тезисы] / Е.А. Суховая // Тезисы докладов шестой открытой всероссийской (XVIII научно-технической) конференции по аэроакустике, г. Звенигород, 22-27 сентября 2019 г. – М.: Изд-во ЦАГИ, 2019. – С. 101–102 (100%).

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ Г 109

Издательство КНИТУ-КАИ
420111, Казань, К. Маркса, 10