

В диссертационный совет Д 212.079.02 при  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ»

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

### ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Суховой Екатерины Александровны «Разработка системы выхлопа  
поршневого двигателя внутреннего сгорания малой мощности  
с улучшенными характеристиками для беспилотных летательных аппаратов»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели  
и энергоустановки летательных аппаратов

#### **Актуальность работы.**

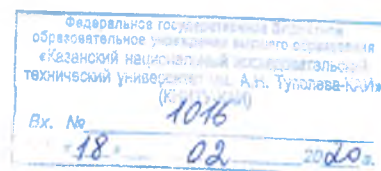
Развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) требует решения сложных задач, одна из которых – это разработка двигателя, удовлетворяющего требованиям в зависимости от типа и принадлежности БПЛА. Работа Суховой Е.А. направлена на снижение шума двигателя внутреннего сгорания (ДВС) малой мощности, эксплуатируемого в составе БПЛА, за счет разработки глушителя, что подтверждает ее актуальность.

Автор рассматривает проводимые работы, направленные на исследование механизма образования и снижения шума ДВС, отмечая при этом, что в открытой печати работ в данном направлении недостаточно.

Основными демаскирующими факторами у БПЛА с ДВС, используемых в военных целях, являются тепловое и шумовое излучение.

**Целью** диссертационной работы Суховой Е.А. является исследование рабочих процессов в выхлопной системе ДВС малой мощности с целью улучшения его технических характеристик и разработки новой конструкции глушителя.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка принятых сокращений, списка использованных литературных источников, включающего 111 наименований и приложений. Текст диссертации напечатан на 113 страницах и содержит 54 рисунка и 12 таблиц.



**Во введении** показана цель и раскрыты задачи исследования, показаны актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, отмечена достоверность научных результатов, а также приведены сведения об апробации работы.

**В первой главе** приведен обзор ранее проведенных работ в направлении оценки конструктивных особенностей двухтактных систем шума выхлопа ДВС с малой мощностью. Рассмотрены современные методы, используемые при определении эффективности проектируемых глушителей. Это позволило установить исходные данные для проектирования глушителя шума системы выхлопа.

**Вторая глава** посвящена проведению экспериментальных исследований на моторном стенде с двухтактным одноцилиндровым карбюратором двигателя малой мощности. Показано, что поиск оптимального соотношения противодавления и эффективности шумоглушения является одной из главных задач при проектировании глушителей шума ДВС. Приведены вычислительные методы, направленные на проектирование глушителей и выявлены преимущества метода конечных элементов для моделирования процессов, протекающих в глушителе.

При проведении исследований акустических и газодинамических характеристик глушителей автор использует методики и средства измерения. Выполненные исследования показали на превалирующее значение низких и средних частот с уровнем звука 104 дБ для крейсерского режима работы двигателя.

Автор рассматривает частотный спектр акустического сигнала в зоне выхлопа ДВС малой мощности без глушителя при частоте вращения вала двигателя 5000 об/мин. Эти эксперименты используются для проведения сравнительных испытаний перспективных конструктивных схем глушителей шума.

На моторном стенде были определены акустические и газодинамические характеристики выбранных вариантов глушителей.

По результатам испытаний был выбран наиболее эффективный образец с внутренней вставкой с перфорированной перегородкой для проведения более полных исследований.

**В третьей главе** представлены результаты исследования по существующим испытательным стендам, выявлены их преимущества и недостатки, проведена разработка универсального безмоторного

испытательного стенда (БИС) и методики для исследования технических характеристик глушителей шума для ДВС малой мощности.

Разработанная автором методика испытаний характеристик глушителей позволила:

- определить акустические характеристики пульсирующей струи воздуха на выходе из БИС на разных режимах работы;
- определить акустические характеристики глушителей шума на тех же режимах;
- сравнить уровни звука, полученные без глушителя и с глушителем;
- определить газодинамическое сопротивление глушителей шума;
- методом сравнения газодинамических сопротивлений и уровней звука глушителей определить эффективный образец.

При выборе эффективного образца на БИС исследовались элементы конструкций глушителя с изменением степени перфорации внутренней перегородки, объема полуэллипсовидной вставки на двух режимах работы стенда 2500 об/мин и 5200 об/мин с различным расходом воздуха. Выявлено, что степень перфорации перегородки существенного влияния на шумоглушение не оказывает. С увеличением степени перфорации гидродинамическое сопротивление в глушителе уменьшается. Выбран наиболее эффективный глушитель с плоской перегородкой, который был принят для создания опытного образца глушителя для системы выхлопа поршневого ДВС малой мощности БППА.

Для оценки резонансных явлений акустической системы с помощью измерительного комплекса «Экофизика» были определены резонансные частоты исследуемого глушителя шума - 50 Гц и 67 Гц.

На БИС с пульсатором определялся коэффициент подавления шума с подтверждением резонансных частот.

**В четвертой главе** проведены численные исследования двухкамерного глушителя шума с кольцевым зазором.

Определены газодинамическое сопротивление и резонансные частоты глушителя шума на стадии проектирования. Для определения газодинамического сопротивления и резонансных частот выбраны расчетные модели для проведения численных исследований в программном комплексе ANSYSFluent. Автором проведен анализ расчетных моделей турбулентности для оценки газодинамических параметров.

Моделирование газодинамических параметров сопротивления глушителя осуществлялось в рамках стационарной задачи с использованием модели RNG.

При численном исследовании газодинамического сопротивления определялись значения перепадов полного давления воздуха  $\Delta p_1$  по тракту движения в глушителе. Аналогичные результаты при тех же входных параметрах были получены экспериментально на безмоторном испытательном стенде без пульсатора. Изменения давления воздуха на входе в глушитель за счет изменения давления воздуха в ресивере соответствовали расчетным, что показало, что предложенная расчетная модель адекватно описывает газодинамические процессы в глушителе заданной конструкции и расхождения расчетных данных с экспериментальными не превышают 7%.

В процессе нестационарного расчета двухкамерного глушителя автором определены амплитуды пульсаций давления и резонансные частоты, получены диаграммы распределения пульсационной скорости в глушителе на некоторых частотах.

Это дает понимание физических процессов, протекающих по длине глушителя и в отработанных газах на выходе из глушителя. Анализ векторного поля скорости позволяет выявить характер диссипации энергии волны сжатия воздушного потока за счет генерации в камерах глушителя тороидальных вихрей и эффекта дросселирования.

Расчетные зависимости коэффициента подавления шума от частоты колебания пульсаций давления позволяют наблюдать резонанс системы. Принимая за основу схему резонатора Гельмгольца определяются резонансные частоты для трех контуров выбранного глушителя. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили адекватность расчетной модели. Проводя далее расчетные и экспериментальные исследования, автором делается заключение, что резонансные явления в глушителе не должны возникать.

На завершающем этапе работы на моторном испытательном стенде определялись газодинамические и акустические характеристики разработанного глушителя и штатного образца выявлено значительное снижение газодинамического сопротивления, и уменьшение уровня звука в новой разработанной конструкции глушителя для ДВС в составе БПЛА малой дальности.

**Выводы** диссертации являются обоснованными и отражают основные результаты, полученные соискателем.

**В приложении** приведены типы глушителей, акты внедрения результатов диссертационной работы. Автореферат и список публикаций по работе полностью соответствуют диссертации.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в том, что получены экспериментальные зависимости снижения уровня шума системы выхлопа с учетом конструктивных параметров элементов глушителя. Определены газодинамические параметры и резонансные частоты глушителя ДВС малой мощности. Экспериментально определены газодинамическое сопротивление и резонансные частоты разработанного глушителя.

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

**Достоверность полученных результатов** подтверждается использованием вычислительных средств и методов исследования, применения измерительных приборов, сходимостью результатов численных и экспериментальных методов исследований.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные результаты расчетных исследований во многом дополняют имеющиеся теоретические знания в области газодинамических и акустических процессов. Разработанные автором рекомендации по проектированию глушителей шума реактивного типа для системы выхлопа ДВС малой мощности являются оригинальными и представляют интерес для последующих исследований.

Автором разработан и подтвержден патентом РФ на изобретение глушитель шума.

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

Основные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс КНИТУ-КАИ.

**Рекомендации по использованию результатов диссертации.**

Представляет интерес дальнейшее проведение исследования по совершенствованию глушителя с учетом применения новых материалов, конструктивных элементов и оптимальных значений геометрических и режимных параметров.

Полученные в диссертации результаты могут быть полезными для инженеров и научных работников, занимающихся разработкой и проектированием двигателей для БПЛА.

Материалы и полученные результаты работы могут оказаться полезными для специалистов следующих организаций: АО «Конструкторское бюро химвавтоматики»(г. Воронеж); ООО «Опытно-конструкторское бюро моторостроения»(г. Воронеж); ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж); ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университетим. Н.Э. Баумана»; ПАО «Компания «Сухой» (г. Москва); ПАО «Корпорация «Иркут» (г. Москва); ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж).

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 WebofScience, 17 публикаций в других изданиях.

Основные результаты работы докладывались на X конференции школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена 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 молодежных 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.).

#### **Замечания по работе:**

- 1) Тема диссертационной работы касается разработки системы выхлопа ДВС для БПЛА. Было бы полезно с оценкой технических характеристик рассмотреть вопрос получения малого веса конструкции системы выхлопа за счет применяемых материалов.
- 2) В работе некоторые исследуемые параметры обозначаются по-разному, что вызывает определенные трудности при анализе полученных результатов.
- 3) В четвертой главе диссертации автор рассматривает конструктивную схему глушителя, состоящую из трех резонаторов, и определяет резонансные частоты в условиях реальной работы ДВС на крейсерском режиме. При сравнении с экспериментальным БИС без глушителя выявлено несовпадение частот. Следовало бы

указать, выполняется ли данное условие при изменении режима работы ДВС.

- 4) Автор при выборе окончательного варианта конструкции двухкамерного глушителя вместо перфорации в плоской стенке применяет кольцевой зазор. Какое влияние это оказывает на изменение газодинамических и акустических характеристик глушителя?
- 5) Анализ ранее проведенных исследований показывает эффект снижения шума за счет геометрической формы патрубка глушителя, обеспечивающего выход газовой струи. Представляет интерес проведение этих исследований на БИС в рамках дальнейшего развития данной работы.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы и носят дискуссионный характер.

#### **Заключение.**

В диссертационной работе на основании теоретических и экспериментальных исследований разработана конструкция глушителя шума поршневого ДВС малой мощности для БПЛА малой и средней дальности.

В целом, по объему и научному уровню, актуальности и научной новизне полученных результатов, их практической значимости, диссертационная работа Суховой Екатерины Александровны «Разработка системы выхлопа поршневого двигателя внутреннего сгорания малой мощности с улучшенными характеристиками для беспилотных летательных аппаратов» полностью соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года №842 Высший аттестационной комиссии Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, являясь научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки в области экспериментального и численного расчета газодинамических и акустических характеристик системы выхлопа поршневого двигателя внутреннего сгорания малой мощности с улучшенными характеристиками для беспилотных летательных аппаратов.

Автор диссертации, Суховая Екатерина Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Официальный оппонент,  
профессор кафедры  
«Самолетостроение» ФГБОУ ВО  
Воронежский государственный  
технический университет,  
доктор технических наук,  
профессор

Максименков Владимир Иванович

394006, РФ, г. Воронеж,  
ул. 20 лет Октября, 84  
Тел.: 8 (473) 207-22-20  
E-mail:maksimenkov.v.i@mail.ru

10.02.2020 г.

Проректор по научной работе  
Воронежского государственного  
Технического университета  
д.т.н. профессор Дроздов И.Г.





## СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе Суховой Екатерины Александровны на тему:  
 «Разработка системы выхлопа поршневого двигателя внутреннего сгорания  
 малой мощности с улучшенными характеристиками для беспилотных  
 летательных аппаратов» на соискание ученой степени кандидата технических  
 наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и  
 энергоустановки летательных аппаратов»

№	Фамилия, Имя, Отчество	Учёная степень, учёное звание	Сведения о работе		Список основных публикаций по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет - для кандидатской и за 10 лет – для докторской (но не более 15 публикаций)
			Полное наименование организации, почтовый адрес (индекс, город, улица, дом), телефон, адрес электронной почты	Должность с указанием структурного подразделения	
1	2	3	4	5	6
	Максименков Владимир Иванович	Д.т.н., профессор	ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический университет, 394006, РФ, г. Воронеж, ул. 20 лет Октября, 84 Тел.: 8 (473) 71-59-05 E-mail: <a href="mailto:mail@vorstu.ru">mail@vorstu.ru</a>	Профессор кафедры «Самолёто- строение»	1. Максименков, В.И. Определение параметров трения при формообразо- вании оболочек: моногра- фия / В.И. Максименков, С.С. Одинг, М.В. Молод. – Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2015. – 80 с. 2. Максименков, В.И. Повышение качества штамповой оснастки при изготовлении деталей самолёта / В.И. Максимен- ков, М.В. Молод, Ю.А. Сидельникова // <b>Вестник ВГТУ. ISSN 1729-6501.</b> – Т.12. – №1. – Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2016. – С. 58-60. 3. Молод, М.В. Особен- ности проектирования и изготовления обтяжных пуансонов для формообра- зования обшивок канала воздухозаборника само- лёта / М.В. Молод, В.И. Максименков // <b>Вестник ВГТУ. ISSN 1729-6501.</b> – Т.12. – №2. – Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2016. –

				<p>С. 113-115.</p> <p>4. Максименков В.И. Особенности звукопоглощающих гофровых конструкций для горячей части турбореактивного двигателя (ТРД) / В.И. Максименков, М.В. Молод, В.И. Федосеев // <b>Вестник ВГТУ. ISSN 1729-6501.</b> Т.13. №3. Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2017. – С. 98-102.</p> <p>5. Максименков В.И. Направления повышения эффективности двухслойных сотовых конструкций для канала воздухозаборника самолёта / В.И. Максименков, М.В. Молод, В.И. Федосеев // <b>Вестник ВГТУ. ISSN 1729-6501.</b> Т.13. №6. Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2017. – С. 86-89.</p> <p>6. Молод М.В. Формообразующие технологии для изготовления кожухов шумоглушения турбореактивного двигателя / В.И. Максименков, М.В. Молод, В.И. Федосеев // <b>Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроения ISSN 2541-7533.</b> Т.17. №3. Самара: ФГАОУ ВО СНИУ им. академика С.П. Королёва, 2018. – С. 167-174.</p> <p>7. Патент 2544043 Российская Федерация, С2 МПК В 32 В 7/12. Способ изготовления сотовой конструкции / Максименков В.И., Милешин В.И., Халецкий Ю.Д., Коротков А.А., Джибиллов А.С., Молод М.В. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГТУ» –</p>
--	--	--	--	--

					<p>№2012145635/05; заявл. 25.10.2012, опубл. 05.02.2015. Бюл. №12. – 5с.: ил.</p> <p>8. Патент 2625467 Российская Федерация, С2 МПК В 32 В 3/30. Панель с гофрированным и сотовым наполнителем / Максименков В.И., Молод М.В., Соболев А.Ф., Копьев В.Ф., Сомов А.К.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГТУ» - №2015120316; заявл. 28.05.2015, опубл. 14.07.2017. Бюл. №20. – 4с.: ил.</p>
--	--	--	--	--	---

Зав. кафедрой «Самолетостроение»

  
подпись

В.И. Корольков

Ученый секретарь Совета ВГТУ



  
подпись

В.П. Трофимов

февраль 2020г.