

**Отзыв официального оппонента на диссертационную работу**

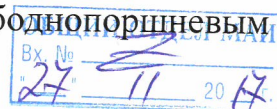
Минина Николая Владимировича на тему «Методика выбора проектных параметров комбинированного пульсирующего ВРД со свободнопоршневым нагнетателем для малоразмерных БПЛА», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 05.07.05 — «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Создание перспективных малоразмерных БПЛА требует решения важных задач по созданию высокоскоростных, экономичных с высоким уровнем массогабаритных характеристик реактивных двигателей. В классе тяг до 100 Н в настоящее время применяются поршневые винтомоторные установки, которые уже не устраивают из-за невысокой скорости полёта. Альтернативой могли бы стать малоразмерные ГТД, однако проблемы столь малой размерности лопаточных машин, подшипников высокооборотных (более 100 000 об/мин) роторов не позволяют создать двигатели с приемлемыми газодинамическими характеристиками и стоимостью. Поэтому создание воздушно- реактивного двигателя на базе известного свободно поршневого газогенератора с использованием, отработанных на серийных поршневых микродвигателях, конструкторских решений представляет большой интерес.

Достоверное моделирование рабочего процесса такого типа двигательной установки (ДУ) даёт возможность отразить реальные физические процессы и проследить за поведением параметров, оказывающих непосредственное влияние на работу двигателя и его агрегатов. Создание методики выбора проектных параметров с подачей рабочего тела с помощью свободнопоршневого газогенератора в качестве двигательной установки для малоразмерных летательных аппаратов различного назначения является целью диссертационной работы.

**Актуальность работы** следует из перспективности исследуемой ДУ и необходимости рассмотреть большое число вариантов конструктивного исполнения на этапе первоначального проектирования и создать оптимальную, рациональную конструкцию при обеспечении максимальной энергетической и массовой эффективности и оптимизации материальных затрат, а так же расширить задачи и области применения малоразмерных БПЛА, использующих комбинированную силовую установку нового типа.

**Практическая значимость и научная новизна** рецензируемой работы определяются разработкой и верификацией методики определения параметров комбинированного пульсирующего ВРД со свободнопоршневым



газогенератором, позволяющей найти конструктивные параметры реактивной системы малоразмерного БПЛА для полёта на заданной высоте с заданной скоростью. Важной частью работы также является предложенная методика расчета оптимального соотношения параметров процесса охлаждения внутренних теплонагруженных узлов продувкой топливной смесью, а так же способ повышения тяговой эффективности пульсирующего ВРД путем присоединения дополнительной массы в эжекторном усилителе тяги.

**Обоснованность и достоверность научных положений, представленных выводов и рекомендаций** определяется строгостью используемого математического аппарата и корректным использованием фундаментальных уравнений теории, расчета и проектирования силовых установок ЛА. Сравнение результатов численного моделирования с известными экспериментальными данными и проверкой достоверности на упрощенных моделях, для которых существуют аналитические решения обеспечило сходимость результатов расчетов и эксперимента.

При исследовании физических процессов используются допущения: стенка СПН адиабатическая, продукты сгорания и компоненты топлива являются идеальными газами, химические реакции протекают бесконечно быстро, расчеты стационарны.

Делается положительный вывод о возможности применения использованных допущений на базе удовлетворительной сходимости с экспериментальными данными.

*Во введении* сформулирована актуальность темы работы. Проанализированы основные проблемы существующих двигательных установок. Отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов работы и описана структура диссертации.

*В первой главе* проведен анализ публикаций, рассматриваются общие вопросы существующих малоразмерных авиационных двигателей применяемых на БПЛА, обращается внимание на их характерные особенности, производится сравнение ВРД с двигателями других типов, определяются области оптимального применения, исследуются недостатки современных двигательных установок. Этот обзор показывает, что использование в качестве ДУ и ее элементов свободнопоршневых двигателей представляет определённый интерес.

*Во второй главе* описывается объект исследования – комбинированный ПуВРД со свободнопоршневым нагнетателем. Показано, что основой является использование свободно поршневой техники в качестве газогенератора, а так же расчет и построение характеристик ДУ для совмещения с проектным заданием на малоразмерный БПЛА. Производится разработка методики определения основных проектных параметров.

В третьей главе производятся расчеты по разработанным методикам и математическое моделирование различных комбинаций проектных параметров с целью определения оптимальных значений.

Рассмотрено влияние частоты работы двигателя на его тяговые характеристики и ресурс. Показано влияние скорости продувки топливной смесью на охлаждение теплонапряженных узлов ДУ.

Отмечено значительное влияние коэффициента усиления тяги от скорости полета в исследуемых случаях.

В четвертой главе проведена верификация методики выбора проектных параметров сравнением с результатами экспериментального исследования. Получена удовлетворительная сходимости экспериментальных и расчетных данных, что говорит о возможности применения допущений, моделей физических процессов и расчетной постановки исследования для изучения рабочих процессов. На основании разработанной методики проведена оценка основных параметров ЛА со стартовой массой от 1 до 100 кг и показано, что предложенный новый вариант комбинированной ДУ, обладает массовой эффективностью, сравнимой с известными разработками, и заслуживает дальнейшего более полного исследования.

Необходимо отметить следующие достижения и научно-технические результаты:

1. Разработана и защищена патентами новая концепция пульсирующего воздушно-реактивного двигателя для малоразмерного БЛА на базе свободнопоршневого газогенератора, которая должна обеспечить в классе тяги до 100 Н, оптимальное сочетание достоинств поршневых и реактивных двигателей: достаточно высокая экономичность, высокая (околозвуковая) скорость полёта и авиационные массогабаритные характеристики. Кроме того с использованием экспериментальных данных показана возможность реализации в двигателе высокоэффективного пульсирующего эжекторного усилителя тяги.

2. Разработаны методики выбора проектных параметров, выполнены расчёты и математическое моделирование различных комбинаций проектных параметров с целью определения оптимальных значений. На базе полученных расчётных данных сравнительный анализ с известными поршневыми микродвигателями показал преимущества разработки в массогабаритных и скоростных характеристиках.

В работе корректно использовались результаты экспериментальных исследований пульсирующих энергодвигательных установок других авторов, которые подтверждают правильность выбранной концепции.

Положительно оценивая работу в целом, необходимо высказать следующие замечания:

1. В работе недостаёт чёткости в обосновании и изложении разрабатываемой концепции двигательной установки. Не ясны преимущества

применения мембранного компрессора в основном варианте двигателя, явно ухудшаются массогабаритные характеристики, усложняется конструкция. Некоторые результаты расчётов вызывают сомнения, например, в таблице 3.1 температура выхлопных газов составляет всего 201<sup>0</sup>С, не увязываются между собой расходы топлива, указанные в трёх строках.

2. Нет расчёта и анализа теплового баланса по предложенной методике для рассматриваемого двигателя.

3. Не показано как проводился расчёт процесса сгорания.

4. По оценке теплового состояния приведён только результирующий график, без анализа.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Диссертация Минина Н. В. является законченной научно квалификационной работой, включающей в себя совокупность новых научных результатов и положений, их обоснование и применение к практическим задачам проектирования двигателей малоразмерных БПЛА. Цель работы достигнута. Диссертация написана технически грамотным языком.

Диссертация отвечает требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Минин Николай Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Эксперт конструкторского отдела  
перспективных разработок и  
экспериментальных исследований ГТД  
ПАО «ОДК-Сатурн»,  
доктор технических наук  
« 20 » 11 2017 г.

  
В. И. Богданов

152903, Россия, Ярославская обл., г. Рыбинск, пр. Ленина, 163, Публичное акционерное общество «ОДК - Сатурн», конструкторский отдел перспективных разработок и экспериментальных исследований ГТД, (4855) 29-64-85, bogdanov-vasiliy@yandex.ru.

Подпись В. И. Богданова заверяю.

Генеральный конструктор ПАО «ОДК - Сатурн»

Р.В. Храмин

« 20 » 11 2017 г.



Храмин - 28.11.2017г