



ТОЛЬЯТТИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования

«Тольяттинский государственный
университет»

(ТГУ)

ОКПО 55914968
ОГРН 1036300997567
ИРН 63220013673
КПП 632401001

ул. Белорусская, 14, г. Тольятти,
Самарской обл., 445020
Телефон (8482) 54-64-24
Факс (8482) 53-95-22
E-mail: office@tgu.ru
http://www.tgu.ru

Ученому секретарю
Диссертационного совета

Д212.079.02

д.т.н. В.А. Алтунину
420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10

№ _____
на № _____ от _____

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию БУДИНА Артемия Геннадьевича на тему «Интенсификация горения полимерного блока гибридного ракетного двигателя электростатическим полем», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05. 07. 05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Актуальность поставленной в диссертации проблемы, исследование тепловых и химических процессов в зоне горения для разработки методов контроля и управления сгоранием и оптимизации работ гибридных ракетных двигателей (ГРД), использующих в качестве топлива полимерный блок и газообразный окислитель, определяется низкой полнотой сгорания и недостаточно высоким уровнем тяги. Работы по решению этих проблем ведутся в различных направлениях: добавление катализаторов горения, металлов, высокоэнергетических добавок; конструкторские разработки – профилирование каналов блока горючего, систем турбулизации и закрутки потока окислителя. Одним из таких путей является наложение электрических и магнитных полей различной конфигурации на зону горения. К преимуществам этого направления относится то, что создаваемые поля требуют минимальных затрат на их поддержание. Несмотря на это практически отсутствуют экспериментальные данные по исследованию динамики и механизма фазовых переходов и теплофизических свойств топлива в электростатическом поле при горении.

Автор для исследования выбрал определение характера воздействия электростатического поля на интенсификацию горения полимеров в ГРД с



целью управления скоростью гетерогенного горения для достижения высокой полноты сгорания и тяги двигателя.

Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы из 116 источников и 5 приложений – изложена на 168 листах, включает 76 рисунков и 9 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту

Сформулированные задачи исследования: разработка и изготовление оригинального экспериментального стенда с ГРД и системы создания электростатического поля для изучения гетерогенного горения в высокосубзвуковом потоке и методики проведения экспериментальных исследований; экспериментальное исследование скорости горения пиролизующихся (ПММА) и плавящихся (полиамид 6) полимеров при воздействии электростатического поля; исследование влияния электростатического поля на тягу и расходный комплекс камеры сгорания ГРД; исследование процессов в поверхностном слое твердого горючего на границе раздела фаз и выявление особенностей воздействия электростатического поля на скорость горения полимеров в высокосубзвуковом потоке - отвечают теме диссертации.

В первой главе представлен критический обзор особенностей протекания процессов при гетерогенном горении в ГРД, в котором газообразное горючее образуется при пиролизе твердого компонента топлива, обтекаемого газообразным окислителем, и диффундирует в пограничный слой до зоны пламени. Зона пламени реализуется в пограничном слое, где осуществляется взаимосвязь кинетики химических процессов в конденсированной фазе, процессов горения в газовой фазе, конвективного и радиационного переноса тепла, а также массопереноса горючего, окислителя и продуктов сгорания в газовой фазе.

Управление процессом рассматриваемого вида гетерогенного горения требует воздействия на все процессы и в конденсированной и в газовой фазе.

Обзор моделей горения в двигателях данного типа показал, что определяющим параметром для скорости горения является скорость убывания твердого компонента – горючего, зависящей от массового расхода газообразного окислителя, плотности и теплоемкости топлива, вязкости газообразного горючего, коэффициентов вдува и окислителя, диаметра канала горения. Для ряда этих параметров отсутствуют точные сведения, что затрудняет расчёт скорости горения в ГРД.

Экспериментальные исследования применения внешних электростатических полей показали их способность как интенсифицировать, так и подавлять процесс горения. Для реальных энергетических установок, использующих твердое полимерное горючее и газообразный окислитель, исследования влияния электростатических полей практически отсутствуют.

Критический анализ литературных данных позволил сформулировать цель и задачи исследования.

Во 2 - ой главе представлены схема и описание оригинального экспериментального стенда, измерительного оборудования, комплекса регистрации данных испытаний и их обработки. Оборудование отвечает современным требованиям к проведению исследований такого рода. Измерялись следующие параметры: тяга, избыточное давление в предварительной камере, также производилась видеозапись процесса горения.

Особенностью экспериментального ГРД является высоковольтная система для создания электростатического поля в камере сгорания. Система содержит источник высокого напряжения от 35 В до 35кВ и системы электродов, позволяющие формировать радиальную и плоскопараллельную конфигурацию поля.

Рассмотрены вопросы методики проведения испытаний. Произведена оценка точности результатов экспериментального исследования.

Линейная скорость горения определялась 2-мя способами: обработкой видеозаписи разгара канала в различных сечениях блока горючего и по отношению массового расхода твёрдого компонента к усреднённой площади поверхности горения и плотности полимера.

Особенности влияния электростатического поля на конденсированную фазу и механизм терморазложения ПММА при горении исследовались при изучении фотографий поверхности шашек горючего после горения.

Достоверность результатов экспериментального исследования подтверждается хорошим совпадением полученных величин линейных скоростей горения при отсутствии электростатического поля с результатами работ зарубежных авторов.

В 3-ей главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса турбулентного гетерогенного горения для 2-х видов полимеров: пиролизующихся (ПММА) и плавящихся (полиамид 6) при числах Рейнольдса в потоке окислителя от 17000 до 90000.

Следует отметить, что представленные экспериментальные данные представляют большой самостоятельный интерес как с точки зрения научной новизны, так и – практической значимости.

Наложение радиального электростатического поля приводит к росту линейной скорости горения ПММА до 31% при напряжённости 266 кВ/м, для полиамида – на 17% при напряжённости 373 кВ/м.

Обработка экспериментальных данных позволила получить закон горения в виде

$$u = \alpha(\rho v)^n$$

Для топлива ПММА + газообразный кислород коэффициент α в зависимости от напряжённости электростатического поля (0-266кВ/м) изменяется от 0,029 до 0,038, а показатель степени n от 0,56 до 0,57.

При использовании в качестве горючего полиамида 6 (напряжённость поля 0-373 кВ/м) коэффициент изменялся от 0,033 до 0,059, показатель степени от 0,37 до 0,059.

Рост линейной скорости горения с наложением электростатического поля в законе горения отражается увеличением коэффициента α .

Увеличение линейной скорости горения обусловило рост тяги двигателя при использовании электростатического поля до 21% при использовании ПММА и до 16% для полиамида 6. Причём рост тяги подчиняется линейному закону в зависимости от комплекса (ρv).

Для использования в моделировании процесса гетерогенного горения определён расходный комплекс β , определяемый как отношение произведения давления в камере сгорания на площадь выбранного сечения к суммарному массовому расходу продуктов сгорания. По результатам экспериментов расходный комплекс β , следовательно, удельный импульс при наложении электростатического поля возрастает.

Оценка влияния электростатического поля на скорость горения при изменении коэффициента избытка воздуха показала рост интенсификации горения.

При изменении конфигурации электростатического поля с радиального на плоскопараллельное сохраняется эффект увеличения роста скорости горения и увеличения тяги.

Расчётным путём по методике А.Ф. Дрегаллина с привлечением полученных экспериментальных данных показано увеличение полноты сгорания при использовании электростатического поля.

На основании результатов эксперимента и их анализе автор делает вывод об эффективности предложенного способа применения электростатического поля для управления скоростью гетерогенного горения и тягой ГРД.

В 4 – ой главе представлен анализ влияния электростатического поля на процесс горения в ГРД, уточнение модели горения с выводом модернизированной формулы определения скорости горения.

Автором показано, что для анализа влияния электростатического поля на гетерогенное горение недостаточно ограничиваться процессами в газовой фазе. Поэтому он подробно рассмотрел процессы, протекающие на границе раздела фаз и в поверхностном слое твёрдого компонента – горючего.

Увеличение скорости горения плавящихся полимеров (полиамид 6) объясняется влиянием электростатического поля на слой жидкого расплава на границе раздела фаз за счёт интенсификации процесса диспергирования при развитии неустойчивости поверхности из-за возникновения электродиспергирования. Подтверждается снижением толщины слоя сажи на поверхности отработанных блоков и изменением структуры их поверхности.

Оценка процессов в конденсированной фазе, влияющих на скорость горения пиролизующегося полимера (ПММА) проведена по результатам исследования структуры поверхности отработавшего горючего, показавшего

изменение количества центров разложения и глубины пиролизируемого слоя при наложении электростатического поля. Исследуемая поверхность твёрдого блока горючего, по нормали к поверхности горения содержат цилиндрические каналы или каверны, открытые наружу. При наложении электростатического поля количество каверн увеличивается на 15-30%. Количество каверн определяется условиями теплообмена и распределением температуры в полимере.

На основании исследования количества каверн и увеличения за счёт этого роста площади поверхности твёрдого горючего и изменения температурного поля в нём автором предложена модель гетерогенного горения в ГРД с привлечением модернизированной формулы, содержащей две составляющих скорости горения:

Первая из модели Е.Б. Волкова и Г.Ю. Мазинга

$$u = \frac{0.0276(\rho U)^{0,8} \left(\frac{d}{\mu}\right)^{-0,2} B^{0,23}}{Q_T}$$

И вторая, предложенная автором, учитывающая процессы в на границе раздела фаз и в поверхностном слое горючего компонента

$$u_d = \frac{N(E)\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \left(\frac{h}{2}\right)}{2a}$$

Рассчитанные по предложенной зависимости скорости горения показали хорошее совпадение с экспериментальными данными.

Научная новизна заключается в следующем:

1 Экспериментально установлены закономерности скорости горения твёрдого компонента топлива в ГРД при различных значениях напряжённости и конфигурации электростатического поля, созданного в камере сгорания для плавящегося и полимеризующегося полимера.

2 Разработан и защищён патентом на изобретение способ увеличения тяги ГРД за счёт создания электростатического поля с помощью источника высокого напряжения и двух электродов.

3 Экспериментально показано увеличение тяги и расходного комплекса камеры сгорания в присутствии электростатического поля.

4 Определено, что пиролиз ПММА при гетерогенном горении происходит в слое конечной толщины с образованием каверн – полостей, открытых к поверхности горения.

5 Предложена модель, описывающая воздействие электростатического поля на скорость горения полимерного блока, которая позволила модернизировать формулу определения скорости сгорания введением дополнительного слагаемого, учитывающего процессы на границе раздела фаз и в поверхностном слое горючего компонента

Следует отметить, что пункт первый научной новизны в работе автора скорее относится к разделу практической значимости.

Теоретическая и практическая значимость работы исследований включает:

1 Расширение системы знания о процессе гетерогенного горения при воздействии электростатического поля (п.п. 4, 5 раздела научной новизны)

2 Практическая значимость заключается в разработке оригинального экспериментального стенда. В полученных результатах экспериментального исследования и их обобщении в виде формулы для определения скорости гетерогенного горения, которые могут быть полезны при решении задач по управлению скоростью горения (отражена в пунктах 1-3, 5 раздела научной новизны), в разработке нового способа регулирования параметров работы ГРД.

Достоверность результатов работы подтверждается применением современного экспериментального оборудования, необходимой точностью и тарировкой измерительных систем, воспроизводимостью результатов испытаний, использованием современных аппаратных и программных средств регистрации и обработки данных, непротиворечивостью полученных результатов существующим фундаментальным положениям в данной области, совпадением результатов сравнительных экспериментов с работами других учёных.

Содержание диссертации соответствует научной специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Основные выводы диссертации соответствуют поставленным задачам исследования.

Автореферат и публикации полностью отражают основные положения, результаты, выводы и соответствуют диссертационной работе.

Основные результаты диссертации отражены в 17 научных работ: 4 статьи в журналах, включенных в список ВАК, патент на изобретение и 12, материалов и тезисов докладов международных и Всероссийских научно-технических конференций.

Апробация материалов диссертации проводилась на 12 международных и Всероссийских научно-технических конференциях, на НТС в Государственном научном центре ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения».

В диссертационной работе имеются следующие недостатки:

В главе 1 и автореферате: При формулировке задач исследования в явном виде не сформулирована необходимость проведения моделирования процесса гетерогенного горения для модернизации закона горения.

Неудачное введение формулировки «тестовый стенд» вместо общепринятой «экспериментальный»

В главах 2 и 3: Неудачный выбор значений параметров по осям координат, рис. 2.20, 3.5, 3.6, 3.14, например 0,12, 0,17 и т.д., 13,23, 33 ...

При разработке эмпирических зависимостей в процессе обобщения результатов экспериментов по определению скоростей сгорания для формул 3.5, 3.8, 3.9 и 3.16, 3.19, 3.20 можно было подобрать одинаковые значения

показателей степеней, а разницу получаемых величин скоростей отразить коэффициентами.

В заключении диссертации и автореферата отсутствует в явном виде модифицированная формула определения скорости гетерогенного горения при наложении на камеру сгорания электростатического поля.

В тексте автореферата в формуле определения скорости горения в явном виде не представлено слагаемое, учитывающее влияние электростатического поля.

В автореферате описание первой главы можно было сократить.

Несмотря на указанные замечания работа Будина А.Г. выполнена на высоком научно-техническом уровне. Автор показал владение методами расчета процессов тепло и массообмена, провел экспериментальные исследования с применением современного стенового оборудования и аппаратуры, подтверждающие адекватность полученной расчетной модели.

Таким образом, диссертационная работа Будина Артемия Геннадьевича «Интенсификация горения полимерного блока гибридного ракетного двигателя электростатическим полем» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей актуальное значение для развития двигателестроения. Содержание автореферата и диссертации в полной мере соответствует требованиям п. 9 «Положение о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №482, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, БУДИН Артемий Геннадьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Официальный оппонент,
профессор кафедры

«Энергетические машины и системы управления»,

Заслуженный работник высшей школы РФ,

Доктор технических наук, профессор *Шайкин* А.П. Шайкин

29.01.2018

E-mail: a_shajkin@mail.ru

Тел. 8(927)897-03-28

445020, Самарская область, г. Тольятти, ул. Белорусская, д.14

Тольяттинский государственный университет

Подпись Шайкина А.П. заверяю _____



СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе Будина Артемия Геннадьевича

на тему «Интенсификация горения полимерного блока гибридного ракетного двигателя электростатическим полем», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки)

№ п/п	Фамилия, имя, отчество	Место основной работы (полное наименование организации, адрес), должность, телефон, адрес электронной почты	Ученая степень (с указанием шифра специальности научных работников, по которой защищена диссертация)	Основные работы, опубликованные в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет (не более 15 публикаций)
1	2	3	4	5
1	Шайкин Александр Петрович	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тольяттинский государственный университет", 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, д.14, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления». Тел. +7 (927) 897-03-28, E-mail: a_shajkin@mail.ru	Доктор технических наук, профессор, 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Шайкин А.П., Иващип П.В., Галиев И.Р. Скорость распространения и ионизация пламени при сжигании бензина и метана с добавкой водорода Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета), 2013. №2 (40), С.140-148. 2. Шайкин А.П., Иващип П.В., Рамазанов М.П., Твердохлёбов А.Я., Ясников И.С. О взаимосвязи скорости распространения и электропроводности пламени в ДВС. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета), 2013. №3-1 (41), С.103-112 3. Ясников И.С., Иващип П.В., Шайкин А.П. К вопросу о турбулентном распространении пламени в замкнутом объеме. Журнал технической физики, 2013, т. 83, вып.11, с. 39-43

				<p>4. Yasnikov I.S., Ivashin P.V., Shaikin A.P. On The Turbulent Propagation of a Flame in a closed volume/ Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 2013. N.58, №11. С. 1587-1591</p> <p>5. Шайкин А.П., Ивашии П.В., Галиев И.Р. Взаимосвязь ионного тока с концентрацией углерода в топливе и видимой скорости распространения пламени. Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2014.Т 1. № 3 (21). С.69-74</p> <p>6. Шайкин А.П., Ивашии П.В., Галиев И.Р. О влиянии температуры и ширины зоны турбулентного горения на показания ионизационного датчика. Журнал технической физики. 2016. Т. 86, вып.8. С. 87-89</p> <p>7. Shaikin A.P., Galiev I.R. On the effect of the temperature and the width of turbulent combustion zone of the ionization detector readings. Technical Physics. V.61. # 8. P. 1206-1208.</p> <p>8. Shaikin A.P., Galiev I.R. Relationship of flame propagation speed for methane-hydrogen fuel of a internal combustion engine with parameters of ion current and hydrogen concentration. Russian Aeronautics (iz VUZ). 2016. V.59 (2). P. 249-253</p> <p>9. Шайкин А.П., Галиев И.Р. Влияние пульсационной скорости на электропроводность углеводородного пламени. Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. Т.15, №3, с.109-115.</p>
--	--	--	--	---

				<p>10. Шайкин А.П., Иващин П.В., Галиев И.Р., Дерячев А.Д., Твердохлебов А.Я. Использование явления электропроводности пламени неоднородной топливозооудной смеси при проектировании и доводке камер сгорания. Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. Т.15, №3, с.116-123.</p> <p>11. Шайкин А.П., Иващин П.В., Дерячев А.Д. Исследование взаимосвязи тока ионизации и максимального индикаторного давления при сгорании безвоздушной смеси, обогащенной водородом. Вектор науки Тольяттинского Государственного университета. 2017. № 1 (39). С. 30-35</p>
--	--	--	--	---

Подпись

Шайкина А.П.
29.01.2018

Подпись д.т.н., профессора кафедры «Энергетические машины и системы управления» Шайкина А.П. удостоверяю

