



Акционерное общество

**МИТ «КОРПОРАЦИЯ****«МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ТЕПЛОТЕХНИКИ»**

Березовая аллея, д.10, Москва, Россия, 127273
 Телефон: (499) 907-37-74, Телефакс: (499) 907-37-29;
 e-mail: info@corp-mit.ru

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

С.А. Пономарёв

2025 г.

**ОТЗЫВ**

ведущей организации АО «Корпорация «Московский институт теплотехники» на диссертацию Шайдуллина Руслана Айратовича, выполненную по теме: «Влияние взаимодействия продуктов сгорания безметалльного твердого топлива с продуктами разложения теплозащитного материала на характеристики РДТТ», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

1. Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Шайдуллина Руслана Айратовича посвящена совершенствованию методов проектирования, отработки и доводки РДТТ. В процессе взаимодействия продуктов сгорания (ПС) твёрдого топлива (ТТ) с продуктами разложения (ПР) теплозащитного покрытия (ТЗП) в камере сгорания (КС) и сопле двигателя протекают сложные физико-химические процессы, включающие сублимацию, разложение, коксование и унос теплозащитного материала. Данные процессы обусловлены взаимодействием продуктов разложения с продуктами сгорания твёрдого топлива, а также изменением параметров вблизи тепловой защиты (в т. ч. изменением скорости уноса теплозащитного материала). Учет параметров данных процессов при разработке РДТТ позволяет более точно прогнозировать получаемый уровень значений энергомассовых и расходно-тяговых характеристик работы двигательной установки.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
 И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
 ДОКУМЕНТОВ МАИ

«01.12.2025»

000340

Использование предложенного автором диссертационной работы метода определения потерь (посредством учёта коэффициентов расхода μ_c , сопла φ_c , совершенства процессов в КС φ_β , удельного импульса φ_I), обусловленных несовершенством процессов в камере сгорания и сопле, позволяет выбрать наиболее оптимальные конструктивные решения, способствующие увеличению удельного импульса и, как следствие, повышению дальности полёта и массы полезной нагрузки ракетносителя.

Таким образом, усовершенствование методов проектирования и разработки РДТТ, учитывающих параметры взаимодействия продуктов сгорания твердого топлива с продуктами разложения теплозащитного покрытия, является сложной научно-технической задачей, а её решение важно и актуально для оборонной и гражданской отраслей современной промышленности.

2. Цель работы

Целью диссертационной работы является анализ влияния продуктов газификации ТЗП на коэффициент расхода, коэффициент сопла и коэффициент удельного импульса, совместно определяющих потери в РДТТ.

3. Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 135 наименований и приложения; объем работы составляет 125 страниц, включая 66 рисунков и 7 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, описывается степень проработанности направления, объект и предмет исследования. Формулируются цель и задачи работы, описываются методы и методология исследования, приводится апробация работы на конференциях, указываются публикации и результаты внедрения.

В первой главе проводится обзор работ по моделированию процессов горения ТТ на основе перхлората аммония и полибутадиенового каучука с гидроксильными концевыми группами. Ключевой акцент сделан на нескольких кинетических механизмах горения выбранного ТТ, рассмотрении результатов моделирования горения, полученных в реакторных приближениях. Расчетные данные сравниваются с результатами экспериментов зарубежных авторов и с параметрами идеального термодинамического равновесия, в т. ч. на участке сопла. Описывается разработанная газодинамическая модель реагирующей среды в составе РДТТ, определяется необходимый шаг времени для нестационарной задачи и обосновывается сеточная независимость расчетной модели.

Использование предложенного автором диссертационной работы метода определения потерь (посредством учёта коэффициентов расхода μ_c , сопла φ_c , совершенства процессов в КС φ_β , удельного импульса φ_I), обусловленных несовершенством процессов в камере сгорания и сопле, позволяет выбрать наиболее оптимальные конструктивные решения, способствующие увеличению удельного импульса и, как следствие, повышению дальности полёта и массы полезной нагрузки ракетносителя.

Таким образом, усовершенствование методов проектирования и разработки РДТТ, учитывающих параметры взаимодействия продуктов сгорания твердого топлива с продуктами разложения теплозащитного покрытия, является сложной научно-технической задачей, а её решение важно и актуально для оборонной и гражданской отраслей современной промышленности.

2. Цель работы

Целью диссертационной работы является анализ влияния продуктов газификации ТЗП на коэффициент расхода, коэффициент сопла и коэффициент удельного импульса, совместно определяющих потери в РДТТ.

3. Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 135 наименований и приложения; объем работы составляет 125 страниц, включая 66 рисунков и 7 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, описывается степень проработанности направления, объект и предмет исследования. Формулируются цель и задачи работы, описываются методы и методология исследования, приводится апробация работы на конференциях, указываются публикации и результаты внедрения.

В первой главе проводится обзор работ по моделированию процессов горения ТТ на основе перхлората аммония и полибутадиенового каучука с гидроксильными концевыми группами. Ключевой акцент сделан на нескольких кинетических механизмах горения выбранного ТТ, рассмотрении результатов моделирования горения, полученных в реакторных приближениях. Расчетные данные сравниваются с результатами экспериментов зарубежных авторов и с параметрами идеального термодинамического равновесия, в т. ч. на участке сопла. Описывается разработанная газодинамическая модель реагирующей среды в составе РДТТ, определяется необходимый шаг времени для нестационарной задачи и обосновывается сеточная независимость расчетной модели.

Вторая глава посвящена исследованию кинетических механизмов горения перхлората аммония. Уделяется внимание профилям температуры и мольным долям индивидуальных веществ ПС перхлората аммония в приповерхностном слое горящего компонента топлива; результаты сравниваются с данными других авторов и с экспериментальными результатами при давлении, ниже атмосферного. Приводятся результаты расчетов в умеренном диапазоне давлений при использовании разработанного автором редуцированного кинетического механизма. Анализируются перспективы дальнейшего использования исследуемых кинетических механизмов.

Третья глава посвящена исследованию влияния абляции теплозащитного материала (ТЗМ) на основе фенолформальдегидной смолы дозвукового участка утолщенного сопла на коэффициент расхода и коэффициент сопла, рассматриваемые в качестве определяющих параметров эффективности энергоперехода в РДТТ. Приводится система уравнений для определений условий пиролиза на границе вдува в дозвуковую часть сопла, посредством которой автором получены результаты изменения искомых коэффициентов расхода и сопла в широком диапазоне интенсивности вдува. Особое внимание уделяется вопросам газодинамического профиля обтекания дозвукового контура сопла, эндотермическим эффектам и суммарному влиянию абляции ТЗМ на падение скорости на срезе сопла, что в совокупности определяет потери удельного импульса изделия.

В четвертой главе рассматриваются вопросы влияния абляции резиноподобного теплозащитного материала в объеме камеры сгорания РДТТ на коэффициенты расхода и сопла. Особое внимание уделяется методологии расчета и граничным условиям, а также рассмотрению нереагирующих (инертных) частиц сажи в качестве продуктов разложения резиноподобного ТЗМ. Определены зависимости изменения коэффициентов расхода, сопла и совершенства процессов в КС от интенсивности вдува $\dot{m}_{вд}/\dot{m}$ при существенном эндотермическом эффекте, возникающем в результате взаимодействия продуктов пиролиза ТЗП и продуктов сгорания ТТ. Анализируются полученные расчетные диаграммы изменения коэффициентов расхода, сопла и совершенства процессов в КС; затронуты вопросы потерь удельного импульса из-за двухфазности в зависимости от размеров инертных частиц сажи.

Пятая глава посвящена обобщенному влиянию абляции на коэффициент удельного импульса, определяющий степень преобразования химической энергии топлива в тягу. Подробно приводятся особенности взаимодействия продуктов сгорания ТТ «перхлорат аммония/полибутадиеновый каучук с

гидроксильными концевыми группами» с продуктами разложения фенолформальдегидной смолы и резиноподобного теплозащитного материала, степень их влияния на коэффициент удельного импульса. Отмечается заметная разница между газодинамическим моделированием химически активной среды и системы, находящейся в термодинамическом равновесии, при существенной неравномерности температуры потока в условиях значительного эндотермического эффекта. Производится сравнение полученных расчетных значений потерь удельного импульса с результатами других исследований; при этом особое внимание уделяется рецептуре твердого топлива и его физико-химической совместимости с продуктами разложения ТЗМ.

В заключении приводятся основные результаты исследования, касающиеся в большей степени малогабаритных РДТТ. Выдаются рекомендации по использованию механизма химической кинетики в описании взаимодействия реагирующей среды в объеме двигателя.

4. Достоверность результатов диссертации

Достоверность результатов диссертации обеспечивается применением типовых методик и алгоритмов расчетов реагирующих систем, турбулентных течений и газодинамических процессов по тракту РДТТ. В работе выполнена верификация используемых кинетических механизмов горения по основным параметрам и составу ПС с результатами экспериментов и расчетными данными, полученными с помощью достоверных методик определения условий термодинамического равновесия. Проведено сопоставление расчетных зависимостей коэффициента расхода и коэффициента удельного импульса от геометрии дозвукового участка утолщенного сопла с результатами расчётно-экспериментальных работ других авторов.

Кроме того, достоверность полученных результатов подтверждается использованием в работе фундаментальных законов газовой динамики, термодинамики, теорий горения и тепломассообмена, применением аттестованных средств измерения и регистрации.

5. Научная новина работы:

В результате проведения комплекса расчётно-экспериментальных исследований были получены следующие результаты, составляющие научную новизну представленной диссертационной работы:

- получен редуцированный кинетический механизм для пламени перхлората аммония;
- впервые получены расчетные зависимости изменения коэффициентов расхода, сопла и удельного импульса при взаимодействии продуктов

сгорания ТТ с продуктами разложения ТЗП в камере сгорания и сопле РДТТ, основанные на химической кинетике твердого топлива, в широком диапазоне интенсивности вдуваемых продуктов пиролиза;

- определены формообразующие параметры для построения оптимального контура дозвукового участка утолщенного сопла РДТТ, отличающегося минимальными значениями потерь коэффициентов расхода, сопла и удельного импульса.

6. Теоретическая и практическая значимость

В рамках выполнения диссертационной работы сформулированы обоснованные рекомендации по моделированию процесса горения ТТ (отдельно и в составе двигателя). Данные рекомендации могут быть полезны для дальнейших исследований и работ, учитывающих химическую неравновесность смеси ПС ТТ и ПР ТЗП; в частности, при модернизации математической модели появляется возможность проведения оценки возникновения и развития акустических волн в камере сгорания РДТТ, что, в свою очередь, позволит прогнозировать развитие опасных неустойчивых режимов работы двигательной установки на этапе проектирования изделия.

Зависимости изменения коэффициентов расхода, сопла и удельного импульса при абляции теплозащитного материала в двигательной установке могут быть использованы при проектировании РДТТ с целью обеспечения выполнения требований по тяге и суммарному импульсу двигателей, а также для достижения высокого уровня согласования экспериментальных и теоретических результатов. Некоторые основные результаты работы внедрены в научно-исследовательский процесс ФГБОУ ВО «КНИТУ им. А.Н. Туполева-КАИ».

7. Замечания по представленным материалам диссертационной работы

1. В главе 5 диссертации на рис. 5.4, иллюстрирующем изменение температуры смеси продуктов сгорания ТТ «перхлорат аммония/полибутадиеновый каучук = 84/16» при добавлении (вдуве) в их состав газофазных продуктов разложения (метана и водорода) резиноподобного ТЗП, при интенсивности вдува $\dot{m}_{\text{вд}}/\dot{m} \geq 6\%$ наблюдается существенное отличие расчетной температуры от температуры термодинамического равновесия, что может привести к значительным искажениям при последующем определении значений коэффициентов расхода, сопла и удельного импульса.
2. В диссертации рассмотрено взаимодействие продуктов сгорания безметального ТТ с продуктами разложения фенолформальдегидного и резиноподобного ТЗП. При этом не указано, насколько универсальна

разработанная физико-математическая модель; например, позволяет ли она рассматривать другие теплозащитные материалы: синтетические каучуки, эпоксидные и фторполимерные смолы или их комбинации.

3. В представленной работе отсутствует учёт изменения геометрии минимального сечения дозвукового контура при абляции теплозащитного материала.
4. Отсутствуют сведения о химических реакциях разложения твердого топлива в жидкой фазе, а также не учитываются реакции на поверхности теплозащитного покрытия; вместе с тем данные реакции могут оказать заметное влияние на параметры работы РДТТ.

Однако указанные замечания не снижают научной новизны и практической значимости основных результатов работы.

8. Результаты диссертационной работы

Результаты представленной диссертационной работы следует рассматривать как значительный вклад в теорию и практику важной для оборонной промышленности области разработки высокоэффективных РДТТ, применяемых в составе перспективных образцов ВВСТ с повышенными тактико-техническими характеристиками.

Диссертация представляет собой целостную работу, написанную логично, в доступном изложении с использованием современного понятийного аппарата. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 5 – в изданиях, входящих в перечень ВАК, одна статья – в журнале, индексируемом в базе Scopus, 5 тезисов докладов – в материалах научных конференций. Результаты работы докладывались и широко обсуждались на международных и всероссийских конференциях.

Автор самостоятельно провёл анализ научно-технической литературы (в т. ч. математических моделей процессов горения ТТ в реакторных приближениях), разработал математическую модель газодинамического расчёта химически реагирующей среды в составе РДТТ, уточнил кинетический механизм горения перхлората аммония, разработал упрощённую модель теплообмена между вдуваемыми продуктами пиролиза теплозащитного материала и основным газовым потоком.

В тексте автореферата достаточно полно отражены основные положения диссертационной работы.

По своему содержанию и области исследований диссертация Шайдуллина Р.А. соответствуют паспорту специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Диссертация Шайдуллина Р.А. является законченной научно-исследовательской работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для повышения энергетической эффективности современных и перспективных двигательных установок в интересах обеспечения обороноспособности страны.

9. Заключение

Диссертационная работа Шайдуллина Руслана Айратовича по своей актуальности, научной новизне и практической ценности соответствует требованиям пунктов 9 – 14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Отзыв составили:

Заместитель начальника
отделения по проектированию
кандидат технических наук



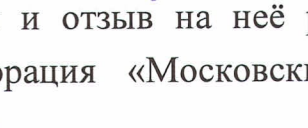
Е.Н. Волков

Начальник отдела
кандидат технических наук



А.О. Цветков

Ведущий научный сотрудник
кандидат технических наук



А.И. Шабунин

Материалы диссертации и отзыв на неё рассмотрены и одобрены на заседании НТС АО «Корпорация «Московский институт теплотехники» (протокол №8 от 25.11.2025 г.).

ВрИО секретаря НТС
АО «Корпорация «МИТ»
кандидат технических наук, с.н.с.



Б.В. Румянцев

Контактные данные организации:

Полное наименование: АО «Корпорация «Московский институт теплотехники»

Сокращенное наименование: АО «Корпорация «МИТ»

Адрес: 127273, г. Москва, Берёзовая аллея, д. 10

Телефон: 8(499) 907-37-74

Факс: 8(499) 907-37-29

Адрес электронной почты: info@corp-mit.ru

Официальный сайт: corp-mit.ru

Сотрудник организации 09.12.25. Шайдуллин Р.А.