

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук Полянского Александра Ромиловича на диссертацию Шайдуллина Руслана Айратовича «Влияние взаимодействия продуктов сгорания безметалльного твердого топлива с продуктами разложения теплозащитного материала на характеристики РДТТ», представленную в диссертационный совет 24.2.327.06 на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Актуальность темы исследования. Вопрос повышения энергоэффективности ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) является сложным в теоретическом и практическом плане. Помимо выбора твердого топлива, теплозащитного материала и газодинамического контура сопла к основным критериям сохранения современного уровня удельного импульса РДТТ можно также отнести формирование газового потока и сохранение его энергии по тракту движения РДТТ. В камере сгорания и в сопле РДТТ происходят сложные физико-химические взаимодействия связанные как с продуктами разложения теплозащитных материалов, так и с преобразованиями самих продуктов сгорания твердого топлива, все это сопровождается нестационарными колебательными процессами. К суммарным эффектам такого взаимодействия стоит отнести изменение тепловых потоков к стенкам РДТТ, способствующие иной абляции, и изменение энергетических характеристик РДТТ за счет эндотермических/экзотермических взаимодействий вблизи теплозащитных материалов и в ядре тракта РДТТ.

Экспериментальное проведение подобных исследований является очень дорогостоящим, что делает наиболее примечательным использования вычислительных алгоритмов математического моделирования, основанной на химической кинетике твердого топлива, что как раз и рассмотрено автором.

В связи с вышеизложенным, считаю, что работа автора по исследованию влияния процессов абляции и химического взаимодействия между продуктами сгорания и продуктами разложения теплозащитных материалов является весьма актуальной.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.

Автором выполнен анализ большого объема научно-технической литературы, на основе которого определены допущения, используемые в работе, и разработана методология исследования влияния взаимодействия продуктов сгорания с продуктами разложения теплозащитного материала на характеристики РДТТ. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается использованием проверенных математических методов исследования физико-химических процессов в составе ракетных двигателей, апробированной во многих зарубежных

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

1 12 2025 г.

и отечественных работах модели турбулентности, объемной проработкой, апробирования и верификации кинетических механизмов горения твердого топлива, удовлетворительным согласованием полученных расчетных данных с экспериментальными результатами и исследованиями других авторов в части горения твердого топлива. Обоснованность выводов и рекомендаций подтверждается использованием достоверных алгоритмов расчета для определения коэффициентов расхода и сопла РДТТ, сравнением теоретических расчетных данных с результатами других авторов и с результатами термодинамического равновесия. Основные результаты диссертации обсуждались на 5 конференциях и опубликованы в 6 работах: пять – в рецензируемых журналах перечня ВАК, одна – в международном издании, индексируемом в Scopus.

Научная новизна результатов диссертационной работы:

1. Получен редуцированный кинетический механизм для пламени перхлората аммония.
2. На базе осесимметричного приближения автором разработана общая методология и рекомендации к моделированию процесса горения твердого топлива и физико-химических взаимодействий продуктов сгорания с продуктами разложения теплозащитного материала в составе РДТТ.
3. Получены границы изменения коэффициентов расхода, сопла и коэффициента удельного импульса в широком диапазоне интенсивности вдува газов пиролиза теплозащитного материала с разных дозвуковых контуров утолщенного сопла и газов пиролиза резиноподобного теплозащитного материала в камере сгорания для твердого топлива на основе перхлората аммония и полибутадиенового каучука.
4. Определены оптимальные границы геометрических параметров формы дозвукового контура сопла при абляции теплозащитного материала с дозвукового участка утолщенного сопла.

Практическая значимость.

В диссертационной работе Шайдуллина Р.А. даны практические и теоретические рекомендации по моделированию процесса горения безметалльного твердого топлива на основе перхлората аммония и полибутадиенового каучука, которые в последствии могут быть использованы другими исследователями или работниками соответствующих предприятий для решения практических задач с данным топливом.

Результаты изменения коэффициентов расхода и сопла при абляции теплозащитного материала в камере сгорания и в объеме сопла в широком диапазоне интенсивности вдува газов пиролиза рекомендованы к использованию при проектировании и доводке малогабаритных РДТТ в части выполнения требований к энергетическим и тяговым характеристикам изделия.

Методику и алгоритм проводимых расчетов в дальнейшем возможно модифицировать при наличии апробированного кинетического механизма для твердого топлива на основе перхлората аммония/алюминия и с помощью

численных исследований получить расчетное изменение характеристик для крупногабаритных РДТТ.

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 135 наименований и приложений, в которых отражены используемый кинетический механизм горения перхлората аммония/полибутадиенового каучука, кинетический механизм для пламени перхлората аммония и акт о внедрении результатов диссертационной работы в научно-исследовательский процесс ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева».

В первой главе представлен обзор отечественной и зарубежной научно-технической литературы по исследованию процессов горения твердых топлив и кинетических механизмов твердого топлива на основе перхлората аммония/полибутадиенового каучука. Представлены результаты расчетов по реакторным моделям для пламени твердого топлива и их сравнение с экспериментальными данными и с термодинамическим равновесием в условиях камеры сгорания и сопла. Приведена математическая модель с рекомендациями по использованию моделей горения Finite Rate и Eddy Dissipation Concept для твердых топлив, обозначена необходимость допущения о монотопливе, оптимизация необходимого инкремента времени. В главе отмечена необходимость наличия корректного кинетического механизма для математического описания физико-химических процессов в камере сгорания и сопле.

Во второй главе приведено исследование кинетических механизмов для пламени перхлората аммония в умеренном диапазоне давлений. Обсуждены профили температуры и изменения мольной доли индивидуальных веществ в приповерхностном слое горящего перхлората аммония, в том числе и профили, полученные с помощью редуцированного механизма.

В третьей главе подробно рассмотрена методика совместных расчетов газодинамики реагирующей среды и теплового потока к дозвуковому участку сопла. Приведена упрощенная методика определения граничных условий для вдуваемого потока газов пиролиза на границе теплозащитного материала. В качестве вдуваемых газов пиролиза принят состав газов разложения фенолформальдегидной смолы, полученный экспериментально другими авторами. Исследовано влияние абляции теплозащитного материала дозвукового участка утолщенного сопла на коэффициенты расхода и сопла, сделан акцент на химической неравновесности смеси и факторе изменения температуры в приповерхностной зоне сопла. В главе обсуждена тенденция изменения активной поверхности теплозащитного материала к изменению коэффициенту расхода. По главе сделаны соответствующие выводы.

В четвертой главе исследовано влияние абляции резиноподобного теплозащитного материала в камере РДТТ с твердым топливом, горящим по торцевой поверхности. С учетом нереагирующих частиц сажи подробно представлено изменение коэффициентов расхода и сопла, отражены границы их изменений для выбранного топлива. Показана расчетная разница между

значениями коэффициентов при учете только газов пиролиза, газов пиролиза и нереагирующей сажи и только при учете частиц сажи.

В пятой главе представлено обобщение расчетных результатов ранних глав с результатами расчетов других авторов и с результатами термодинамического равновесия с точки зрения изменения коэффициента удельного импульса и коэффициента сопла. Показано влияние уменьшения температуры потока вследствие эндотермических реакций в периферийных сечениях камеры сгорания и дозвукового участка сопла на коэффициенты сопла и удельного импульса. В качестве наиболее влияющих на коэффициент удельного импульса параметров представлены геометрические размеры дозвукового контура утолщенного сопла и фактор изменения температуры, как следствие взаимодействия продуктов пиролиза с продуктами сгорания. Отмечено малое влияние уменьшения молекулярного веса продуктов истечения в приповерхностной зоне сопла при абляции дозвукового контура.

В заключении приведены основные теоретические и прикладные результаты работы.

Основные замечания:

1. В представленной модели определения граничных условий для газов пиролиза (определения T_s , T_w) отсутствует верификация подобного математического описания с результатами экспериментов.
2. В диссертационной работе отсутствует математическое описание применяемых реакторных подходов.
3. В главе 1 представлены результаты моделирования горения гексогена, однако, в газодинамическом моделировании гексоген отсутствует. Наличие сравнения разных рецептов твердых топлив и их влияние на конечное изменение коэффициента удельного импульса представляло бы дополнительный интерес.
4. Модель Д.Р. Бартца предназначена для гладких дозвуковых участков и не учитывает вдув продуктов пиролиза, что определяет некоторую ошибку в определении теплового потока, данное обстоятельство не рассмотрено в диссертации.
5. В главе 4 на рисунке 4.14 представлены потери удельного импульса из-за двухфазности потока для размеров инертных частиц сажи 1000 и 100 мкм, однако отсутствует анализ влияния температурного отставания частиц на потери из-за двухфазности. Отсутствует сравнение с классическими моделями определения потерь из-за двухфазности.
6. Отсутствует сравнение расчетных потерь удельного импульса с потерями из-за химической неравновесности.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Шайдуллина Р.А.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертация Шайдуллина Руслана Айратовича «Влияние взаимодействия продуктов сгорания безметалльного твердого топлива с продуктами разложения

Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации и основных научных результатов. Диссертация соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Шайдуллин Руслан Айратович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

24.11.2025

Полянский
Александр Ромилович

«ВЕРНО»

ВЕДУЩИЙ СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ

ЛАПИНА В. В.

ОТДЕЛ ПО ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ

ЕДИНОЙ ПРИЁМНОЙ

У К С А

МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

Адрес электронной почты: korolev100-rd@mail.ru

Сотрудник ознакомлен 09.12.2025г. Александр Ф. Маргулов П.А.