

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Шайдуллина Руслана Айратовича «ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ БЕЗМЕТАЛЬНОГО 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

Диссертационная работа посвящена изучению влияния взаимодействия продуктов сгорания (ПС) твердого топлива (ТТ) с продуктами термического разложения (ПР) теплозащитных покрытий (ТЗП) в камере сгорания (КС) и сопловом блоке на энергетические характеристики двигателя. Физико-химические процессы взаимодействия ПС ТТ с ПР ТЗП приводят к изменению кинетической энергии струи, которое зависит от газодинамического фактора, включающего изменение "живого" сечения и неравномерность параметров в радиальном сечении, в первую очередь вблизи стенки, и химического фактора, учитывающего химическое взаимодействие ПР ТЗП и ПС ТТ. При определении тяги эти факторы учитываются различными коэффициентами: коэффициент расхода μ_c , потери из-за рассеивания $\xi_{рас}$ и трения $\xi_{тр}$, из-за химической неравновесности $\xi_{хн}$ и др. Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию процессов в КС и соплах ракетных двигателей (В.Е. Алемасов, Б.Т. Ерохин, Ю.М. Милехин, А.А. Шишков, У.Г. Пирумов, А.М. Липанов и др.) необходимо отметить, что взаимодействие продуктов сгорания топлива и разложения ТЗП в них рассматривалось либо как механическое, либо посредством термодинамического приближения. В связи с этим данная работа, в которой исследовано влияние физико-химического взаимодействия ПС ТТ и ПР ТЗП на энергетические характеристики ракетного двигателя несомненно **актуальна**.

Во введении диссертации обоснована актуальность проблемы, описана степень проработанности направления исследования, определены цели и задачи исследования, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор опубликованных в научно-технической литературы основных кинетических механизмов и подходов к моделированию пламени твердого топлива, продемонстрирован упрощенный подход к описанию теплового баланса между твердой, жидкой и газовой фазами ТТ. Приведены результаты моделирования горения безметалльного ТТ на основе перхлората аммония (АР) и полибутадиенового каучука с гидроксильными концевыми группами (НТРВ) с переменным содержанием АР. Проведена верификация и анализ поведения кинетического механизма в

условиях расширения. Показано, что для более детального анализа проблем, связанных с горением ТТ, необходимо изучение кинетических механизмов для каждого отдельного компонента ТТ.

Во второй главе представлен анализ кинетических механизмов термического разложения АР, как наиболее распространенного окислителя в составе ТТ. Исследовались кинетические механизмы горения АР: механизм Н.Е. Ермолина и О.П. Коробейничева; механизм К.В. Пудупаккама. Механизмы проверялись средствами нестационарного реактора идеального смешения (НРИС) и проточного реактора (PFR) в ПП ANSYS Chemkin-Pro, результаты расчетов по профилям температуры и компонентного состава сравнивались с результатами экспериментов и расчетов Н.Е. Ермолина. Для дальнейших исследований был выбран универсальный механизм К.В. Пудупаккама (613 реакций, 106 веществ) с меньшим отклонением конечной температуры пламени при умеренных давлениях. Для снижения вычислительной сложности механизм К.В. Пудупаккама был сокращен до 128 реакций и 27 веществ, при этом среднеквадратичное отклонение не превышало 1,5 % от первоначального механизма.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния взаимодействия ПС безметального ТТ (АР/НТРВ) с газофазными продуктами разложения ТЗП на основе фенолформальдегидной смолы (ФФС) в дозвуковом контуре утолщенного сопла на коэффициент расхода и сопла. Для моделирования химической кинетики в данном случае использовался кинетический механизм М.Л. Гросса, содержащий 127 реакций и 38 индивидуальных веществ. Дозвуковой контур утолщенного сопла принимался с переменной геометрией - с соотношением осей эллипса, описывающего контур утолщенной части от 1 до 3, что соответствуют разной площади поверхности дозвукового участка сопла и предопределяет различный подвод газа с поверхности ТЗП. На основе проведенных численных исследований для реальных условий работы РДТТ для утолщенных сопел рекомендованы профили с соотношением осей эллипса между 1 и 2, определяющие коэффициент расхода в диапазоне $\mu_c = 0,99 - 0,983$.

В четвертой главе рассмотрено влияние взаимодействия ПР резиноподобного ТЗП с ПС безметального ТТ (АР/НТРВ 84/16) на коэффициент расхода и сопла гипотетического РДТТ с зарядом, горящим по постоянной торцевой поверхности. Показано, что вдув ПР резиноподобного ТЗП с большим содержанием горючих газов ($g_{CH_4} \approx 0,84$ и $g_{H_2} \approx 0,16$) способствует развитию эндотермических реакций в приповерхностной зоне и снижению температуры смеси в ней. Существенный подвод газифицированных продуктов разложения ТЗП способствует определению коэффициента расхода $\mu_c \approx 1$ даже при уменьшении температуры торможения на 350 К. При дополнительном подводе нереагирующих твердотельных частиц (сажи), вылетающих с поверхности ТЗП, коэффициент расхода увеличивается почти линейно увеличению массы вдува.

В пятой главе исследовалось общее влияние взаимодействия ПС безметалльного ТТ с ПР ТЗП на коэффициент удельного импульса, определяющий потери пустотной тяги РДТТ. На основе проведенных численных исследований для реальных условий работы РДТТ для утопленных сопел рекомендованы профили определяющие потери удельного импульса не более 0,1% для соотношения осей эллипса равного 1 и не более 0,25% для соотношения равного 2. Показано, что в зависимости от применяемого ТТ и состава ПР ТЗП, а также потенциала термохимического взаимодействия ПС ТТ и ПР ТЗП, влияние на коэффициенты потерь и, соответственно, тяги может быть совершенно разным. При этом данные, полученные при газодинамическом моделировании реагирующей среды, отличаются по потерям удельного импульса от термодинамического подхода в зависимости от интенсивности вдува не более чем на 5 % для рассмотренных составов на основе АР/НТРВ.

Научная новизна представленного исследования заключается в том, что получен редуцированный кинетический механизм термического разложения перхлората аммония (ПХА, АР); определены границы изменения коэффициентов сопла и расхода в широком диапазоне интенсивности вдува газов пиролиза ТЗП в КС и с дозвукового участка сопла; определены границы изменения коэффициента удельного импульса при абляции ТЗП в объемах КС и дозвукового участка сопла; определены оптимальные формообразующие параметры дозвукового контура сопла при абляции ТЗП с дозвукового участка утопленного сопла, показано, что соотношение осей эллипса, описывающего контур утопленной части должно находиться в диапазоне от 1 до 2.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов обеспечивается тем, что результаты, полученные с помощью кинетических механизмов для термического разложения ПХА и горения смеси АР/НТРВ, верифицировались с данными экспериментов, расчетными результатами других авторов и сравнивались с результатами равновесной термодинамики. Использовались отработанные методики и алгоритмы расчетов для определения коэффициентов расхода и сопла РДТТ.

Практическая значимость работы заключается

Получены рекомендации по моделированию процесса горения безметалльного ТТ на основе перхлората аммония и полибутадиенового каучука с гидроксильными концевыми группами. Определены диапазоны изменения коэффициентов расхода и сопла при абляции ТЗП в КС и в дозвуковом участке сопла с переменной интенсивностью газификации продуктов разложения ТЗП. Полученные рекомендации и результаты могут быть использованы при проектировании и экспериментальной отработке РДТТ для более точного прогнозирования энергетических и тяговых характеристик.

Результаты исследований в диссертации и автореферате изложены грамотным научно-техническим языком. Работа содержит четкие выводы. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации.

Содержание диссертации достаточно полно отражено в публикациях, в том числе в 5 статьях в изданиях, рекомендуемых ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций, а также в 1 статье в журнале, индексируемом в базе Scopus.

К диссертационной работе и автореферату имеются следующие **замечания**:

1. На рис.1.2 диссертации и рис.2 автореферата термин "конечная температура пламени" требует пояснения: с термодинамическим равновесием все понятно, а вот с химической кинетикой - где эта точка?

2. На рис.2.4 приведены какие-то профили, достаточно хорошо совпадающие с экспериментальными (рис.2.3), но не указано по какому механизму. Кроме того, про рис.2.3 в абзаце написано "расчетные значения [26]", а в подрисуночной — экспериментальные? Там вообще-то есть статья Ермолина и Коробейничева, но она [24].

3. Формула 3.4, стр.49: " ϵ_r , ϵ_w – эффективная степень черноты газа и материала стенки". Значения принятые для расчетов не указаны. Хотелось бы узнать принятое значение, особенно для газа, и проводилась ли оценка, как она влияет на значение радиационного теплового потока?

4. Стр.75: в связи с чем для определения конвективного теплового потока в данном случае использовалось другое критериальное уравнение по сравнению с Главой 3?

5. Вывод 6: "...Если посредством термодинамического расчета определено существенное изменение температуры и свойств смеси, то неучет химических реакций взаимодействия ПС ТТ с продуктами разложения ТЗП может повлечь неточность определения удельного импульса.." "Существенное" - это сколько?

6. Ни в автореферате, ни в диссертации ни разу не записана система уравнений движения газа и не приведено описание используемой модели турбулентности. При этом в автореферате отмечается, что первой главе диссертации "продемонстрирована осесимметричная математическая модель, позволяющая описывать горение ТТ и взаимодействие ПС с ПР ТЗП в составе гипотетического РДТТ".

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертация Шайдуллина Р.А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложено решение важной научной задачи определения диапазонов изменения коэффициентов расхода, сопла и удельного импульса при физико-химическом взаимодействии продуктов сгорания безметалльного твердого топлива и продуктов термического разложения теплозащитных покрытий, что имеет важное

значение для проектирования и экспериментальной отработки РДТТ. Работа соответствует п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация «ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ БЕЗМЕТАЛЬНОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ПРОДУКТАМИ РАЗЛОЖЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РДТТ» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Шайдуллин Руслан Айратович заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 — Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Доктор технических наук по специальности 05.07.05 — Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории Физико-химической механики УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, ул.Т.Барамзиной, 34, тел. (3412) 508200, факс (3412) 507959, E-mail: kma@udman.ru

04.12.25

Корепанов Михаил Александрович

Подпись М.А.Корепанова заверяю

Директор
УдмФИЦ УрО РАН, д.ф.-м.н.



М.Ю.Альес

С аттестацией согласован 09.12.25, Шайдуллин Р.А.