

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук
Харченко Николая Анатольевича на диссертацию

Цырендоржиева Эрдэни Сергеевича
«Моделирование рабочих процессов в камере сгорания
термокаталитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги»,

представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности

1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы исследования. Диссертационная работы Цырендоржиева Э.С. посвящена вопросам фильтрационного горения и процессам в камере сгорания термокаталитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги.

На современном этапе развития ракетно-космической отрасли наблюдается устойчивый интерес к применению двигательных установок малой тяги, использующих для создания рабочего тела явление фильтрационного горения. Это обусловлено целым рядом факторов, ключевыми из которых являются: конструкционная простота, отсутствие необходимости в создании сложной системы зажигания, а также высокая эффективность и надежность двигательных установок данного типа.

Наибольшее практическое применение на сегодняшний день получили термокаталитические двигатели, использующие в качестве монотоплива гидразин – высокоэнергетическое и достаточно хорошо изученное соединение. Одновременно с этим идет активное развитие экологически безопасной альтернативы, именуемой «зелеными» топливами: перекись водорода, ADN-смеси, HAN-смеси, а также гипергольные ионные жидкости. Эти компоненты обладают менее выраженной токсичностью или вовсе же безвредны для окружающей среды, и как следствие являются наиболее привлекательными для перспективных миссий ввиду сниженных требований по эксплуатации, как на этапах наземной экспериментальной отработки изделия, так и в летных условиях.

На этом фоне исключительно важной становится задача построения универсальной и физически обоснованной вычислительной модели термокаталитического жидкостного ракетного двигателя и непосредственно физико-математической модели фильтрационного горения, способной учитывать особенности разложения различных топливных составов в пористых катализаторах, имеющих различную конфигурацию формы

каталитического пакета и пористости. Такие модели позволяют проводить численные эксперименты с высокой степенью достоверности, исследовать влияние изменения расхода топлива, геометрии камеры, структуры катализатора и начальных условий на определяемые тепловые и газодинамические характеристики, а также оптимизировать конструкцию двигательных установок на ранних этапах проектирования.

Особый интерес представляют процессы, протекающие в камере сгорания в условиях нестационарных и импульсных режимов подачи топлива. Они традиционно считаются трудно анализируемыми в рамках экспериментальных исследований.

К тому же, разработанная модель может быть использована для построения обобщённых инженерных зависимостей, пригодных для применения в расчетах на этапах предварительного проектирования. Например, с помощью такой модели возможно построение карты устойчивых положений фронта в пространстве таких параметров как пористость засыпки, скорость подачи топлива в камеру сгорания и начальная температура пористой засыпки. Применение карты устойчивых положений фронта при проектировании двигателя позволяет определять критические значения рабочих параметров и формировать рекомендации по выбору режимов работы, обеспечивающих необходимую степень надежности и эффективности двигателя при различных условиях эксплуатации.

Научная новизна работы. В работе соискателя получены фазовые портреты фронта максимальной температуры в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги для различных условия работы двигателя. Сформированы карты финальных положений фронта в зависимости от числа Рейнольдса и начальной температуры каталитического пакета. Получены аппроксимирующие зависимости, описывающие связь между параметрами работы двигателя, такими как массовый расход, циклограмма подачи топлива, начальная температура каталитического пакета, а также конструктивными характеристиками и финальным положением фронта. Предложена комплексная методика численного моделирования теплового состояния термokatалитического ЖРДМТ.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью применения представленных результатов при создании тепловых и динамических моделей двигательных установок, оценки надежности катализатора, подбора параметров каталитических пакетов, а также прогнозирования поведения фронта разложения топлива в условиях варьирования режимов работы двигателя. Всё это, в свою очередь, позволит

повысить уровень надежности и оптимизировать разрабатываемые изделия, снизить объем натурных испытаний и ускорить цикл разработки перспективных систем.

Достоверность и обоснованность применяемых математических моделей обусловлена использованием фундаментальных принципов математического моделирования механики сплошной среды.

Верификация и тестирование методики предполагают подтверждение достоверности полученных результатов численного моделирования путем сравнения их с экспериментальными данными.

Обоснованность результатов подтверждается непротиворечивым характером полученных результатов решения с численными результатами других авторов.

Содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, содержит – 118 машинописных листов, включающих 34 рисунка, 4 таблицы и список используемой литературы из 110 наименований.

Во введении обосновывается актуальность исследуемых в работе процессов. Приводятся данные о создании новых изделий ракетно-космической техники, в которых планируется использовать явление фильтрационного горения. Дается описание характерных проблем для термokatалитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги. Излагаются цели и задачи диссертационной работы, обосновывается ее научная новизна и практическая ценность.

В первой главе приводится литературный обзор по исследованиям фильтрационного горения. Приводятся работы по экспериментальному изучению явления, также приводятся публикации, описывающие физико-математические модели фильтрационного горения в различных постановках.

Вторая глава посвящена постановке, решаемой в диссертационной работе задачи фильтрационного горения в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги. Изложена физико-математическая модель процессов тепломассопереноса между каталитическим пакетом и межпоровым пространством. Приведено описание численных методов для расчета тепломассообмена.

В третьей главе приведены результаты компьютерного моделирования тепломассообмена в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги. Материал изложен в виде параметрического исследования процессов. Представлено влияние диффузионных и химических процессов на внутрибаллистические параметры двигателя. Представлена методика анализа влияния различных рабочих параметров

двигателя на характеристики фильтрационного горения, в рамках диссертационной работы – скорости и положения фронта. В рамках параметрического исследования первым рассматривается влияние скорости подачи топлива в камеру сгорания и начальная температура засыпки. Построена карта финального положения фронта от безразмерных параметров, описывающих скорость подачи и начальную температуру каталитического пакета. Данные карты обобщены в виде критериальной зависимости от тех же параметров, проведен анализ влияния параметров на положение фронта. Для исследования влияния пористости на положение фронта фильтрационного горения продемонстрированы карты разностей положений фронта, выявлены нелинейные эффекты. На основании карты положений фронта построены карты безопасных режимов. Далее в работе рассматривается влияние частоты подачи топлива в камеру сгорания на положение фронта, показано, что положение фронта разложения при высоких частотах подачи нечувствительно к изменению частоты подачи. Данные обобщены в виде критериальной зависимости. В третьем разделе проводится анализ влияния скорости подачи топлива, циклограммы подачи, начальной температуры каталитического пакета на тепловое состояние пористой засыпки.

В четвертой главе выполнено численное исследование теплового состояния термокаталитического ЖРД малой тяги на основе 3D-модели конструкции с учётом сопряжённого теплообмена твёрдых элементов, фильтрационного горения и теплообмена в трубопроводах и сопле. Геометрия и расчётная сетка сформированы в «ЛОГОС-Тепло», расчёт теплопроводности реализован методом конечных объёмов, а течения в трубопроводах заменены квазиодномерной кондуктивно-конвективной моделью с неявной схемой и аппроксимацией Самарского.

В Заключение работы Цырендоржиева Э.С. сформулированы наиболее важные результаты и выводы по диссертации.

Аннотация и публикации автора полностью отражают содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе. По диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Несмотря на широкое использование численного моделирования, экспериментальная часть работы сведена к валидации по литературным данным. Отсутствие собственных экспериментальных исследований снижает степень подтверждения достоверности полученных результатов диссертационной работы.

2. В обзоре подробно описано влияние излучения, но в представленной модели данной работы переизлучение в пористой среде и лучистый теплообмен между частицами фактически не реализованы.

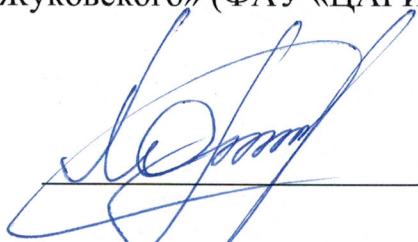
3. Представленная физико-математическая модель при переходе к другим топливным составам и альтернативным «зелёным» топливам требует дополнительной калибровки параметров и констант реакций, получение которых требует проведения существенной экспериментальной работы.

4. Работа содержит несогласованности в нумерации рисунков и таблиц, а также местами громоздкие формулировки, затрудняющие восприятие материала. Некоторые библиографические ссылки неполные, в частности на зарубежные литературные источники.

Сделанные замечания не уменьшают общую ценность диссертационной работы. Представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Цырендоржиев Э.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории №1 научно-исследовательского центра №43 федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»)



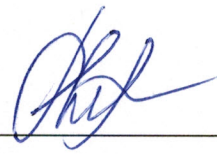
Харченко Николай Анатольевич

Подпись Харченко Николая Анатольевича заверяю

04.12.2025г.



Начальник управления персоналом



Власова О.А.

Адрес: 140180, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1
e-mail: kharchenko.na@phystech.edu