

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Цырендоржиева Эрдэни Сергеевича «Моделирование рабочих процессов в камере сгорания термokatалитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги», представляемую на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. - «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Цырендоржиева Э.С. посвящена разработке методов моделирования физических процессов в камере сгорания термokatалитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги. Экспериментальное исследование данных процессов в камере сгорания осложняется дороговизной опытов и трудностью соблюдения условий подобия. Развитие методов математического моделирования крайне важно для оптимизации и удешевления отработки перспективных изделий ракетно-космической техники.

Методы математического моделирования фильтрационного горения жидкого топлива достаточно освещены в литературе. В работе соискателя основной упор делается на проведение параметрического исследования, направленного на формирование критериальных зависимостей, описывающих характеристики процесса от параметров работы ракетного двигателя. Необходимо отметить, что фильтрационное горение в большинстве работ рассматривается в энтальпийной одномерной постановке. Поэтому диссертация Цырендоржиева Э.С. является актуальной работой также и с точки зрения прояснения процессов фильтрационного горения.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 118 машинописных листов, включающих 34 рисунка, 4 таблиц и список литературы на 110 наименований.

Во введении диссертации обоснована актуальность исследований, направленных на использование явления фильтрационного горения для создания тяги в термokatалитических жидкостных ракетных двигателях малой тяги, применяемых для коррекции орбит и ориентации космических аппаратов. Изложены цели и задачи работы, поставленные на основе обзора литературы, приведенного в Главе 1, показаны научная новизна и практическая значимость результатов, полученных в данной работе.

В первой главе приведен обзор литературы по существующим экспериментальным и численным исследованиям фильтрационного горения, методам математического моделирования фильтрационного горения, исследованиям процесса фильтрационного горения, численным алгоритмам для расчета течений и теплообмена при разложении топлива в пористых средах.

Во второй главе представлена постановка рассматриваемой в работе задачи о фильтрационном горении в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги, описанию физико-математической модели и численных методов для решения полученных систем дифференциальных уравнений. Модель фильтрационного горения рассматривалась как совокупность нескольких процессов, в так называемом репрезентативном элементарном объеме, представляющем из себя метод усреднения по объему, в который входят: твёрдая фаза, межпоровый газ и поверхностный газ.

В третьей главе представлены результаты исследования фильтрационного горения. В первом разделе представлена постановка численного эксперимента и схема проведения численных экспериментов. Рассматривается осесимметричная задача о нестационарном фильтрационном горении жидкого монотоплива в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги с адиабатическими стенками. Во втором разделе представлено параметрическое исследование влияния различных параметров, характеризующих режим работы двигателя, на положение фронта максимальной температуры и тепловое состояние каталитического пакета. В качестве варьируемых параметров был выбран следующий набор: начальная температура каталитического пакета, скорость подачи топлива в камеру сгорания, пористость каталитического пакета и циклограмма подачи топлива в камеру сгорания, данные параметры были обезразмерены для повышения наглядности и удобства интерпретации результатов численных экспериментов. Перед проведением параметрического исследования представлена методика анализа динамика фронта. Для получения более информации и определения устойчивых и неустойчивых режимов фильтрационного горения эффективно применение метода построения фазовых портретов. Фазовый портрет представляет собой графическое изображение динамики системы в пространстве «положение фронта – скорость изменения его положения». При такой визуализации стационарные состояния и их устойчивость проявляются через наличие аттракторов – областей, к которым стремятся траектории системы при малых отклонения начальных условий. Пример фазового портрета, полученного в ходе численного эксперимента представлен на рисунке 3.10. Результаты численных экспериментов обобщены в виде критериальных зависимостей и карт финальных положений фронта. Проведен анализ влияния варьируемых параметров на тепловое состояние каталитического пакета.

В четвертой главе выполнено численное исследование теплового состояния термokatалитического 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», расчёт теплопроводности реализован методом конечных объёмов, а течения в

трубопроводах заменены квазиодномерной кондуктивно-конвективной моделью с неявной схемой и аппроксимацией Самарского.

В **Заключении** сформулированы наиболее важные результаты работы.

В работе описана физико-математическая модель и метод моделирования процессов фильтрационного горения в камерах сгорания термokatалитических ЖРД с учётом неоднородности пористости засыпки. Проведена валидация решателя, включающая в себя сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными для различных циклограмм подачи топлива в камеру сгорания. Выполнены параметрические исследования влияния начальной температуры каталитической засыпки, пористости и скорости подачи топлива на устойчивость фронта разложения монотоплива. Получены карты финальных положений фронта разложения, позволяющие сформулировать практические рекомендации по выбору рабочих режимов термokatалитических ЖРДМТ. Предложена методика анализа устойчивости фронта разложения с использованием фазовых портретов. Показано существование области значений, в рамках которой финальное положение фронта находится в зоне каталитического пакета. Разработана и валидирована на результатах огневых стендовых испытаний компьютерная модель термokatалитического ЖРДМТ, позволяющая проводить численное исследование процессов теплообмена в камере сгорания и оптимизировать ее конструктивные параметры.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью применения результатов моделирования для создания 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. Это в свою очередь позволит повысить уровень надежности и оптимизировать разрабатываемые изделия, снизить объем натурных испытаний и ускорить цикл разработки новых систем.

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

К работе имеются следующие замечания:

1. В актуальности темы обзор технических особенностей жидкостных ракетных двигателей сделан неплохо, а вот обзор и степень внедрения математического моделирования, как и обзор работ других исследователей в данной тематики практически отсутствует. В первой главе дан некий обзор, но его следовало бы перенести в часть «Актуальность...»
2. В диссертации написано, что *«разработана методика компьютерного моделирования термokatалитического ЖРДМТ как на базе платформы OpenFOAM [110], так и в пакете программ ЛОГОС [9]»* - однако,

информация о внедрении методики в пакет программ ЛОГОС отсутствует (в четвертой главе приведены общие слова).

3. В целом не понятно разделение физико-математической модели на «межпоровый» и «поверхностный» газ. Система уравнений (1)-(4) при должной формулировке граничных условий на поверхности пор способна описать всю газодинамику в межпоровом пространстве, включая механизмы реакций в около поровом пространстве. В диссертации явно не представлено описание взаимодействия\связи (замыкание систем при протекании реакций) между системами (1)-(4) и (5)-(6), что делает сложным адекватную оценку существенного усложнения базовой модели путем введения дополнительных уравнений для некоего «поверхностного» газа.
4. Для оценки численной методики необходимо все же проводить решение валидационной задачи на сходимость. Рисунок 2.7 показывает различие в ~15-17% при сошедшемся решении. Различие существенное.
5. На рисунке 2.9 амплитуда колебаний также существенно различается в сравниваемых подходах. С чем это связано? Тоже рисунок 2.11, при этом различие 17% описывается как норма. Все же это большое различие. С чем оно связано?
6. При применении разработанной технологии для решения промышленно-ориентированных задач необходимо привести данные о размерностях моделей и временах расчета (процессорного времени), для понимания возможности массового внедрения.
7. Существенное замечание к списку литературы – к источникам так относится нельзя – где опубликованы некоторые работы просто не написано, например – 4, 18, 23, 32, 38, 39, 66, 68, 77, 79, 80, 81, 89, 94, 103, 106, 109.
8. Есть опечатки – «Такие модели позволят проводить...; Пористая засыпки изотропная ...; ... », есть жаргонизмы – «стационарностью «поля» пористости».

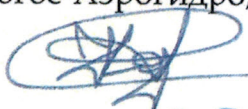
Рассматриваемый в диссертации процесс – очень сложен как для описания с помощью физико-математической модели, так и для моделирования, тем более в трехмерной постановке. Для уровня «кандидатской» диссертации, соискателем был проведен весьма и весьма глубокий анализ протекающего процесса в рассматриваемом устройстве. На достаточном уровне проанализировано влияние параметров работы устройства и его конструкции на тепловое состояние каталитического пакета, получены необходимые аппроксимирующие зависимости и фазовые портреты. И в целом, на хорошем уровне представлено описание «механики» протекающих физических процессов и, также, хорошо интерпретированы полученные результаты математического моделирования. За это отдельный плюс диссертанту.

Диссертация Цырендоржиева Э.С. несомненно, имеет важное научное и прикладное значение и ее можно квалифицировать как законченное актуальное исследование. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Приведенные результаты можно классифицировать как новые, обоснованные и имеющие практическую и научную значимость для создания перспективных устройств, работающих в условиях космического пространства.

Название отвечает существу работы. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что работа Цырендоржиева Э.С. соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а диссертант заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - «Механика жидкости, газа и плазмы».

Начальник научно-исследовательского отдела –
главный конструктор по программе Логос-Аэрогидро,
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ИТМФ,
доктор физико-математических наук


09.12.25

А.С. Козелков

Подпись А.С. Козелкова заверяю,
учёный секретарь ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ»,
кандидат физико-математических наук



А.О. Бликов

Сведения об организации: Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Федеральное государственное унитарное предприятие РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»); 607188, Нижегородская обл. г.Саров, пр. Мира, д.37, Телетайп 151535 «Мимоза» Факс 83130 29494, E-mail: staff@vniief.ru.

Смотреть документ 10.12.2025 / Э.С. Цырендоржиев