

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Пятницкого Льва Николаевича на диссертационную работу Назыровой Рузалии Равильевны “Термодинамический расчет параметров продуктов сгорания в камере жидкостного ракетного двигателя на основе вариационных принципов механики”, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность диссертационной работы

Одним из основных показателей эффективности жидкостного ракетного двигателя является удельный импульс тяги. Он зависит от характеристик топлива и камеры сгорания, в сопле которого продукты горения ускоряются до сверхзвуковых скоростей. Процессы в камере ЖРД исключительно сложны. Определение параметров течения горячих газов в сопле камеры обычно выполняется в два этапа. Вначале вычисляются параметры идеального импульса в предположении одномерного, стационарного, адиабатического течения равновесной смеси реагирующих веществ. Затем эти параметры уточняются путем вычисления поправочных коэффициентов для компенсации отклонений от идеального варианта, связанных с химической неравновесностью, неравновесной конденсацией, потерей тепла и другими, зависящих от деталей организации процесса.

Прогноз траектории ракеты предъявляет высочайшие требования к точности и надежности данных об удельном импульсе. Удовлетворение этим требованиям лежит на пути разработки модели расчета адекватной реальным процессам в камере. Между тем, расчет идеального удельного импульса для течения многокомпонентных продуктов реакции представляет сложную задачу. К тому же, многочисленные варианты решения, обусловленные поиском видов топлива и деталей конструкции и, требуют большой скорости решения каждого варианта.

Цель диссертационной работы заключается в исследовании характеристик многокомпонентных рабочих тел для различных моделей описания процесса течения в сопле ЖРД, и разработке на этой основе надежной, скоростной программы, решение которой точно соответствует исходной постановке задачи. Результаты работы имеют значение для повышения конкурентоспособности на рынке космических услуг. Актуальность тематики не вызывает сомнений. Предмет исследований, а также содержание и основные полученные результаты диссертации соответствуют паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 283 страницы, включая 190 рисунков, 33 таблицы и список литературы из 177 наименований на 18 страницах.

Введение содержит описание методов оптимизации основных параметров камеры сгорания ЖРД для получения максимального удельного импульса. обзор литературы, включая данные по истории развития взаимосвязи термодинамики с механикой и математикой, и обоснование необходимости введения вариационных математических моделей.

В первой главе формулируются классические и вариационные математические модели одномерного стационарного течения продуктов сгорания топлив, начиная с модели определения точки на входе в сопло, для которой процесс горения считается завершенным. Модели строятся с учетом уравнения состояния идеального или реального газа. Учет уравнения состояния реального газа, включающего силы межмолекулярного взаимодействия, определило модификацию модели течения продуктов сгорания. При этом показано, что известные постановки задач представляются частным случаем вариационной модели, получаемой применением технологии осреднения интегралов. Формулируются условия разрешимости задач и критерии сходимости решения. Модели содержат конкретные линейные и нелинейные задачи, решение которых дает ответ на многочисленные вопросы, в совокупности составляющие концепцию предлагаемой методики расчета параметров продуктов горения в камере ЖРД.

Вторая глава посвящена описанию принятых методов расчетов и обоснованию их эффективности: Задачи, составляющие основу расчета, решаются с привлечением ряда математических методов, например, метода неопределенных множителей Лагранжа для поиска экстремума многомерной функции, метода Ньютона решения системы нелинейных уравнений, метода условного градиента поиска минимума выпуклой функции, симплекс-метода вычисления линейной формы, метода Зайделя решения системы нелинейных уравнений, метода золотого сечения, поиска минимума одномерной выпуклой функции. Результаты этой части работы представлены множеством формул, рисунков, таблицами и отчетами по результатам исследований.

Третья глава содержит результаты термодинамических расчетов параметров течения продуктов горения в камере ЖРД с помощью компьютерных программ, созданных на основе разработанных моделей. Полученные данные использовались

для оценки поправочных коэффициентов, указывающих на отклонение идеального варианта от реального процесса. Рассмотрены примеры расчета параметров течения для нескольких рабочих сред: (водород с кислородом, метан с кислородом, несимметричный диметилгидразин с кислородом, несимметричный диметилгидразин с тетраоксидом азота, этиловый спирт с кислородом, и другие). Для всех параметров и условий поправка не превышала 0.4—0.9%, что означает существенный прогресс. Оценка скорости расчета оказалась на порядок выше скорости других моделей.

В заключении подводятся итоги исследований, отмечаются впервые сформулированные положения, наличие свидетельств государственной регистрации компьютерных программ и внедрение результатов исследований в практику ведущих предприятий ракетно-космической отрасли.

Достоверность результатов исследований

Критический анализ теоретических основ и методов исследования, сопоставление результатов применения созданных программ с имеющимися в литературе данными, включая данные банка ИВТАНТЕРМО, позволяют рассматривать результаты работы вполне достоверными.

Научная новизна исследований

- Впервые применены математические методы расчета термодинамических и теплофизических свойств многокомпонентных равновесно реагирующих смесей веществ, обеспечивающие решение экстремальных задач на основе вариационных принципов механики с существенно более высокими скоростями вычислений и надежностью их результатов.
- Впервые наиболее общими моделями описания равновесных состояний и процессов течения в сопле камеры ЖРД признаны вариационные модели, тогда как модели классические рассматриваются как их частные представления.
- Впервые сформулированы обоснованные критерии разрешимости задач математических моделей реагирующих многокомпонентных смесей в сопле ЖРД, и получены соотношения для оценки сходимости решения .

Практическая значимость

Разработанные методы расчета параметров продуктов сгорания в камере ЖРД:

- получили 6 Свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ;

- применены при выполнении контрактов в рамках Федеральных космических программ РФ, и интегрированы в программные комплексы Отраслевой методики определения удельного импульса тяги ЖРД,.
- внедрены в практику работы предприятий ракетно-космической отрасли, в частности, в практику решения задач расчета удельного импульса тяги камеры ЖРД с целью профилирования и оптимизации сопла с последующим созданием соответствующих отраслевых материалов по энергетическим характеристикам ЖРД;

Апробация и публикации результатов

Пункты практической значимости фактически означают высокую степень апробации. Результаты работы опубликованы в полном объеме более, чем в 80 статьях, включая журналы из списка ВАК, в докладах и монографиях. Работа прошла широкую апробацию на 31 семинарах и конференциях республиканского, российского и международного уровней.

Замечания

Серьезных замечаний у меня нет. Работа оформлена аккуратно, но объем её, мне представляется, можно было бы уменьшить, а из списка литературы удалить учебники, например, Г.М. Фихтенгольц “Курс дифференциального и интегрального исчисления” (пп. 146 и 147; С.М. Никольский “Курс математического анализа” (п.112)..

Заключение

Впервые имя Р.Р. Назыровой появилось в научной литературе в 1984 и 1986 годах. Затем оно стало появляться регулярно, и в итоге превысило цифру 80. Результатом этих трудов явилась обсуждаемая диссертация. Процессы в камере горения ЖРД исключительно сложны. В зоне горения и дозвуковой части сопла может возникать не полной завершенностью химических реакций, с охлаждаемыми стенками и турбулентностью течения, а какова природа турбулентности мы не знаем. В свехзвуковой части сопла ответа ждут вопросы, что такое пограничный слой и как объяснить возникновение мелкой сетки скачков давления на её поверхности. Поэтому роль идеального варианта приобретает большое значение.

Диссертационная работа Назыровой Р.Р. на тему “Термодинамический расчет параметров продуктов сгорания в камере жидкостного ракетного двигателя на основе вариационных принципов механики” представляет законченную научно-

квалификационную работу, которая вносит существенный вклад в область механики жидкости и газа и полностью соответствует требованиям пунктов 9-14 “Положения о порядке присуждения ученых степеней” (постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, ред. от 28.08.2017).

Автор диссертационной работы Назырова Рузалия Равильевна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Главный научный сотрудник-советник,
ФГБУН “Объединенный институт высоких температур РАН”, доктор физико-математических наук, профессор

E-mail: pyat7@mail.ru



Подпись Пятницкого Л.Н. удостоверяю
Ученый секретарь ОИВТ,
доктор физико-математических наук

Амиров Р.Х.

Полное наименование организации: Федеральное государственное учреждение науки “Объединенный институт высоких температур Российской академии наук” (ОИВТ РАН)

Почтовый адрес: 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, строение 2

Телефон: +7(495)485 83 45

Официальный сайт: <http://www.jiht.ru>

Электронная почта: amirovravil@yandex.ru