

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, доцента Бабакова Александра Владимировича 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.** Перспективность использования жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) определяет актуальность разработки надежных, точных и скоростных программных средств для прогнозирования и исследования параметров двигателей. Основу проектирования и численного анализа эффективности функционирования двигателей образуют, в частности, программы исследования физико-химических процессов.

Целью диссертации является разработка IT-технологии расчета и исследования параметров одномерного, стационарного, адиабатного течения многокомпонентных смесей веществ в сопле ЖРД, описываемых равновесными химическими реакциями и удовлетворяющих уравнению состояния идеального или реального газа. Десятилетия разработки программных средств решения задачи определили формальные постановки. Известны целые школы создания программных средств, в частности, школы Алемасова В.Е., Г.Б.Синярева, Б.Г. Трусова, А.Н. Горбань, Б.М. Кагановича, С.П. Филиппова. Несмотря на это, для задачи расчета равновесного состава многокомпонентной смеси веществ в сопле камеры ЖРД характерны изначальные неопределенности, например математической разрешимости, результирующего состава конденсированных веществ, удовлетворяющего правилу фаз Дж.В. Гиббса, типа функции поиска экстремума и исходной терминологии неизвестных для описания состава веществ.

В связи с этим актуальной задачей является формулирование математических моделей термодинамики на основе учета ее взаимосвязи с механикой, а также исследование их свойств и разработка IT-технологий с повышенными характеристиками надежности, точности и скорости, а также исследование характеристик процесса течения в сопле камеры ЖРД для различных уравнений состояния газа, параметров сопла и топливных композиций.

Тематическая направленность работы, ее содержание и основные полученные результаты соответствуют паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

**Структура и содержание диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы 283 страниц, 190 рисунков на страницах и по тексту, 33 таблиц по тексту, список литературы на 18 страницах, включающий 177 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследования, указана степень разработанности темы исследований, определены цели и сформулированы задачи исследования, описаны новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, и степень достоверности результатов исследований.

В главе первой формулируются математические модели процесса горения и течения смеси веществ в камере ЖРД, вводится структуризация моделей на вариационные и классические. При этом постулируются утверждения о том, что каждая из классических задач может быть при введении некоторых условий определена как задача выпуклого или линейного программирования. Представляются результаты анализа разрешимости задач, взаимосвязи вариационной и классической моделей, обосновывается сходимостью конструируемых последовательностей для любой классической экстремальной задачи. В главе представлено достаточно количество результатов расчетов, обосновывающих выводы, и иллюстрирующих их рисунков.

Вторая глава посвящена описанию применяемых математических методов решения классических задач и задач на основе вариационных принципов механики. Обосновывается эффективность их использования. При этом формулируются наиболее рациональные технологии решения нелинейных систем уравнений, выводятся критерии достижимости достаточно малой окрестности решения, исследуются возможности по получению новых оригинальных формальных соотношений, не указанных в постановке задачи. Показывается, что решение вариационных задач поиска миноранты реализуемо методами аналитической геометрии и выпуклого или линейного программирования. Глава содержит числовые данные по итерационным вычислениям, подтверждающие эффективность предлагаемых методов, в частности возросшие скорости вычислений.

Третья глава содержит результаты термодинамических расчетов параметров сопла камеры ЖРД на основе применения разработанных программных средств. При этом демонстрируется непрерывность и дифференцируемость функций, формулируется возможность рассмотрения семейства функций для удельного импульса как пучка кривых varia-

ционного исчисления, представляются результаты исследования параметров топливных композиций при учете уравнения состояния реального газа.

В заключении формулируется утверждение о создании базиса для перехода на функциональный уровень термо-газодинамических исследований процессов течения реагирующей смеси.

**Достоверность результатов исследований.** Методологическую основу исследований составляет междисциплинарный поиск решения задач термодинамического расчета параметров течения в сопле камеры ЖРД на основе применения систем знаний теории ракетных двигателей, термодинамики (классической, химической, технической), механики жидкости и газа, математического и функционального анализа, теории выпуклого и невыпуклого программирования, теории вариационного исчисления. Для аналитических, численных и информационных исследований применены методы математического моделирования, математического и функционального анализа, численные методы решения экстремальных задач и систем линейных и нелинейных уравнений, методы конструирования объектно-ориентированных программных компонентов. Выбранная методология исследований определила высокую степень обоснованности сформулированных научных положений. Применение актуального банка данных ИВТАНТЕРМО и корректное формулирование критериев применимости моделей, а также выбор корректных методов решений обеспечили совпадение с приемлемой точностью результатов расчетов с известными справочными и экспериментальными данными.

**Научная новизна исследований.** Получены оригинальные, научно обоснованные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса, а именно:

- 1) фундамент термодинамического расчёта параметров реагирующих смесей веществ, участвующих в процессе течения в сопле камеры ЖРД, составляют вариационные принципы механики, где любому равновесному состоянию соответствует уникальная относительно других состояний функция для поиска экстремума;
- 2) классические математические модели есть частные представления вариационных структур;
- 3) базис термодинамического расчета параметров реагирующих систем веществ, находящихся в любом равновесном состоянии для классической математической модели образует суперпозиция метода условного градиента и метода Лагранжа-Ньютона, обеспечивающих приемлемую надежность и достаточно высокую скорость вычислений, а также адекватность результатов расчетов исходным физико-химическим данным за счет применения оригинальных оценок достижения окрестности решения;

4) фундамент термодинамического расчета параметров реагирующих систем, описываемых вариационными моделями, составляют соотношения аналитической геометрии применительно к поиску миноранты во множестве кривых.

**Практическая значимость.** Разработанные ИТ-технологии применимы в исследовательских и проектных работах на предприятиях и в учебных заведениях ракетно-космической отрасли, что подтверждается:

- получением Свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ и выполнением контрактов в рамках Федеральных космических программ России;
- внедрением программы в практику работы предприятий и учебных заведений ракетно-космической отрасли;
- интеграцией в программные комплексы Отраслевой методики определения удельного импульса тяги ЖРД;
- использованием при расчетах 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.** Результаты работы опубликованы в полном объеме в более чем 80 статьях, включая журналы из списка ВАК, докладах и монографиях. Работа прошла широкую апробацию на 31 семинарах и конференциях республиканского, российского и международного уровней. По теме диссертации получено 6 Свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

#### **Замечания.**

- Работа основана на одномерной адиабатической модели стационарного течения в сопловых конструкциях. Однако, современные вычислительные системы позволяют осуществлять моделирование в более объемной математической модели в трехмерной постановке.
- В работе отсутствует описание конкретного последовательного алгоритма решения задачи, начиная от входного сечения и завершая выходным сечением сопла.
- Работе характерен избыток описаний известных методов (например, метода Зейделя, метода линейного программирования, метод касательных).
- Сформулированная в работе эффективность вариационных математических моделей представляется начальным этапом исследований, то есть окончательный ответ об эффективности новых моделей дадут последующие более объемные исследования, например, для более сложных твердотопливных композиций.
- Работа написана грамотно и по оформлению соответствует требованиям ВАК, в частности все пронумерованные формулы, таблицы и рисунки имеют соответствующие

ссылки. Однако в тексте диссертации имеются погрешности, например, на стр. 142 после формулы (274) представлено определение погрешностей, где знак минус не уместен.

Несмотря на указанные замечания работа представляет научный и практический интерес. В соответствии с рекомендациями автора работа может рассматриваться как начальный этап перехода к исследованиям параметров камеры ЖРД на функциональной основе.

#### **Заключение.**

- Название диссертационной работы соответствует ее содержанию, а материалы и результаты диссертационной работы в полном объеме отражены в публикациях автора. Автореферат соответствует диссертации, достаточно точно отражая все основные положения и полученные результаты.
- 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 термо-газодинамики 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.

Официальный оппонент:



Бабаков Александр Владимирович

доктор физико-математических наук, доцент,  
главный научный сотрудник, заведующий отделом информатизации, математического моделирования и управления, руководитель научного направления, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, (ИАП РАН), E-mail: babakov@icad.org.ru

Подпись Бабакова А.В. удостоверяю  
Заведующий отделом кадров



Турчак Т.В.



Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации проектирования Российской академии наук (ИАП РАН)

Почтовый адрес: 123056, Москва, ул. 2-я Брестская, 19/18

Телефон: +7(499)250-02-62

Официальный сайт: <http://www.icad.org.ru>

Электронная почта: [icad@icad.org.ru](mailto:icad@icad.org.ru)