

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента Шустова Станислава Алексеевича 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. Жидкостные ракетные двигателя (ЖРД) – это фундаментальная основа функционирования ракетно-космических систем. Совершенствование ЖРД, в том числе использование высокоэнергетичных топлив и сопел с большой геометрической степенью расширения, требует повышения эффективности методов проектирования. Основой проектирования ЖРД является термодинамический расчет, к точности, универсальности и экономичности которого предъявляются всё возрастающие требования. Это обуславливает актуальность диссертационной работы Р.Р. Назыровой, цель которой заключается в поиске методов повышения эффективности термодинамического расчет параметров продуктов сгорания в камере ЖРД, исходя из вариационных принципов механики, и обеспечение на этой основе указанных выше требований к термодинамическому расчету.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 177 наименований. Содержит 283 страницы текста, включая 190 рисунков и 33 таблицы. Структура диссертационной работы соответствует решаемым задачам.

Во введении обоснована актуальность исследования, изложен анализ степени разработанности темы, на этой основе сформулированы цель и задачи исследования, обоснованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности полученных результатов и подтверждение их апробацией.

В главе первой на основе использования функционального анализа формулируется математическая модель равновесной термодинамической системы. В этой математической модели состав вещества является точкой замкнутого и ограниченного подпространства многомерного евклидова пространства. При этом состав вещества должен удовлетворять уравнениям сохранения, закона действующих масс и правилу фаз Гиббса (выражения (38), (39), (43)). На этой основе выводятся классические и вариационные математические модели термодинамического расчета для основных вариантов термодинамического расчета: $p_0, H_0 = const; p_0, S_0 = const; p_0, T_0 = const$; где p, H, S, T - соответственно давление, энтальпия, энтропия и абсолютная температура.

Показано, что каждая из классических задач термодинамического расчета камеры ЖРД в их экстремальной формулировке может быть определена с учетом используемых дополнительных условий (постоянство $p_0, H_0; p_0, S_0; p_0, T_0$) как задача выпуклого или линейного программирования. Формулируются условия применимости полученных математических моделей, описывается взаимосвязь вариационной и классической моделей, обосновывается сходимость конструируемых последовательностей точек для любой разрешимой математической модели рассматриваемой термодинамической системы. Получены таблицы конечных разностей, которые являются аналогом известных таблиц П.И. Бриджмена для производных термодинамических функций.

Глава вторая посвящена разработке эффективных численных методов определения параметров термодинамической системы на основе математических моделей, полученных в первой главе. Для определения термодинамических свойств продуктов сгорания в условиях, когда не совпадают температурный интервал $[\underline{T}, \bar{T}]$ существования термодинамической системы в целом и температурный интервал $[\underline{T}, \bar{T}]$, в котором каждое из веществ определено по своим термодинамическим свойствам, введено понятие «условное существование вещества». Изложены результаты разработки численных методов определения термодинамических свойств продуктов сгорания применительно к основным процессам, характерным для камер ЖРД : процесс нагрева до заданных p_0, T_0 ; процесс горения при

заданных p_0, H_0 ; процесс течения до заданного p_a при $S_0 = const$; процесс течения до заданного T_a при $S_0 = const$; процессы течения до заданных M_a, \bar{F}_a при $S_0 = const$. Применительно к этим процессам предложены численные методы расчета на основе использования возможностей вариационного подхода и совместного использования наиболее эффективных методов оптимизации: метода неопределенных множителей Лагранжа, методов Ньютона и условного градиента, симплекс-метода, метода золотого сечения.

В третьей главе изложены результаты численных термодинамических расчетов параметров процесса течения смеси веществ в сопле камеры ЖРД. на основе применения ИТ-технологии, разработанной автором диссертации. Численные расчеты проведены с учетом уравнения состояния как идеального, так и реального газа для продуктов сгорания различных топлив в широком диапазоне значений коэффициента избытка окислителя $\alpha_{ок}$ ($0.1 \leq \alpha_{ок} \leq 5$) и геометрической степени расширения сопла \bar{F}_a (вплоть до $\bar{F}_a = 10^3$). Полученные результаты расчета сравниваются с результатами расчета других авторов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- показано, что фундаментальную основу термодинамического расчёта параметров реагирующих смесей веществ, участвующих в процессе течения в сопле камеры ЖРД, составляют вариационные принципы механики;
- обосновано положение о том, что классические математические модели являются частным представлением вариационной модели; базис решения задач на основе применения вариационной модели составляют элементы аналитической геометрии и утверждения Л. Эйлера по поиску миноранты во множестве кривых;
- установлено, что для каждой классической задачи существует эквивалентное преобразование, позволяющее в новом многомерном выпуклом, полном и компактном пространстве решать задачи линейного и выпуклого программирования;
- обосновано использование суперпозиции методов условного градиента и Лагранжа-Ньютона совместно с выведенными автором критериями сходимости к достаточно малой окрестности решения, а также применением линейной части

энтропии и энтальпии; показано, что такой подход является основой надежной технологии вычислений, обеспечивающей увеличение скорости и повышение точности расчетов при решении задач выпуклого программирования;

- показано, что для любых допустимых значений давлений и температур существуют такие окрестности решения, где состав реагирующей смеси веществ остается постоянным с приемлемой точностью; это позволяет существенно упростить расчет параметров термодинамических систем при фазовых или полиморфных переходах, а также отказаться от организации итерационных процессов, например, при поиске давления при заданных температуре и энтропии, за счет применения оригинальных формул вычислений.

Достоверность результатов исследований обеспечена :

- использованием фундаментальных методов математического и функционального анализа, теории выпуклого и невыпуклого программирования, теории вариационного исчисления; основных положений механики жидкости и газа, термодинамики (классической, химической, технической), теории ракетных двигателей;
- использованием методов вычислительной математики, технологии объектно-ориентированного программирования, актуального банка данных ИВТАНТЕР-МО ;
- сравнением результатов численных расчетов с результатами расчетов других авторов, а также известными справочными и экспериментальными данными, в том числе с данными фундаментального 10-томного справочника «Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания», полученными без привлечения метода «больших молекул»;
- наличием 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, в которых реализованы разработанные Р.Р. Назыровой численные методы термодинамического расчета параметров продуктов сгорания в камере ЖРД
- публикацией основных научных результатов диссертационной работы в более, чем 80 статьях, включая журналы из списка ВАК, докладах и монографиях, а также апробацией этих научных результатов на 31 семинарах и конференциях республиканского, российского и международного уровней.

Замечания:

а) по содержанию диссертационной работы

- в главах 1 и 2 значительное внимание уделено возможностям использования вариационных принципов применительно к повышению эффективности методов термодинамического расчета камер ЖРД, при этом недостаточно внимания уделено собственно описанию методов решения задач при ограниченных возможностях использования метода Ньютона;
- глава 3 содержит интересные и важные данные по оценке влияния учета уравнения состояния реального газа на изменение удельного импульса для ряда топлив, однако отсутствует обобщенный анализ этого влияния в виде значений коэффициентов поправок для групп топливных композиций при различных давлениях и геометрических степенях расширения сопел.

б) по оформлению диссертационной работы и автореферата

- в тексте диссертации отсутствует список сокращений и условных обозначений ;
- в пункте 4 Заключения в тексте диссертации и автореферата имеется расхождение; в диссертации начальная часть этого пункта имеет вид: «Впервые разработаны математические методы расчета термодинамических и теплофизических свойств...», а в автореферате эта фраза имеет вид : «Впервые разработаны математические методы расчета газодинамических, термодинамических и теплофизических свойств...»;
- на рисунке 1 автореферата даны указания на наличие трёх зависимостей, однако на рисунке показаны только две зависимости; на рисунке 3 автореферата из четырех зависимостей показаны только 3.

Указанные замечания не имеют принципиального значения и не снижают высокого научного уровня диссертационной работы Р.Р.Назыровой .

Заключение

- Название диссертационной работы Р.Р. Назыровой соответствует ее содержанию, а материалы и результаты диссертационной работы в полном объеме отражены в публикациях автора. Автореферат соответствует диссертации, отражая в

табличной и иллюстративной формах все основные положения и полученные результаты.

- Диссертационная работа Р.Р. Назыровой 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 присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 в ред. от 28.08.2017г.
- Автор диссертационной работы Назырова Рузалия Равильевна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор технических наук (специальность 05.07.05), доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.Королева»

e-mail:shustov.st@yandex.ru



03.04.2018

С.А. Шустов

Подпись Шустова С.А. удостоверяю

Ученый секретарь, д.т.н., профессор



03.04.2018

В.С.Кузьмичёв

Почтовый адрес: Самара, ул. Московское шоссе д.54

Телефон: +7(846) 335-18-26; официальный сайт: www.ssau.ru; e-mail: ssau@ssau.ru