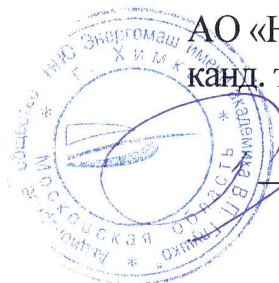


«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора -
Главный конструктор

АО «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко»,
канд. техн. наук



П.С. Лёвочкин

ОТЗЫВ

ведущей организации

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 темы.

Проектирование конкурентоспособных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) во многом определяется эффективностью используемых IT-технологий, одним из компонентов которых являются программные системы термогазодинамических расчетов. Программные системы термогазодинамических расчетов обеспечивают расчет идеальных параметров ЖРД, которые, с одной стороны, определяют предельно возможные его характеристики, с другой – представляют базу для расчета приближенных к реальности значений параметров. Надежный и точный расчет термогазодинамических параметров рабочего процесса в камере сгорания ЖРД невозможен без учета реальности смеси компонентов, а, следовательно, реальности составляющих их газов.

Необходимость выполнения многовариантных расчетов, связывающих идеальные параметры с приближенными к реальности, определяет и потребность в существенном увеличении скорости расчета.

Разработка новой и совершенствование существующих технологий термодинамических расчётов, учитывающих современное состояние физико-химических и математических теорий, а также возможности компьютерных и информационных технологий и позволяющих производить исследования рабочего процесса в камере сгорания ЖРД на качественно новом уровне – всё это определяет актуальность темы диссертации.

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

Во **Введении** показано, что в качестве корректной математической модели описания любого процесса выступает вариационная математическая модель, являющаяся обобщением известной классической модели. Продемонстрировано и обосновано на основе применения идей Л. Эйлера при решении вариационной задачи, что существуют такие сочетания исходных данных, когда применение метода Ньютона для решения экстремальной задачи исследования процесса некорректно.

Глава 1 содержит описание математических моделей процессов на основе положений существующих физико-химических теорий: результатов исследований И. Пригожина, исследований свойств моделей на базе функционального анализа, построение таблиц конечных разностей, предлагаемых автором работы в качестве расширения известных таблиц П.И. Бриджмена. Сформулированы и поставлены экстремальные задачи в многомерном евклидовом пространстве как базис математических моделей в известной классической постановке и задачи вариационного исчисления в многомерном функциональном пространстве как основа вариационных математических

моделей в новой обобщенной постановке. Доказано, что решение любой из классических задач в конечном итоге базируется на решении задач линейного или выпуклого программирования, что позволяет достаточно просто и быстро обосновывать применимость математических моделей для описания процессов при заданных исходных данных. Обосновано, что разрешимость задачи вариационного исчисления определяется разрешимостью соответствующей классической задачи.

Таким образом, показано, что в случае невозможности решения задачи методом Ньютона можно применять методы выпуклого и линейного программирования.

В процессе построения таблиц конечных разностей получены инвариантные соотношения, применение которых позволяет оценить точность расчетов характеристик. Выведены формулы расчета частных производных, например скорости звука в более рациональной, по сравнению с известными представлениями, форме. По результатам анализа математических моделей, включающих уравнения состояния реального газа, выведены формулы расчета параметров для варианта осреднения интегралов в вариационной модели описания процессов.

Глава 2 посвящена описанию и обоснованию принятых методов расчета. Для обеспечения непрерывности и дифференцируемости функций смеси введены соотношения для расчета свойств «несуществующих» веществ. В процессе исследований по оценке эффективности разрабатываемых численных методов анализируются характеристики топливных композиций, включающих компоненты O_2 , AT , Воздух, H_2 , $НДМГ$, $РГ - 1$, Этиловый спирт ($95\%C_2H_5OH + 5\%H_2O$).

При разработке метода расчета параметров смеси веществ при известных давлении и температуре:

1. Получены оригинальные критерии сходимости метода Ньютона.

2. Обоснована эффективность решения экстремальной задачи на основе суперпозиции метода условного градиента для расчета начального приближения для метода Ньютона и Лагранжа-Ньютона,

3. Показано, что связка методов условного градиента и Лагранжа-Ньютона обеспечивает справедливость равенства химических потенциалов веществ в различных агрегатных состояниях.

4. Обоснована необходимость и решена задача аппроксимации виртуальных коэффициентов.

При разработке методов расчета параметров смеси веществ при известных давлениях, энтальпии или энтропии, отмечено:

1. Существование таких исходных данных, что экстремальная задача классической математической модели не разрешима,

2. Исходная энтальпии или энтропия наиболее близко расположены к минимально возможным значениям, соответственно, энтальпии и линейной части энтропии.

Глава содержит достаточно большое количество результатов аналитических и численных результатов исследований, оформленных в форме таблиц, рисунков и последовательностей итерационных численных данных, позволяющих исследователю проверить полученные результаты. Например, рисунки по исследованию скорости расчетов демонстрируют существенное увеличение скорости расчетов при переходе к новым давлениям и температурам, изменения энтальпии и энтропии при переходе от учета уравнения состояния идеального газа к учету уравнения состояния реального газа. Отмечено, что результаты расчетов совпадают с известными справочными данными.

Глава 3 включает результаты исследования параметров процесса течения в сопле камеры сгорания ЖРД для различных топлив, исходных данных и математических моделей. При этом для расширенного набора топливных композиций установлено, что любая из задач поиска наибольшего значения

удельного импульса в пустоте может быть определена как задача поиска мажоранты в пучке кривых.

Представлены результаты решения задач для проблемных составов топливных композиций, а именно, Кислород+Алюминий, Кислород+Бериллий.

Показано, что при учете уравнения состояния реального газа относительные отклонения расчетных значений скорости потока и удельного импульса в пустоте от максимального абсолютного значения не превышают 0,3%, что согласуется с известными экспериментальными данными.

Научная новизна исследований.

Научная новизна исследований определяется следующими, полученными в диссертационной работе, результатами:

1. Сформулировано и показано, что в основу термодинамического расчёта параметров реагирующих смесей веществ, участвующих в процессе течения в сопле камеры сгорания ЖРД, могут быть положены вариационные принципы механики.

2. Доказано, что в основу термодинамический расчета параметров реагирующих систем, находящихся в некотором равновесном состоянии, описываемом давлением и энтальпией или энтропией, может быть положен поиск температуры, принадлежащей достаточно малой окрестности решения, с помощью известных соотношений аналитической геометрии и методов выпуклого программирования, обеспечивающих решение задач вариационных принципов поиска миноранты.

3. Доказано, что увеличение надежности, точности и скорости расчета обеспечивается применением:

1) суперпозиции метода условного градиента и метода Лагранжа-Ньютона;

2) методов линейного программирования при расчете минимальных значений энтальпии и линейной части энтропии для любой фиксированной температуры.

4. Показано, что для любых допустимых давлений и температур существуют такие окрестности решения, где состав реагирующей смеси веществ остается с приемлемой точностью постоянным. Это позволяет существенно упростить расчет параметров 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, теоретическая и практическая значимость результатов.

Достоверность проведенных исследований определяется тем, что в их методологическую основу положен междисциплинарный поиск решения задач термодинамического расчета параметров сопла камеры ЖРД, опирающихся на фундамент знаний теории ЖРД, термодинамики (классической, химической, технической), механики жидкости и газа, классического математического и функционального анализа, выпуклого и невыпуклого программирования и вариационного исчисления. Для аналитических, численных и информационных исследований применены методы математического моделирования, численные методы решения экстремальных задач и систем линейных и нелинейных уравнений, методы конструирования объектно-ориентированных программных компонентов. Применение фундаментальных положений физико-химических и математических теорий, положений теории ЖРД, использование банка данных ИВТАНТЕРМО, совпадение результатов расчетов с приемлемой точностью с данными всемирно признанного 10-томного справочного издания Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. и др. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник в 10т./ под. Ред. Акад. В.П. Глушко М.: Изд. ВИНТИ АН СССР, 1971-1979. (полученными без привлечения метода “больших молекул”), а также другими известными справочными данными определяют высокий уровень достоверности результатов теоретических и практических исследований.

Теоретическая значимость работы заключается в формировании направления исследований по термогазодинамическим расчетам с применением вариационных принципов механики

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке программно-информационных систем математического моделирования термогазодинамических процессов, по которым получено шесть свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ. IT-технологии внедрены в практику работы ряда ведущих предприятий ракетно-космической отрасли, а также интегрированы в программные комплексы отраслевой методики определения удельного импульса тяги ЖРД (ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша”).

Апробация и публикация результатов.

Результаты работы в полном объеме опубликованы в более, чем 80 публикациях, включая журналы из списка ВАК. Работа прошла апробацию на 31 семинарах и конференциях республиканского, российского и международного уровней.

Замечания.

По содержанию работы можно сделать следующие замечания.

1. В настоящее время, учитывая современный уровень вычислительных средств, ряд исследований необходимо провести не только в одномерной, но и в трехмерной постановке задач.

2. Эффективность разработанных средств демонстрируется на усеченном количестве топливных композиций.

3. Отсутствуют расчеты, привязанные к конкретной геометрии сопла камеры ЖРД.

Перечисленные недостатки не снижают уровень научной и практической значимости диссертационной работы, написанной на высоком профессиональном уровне, содержащей большой объем информации по решению

задач в численной и аналитической формах, подтверждающий эффективность предлагаемых методов.

Заключение.

Диссертационная работа Назыровой Рузалии Равильевны выполнена на актуальную тему, представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новые научно обоснованные решения, которые вносят значительный вклад в развитие вычислительных методов термогазодинамики, обеспечивают повышение надежности, точности и скорости расчета рабочего процесса в камерах ЖРД.

По своему содержанию, научной новизне и практической значимости диссертационная работа соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям и автор, Назырова Рузалия Равильевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании собрания специалистов отдела термогазодинамики и детонационного горения НИЦ, протокол № 45 от 15 марта 2018 года.

Заместитель начальника научно-исследовательского центра,
д-р техн. наук

Д.С. Мартиросов

Начальник сектора термогазодинамики,
канд. техн. наук

В.Д. Гапонов

Подлинность подписей Д.С. Мартиросова и В.Д. Гапонова удостоверяю.

Ученый секретарь специализированного диссертационного совета
ДС 403.009.01, канд. техн. наук



Е.Н. Семина