

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Грибиненко Дмитрия Валерьевича «Математическое моделирование тепломассообмена в термохимически неравновесных потоках при полёте высокоскоростных летательных аппаратов», представленную на соискание ученой кандидата технических наук по научной специальности 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Диссертационная работа Грибиненко Дмитрия Валерьевича посвящена исследованиям в области вычислительной аэрогазотермодинамики и направлена на развитие математических моделей и численных методов, описывающих физико-химические процессы, протекающие в термохимически неравновесных потоках, возникающих при полёте высокоскоростных летательных аппаратов.

Разработка вычислительных моделей, позволяющих провести оценку аэродинамических и тепловых нагрузок для высокоскоростных летательных аппаратов, в настоящее время имеет большую **актуальность**. Моделирование движения высокоскоростных летательных аппаратов в плотных слоях атмосферы требует учёта теплофизических свойств и физико-химических процессов, характерных для высоких температур и течений с сильными ударными волнами. Таким образом, выбранное автором направление исследования представляет значительный научный интерес и практическую значимость.

Объём диссертационной работы составляет 171 лист. Состоит работа из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. В работе имеется 101 рисунок и 19 таблиц, список литературы содержит 201 наименование.

Во **введении** показана актуальность и практическая значимость работы, формулируются цель и задачи исследования.

В **первой главе** проведен анализ развития моделей вычислительной аэрогидродинамики и тепломассообмена в термохимически неравновесных потоках. Описаны основные физико-химические процессы и их влияние на параметры потока в двигателях летательных аппаратов и при входе космического корабля в атмосферу. Приведены основные математические модели турбулентного горения. Выделяются главные направления и проблемы в области численного моделирования высокоскоростных течений.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

30 11 2022

Во **второй главе** представлены основные уравнения, описывающие течение вязкого химически реагирующего колебательно неравновесного газа. Рассмотрены вопросы, связанные с колебательной релаксацией. Проанализированы основные составляющие полной энергии в химико/термически неравновесных потоках. Введено понятие термодинамической энергии и выведено уравнение ее сохранения. Представлены формулы для вязких напряжений и тепловых/диффузионных потоков. Проанализированы основные реакции горения водорода и окиси углерода в воздухе и кинетика реакций при входе спускаемого аппарата в атмосферу Земли. Представлена методика учёта влияния турбулентности на скорости химических реакций.

В случае протекания в высокотемпературном газовом потоке неравновесных химических процессов, газ рассматривается как смесь химически реагирующих газов с конечными скоростями реакций. В решаемой системе уравнение сохранения массы газовой смеси записывается относительно сохранения массы химических компонент газа.

В **третьей главе** формулируется численный метод решения систем уравнений газовой динамики, химической кинетики и энергетических мод. Описаны основные методы расщепления уравнений для невязкого потока. Получено конечно-объёмное уравнение, учитывающее невязкие члены и вязкие потоки. Описаны методы решения системы алгебраических уравнений с разреженной матрицей. Разработан численный метод решения системы уравнений с жёсткими источниками.

В **четвертой главе** проведён анализ современных особенностей вычислительных систем и видов взаимодействия процессов при реализации параллельных вычислений. Описаны архитектурные решения, применённые в последовательной версии программного кода Universe3D и учитывающие современные особенности вычислительных систем. Описаны основные отличия параллельной и последовательной версий программного кода Universe3D. Проведён расчёт функции сильной масштабируемости параллельной версии программного кода Universe3D.

В **пятой главе** на основе разработанной и апробированной в предыдущих главах математической модели высокоскоростных потоков было решено

несколько практических задач и выработаны рекомендации по совершенствованию изделий новой техники. Основные решаемые задачи соответствуют моделированию следующих процессов:

- обтекание спускаемого аппарата OREX,
- обтекание сферы диаметром 1 см высокоскоростным потоком газа,
- течение в донной области ЛА,
- сверхзвуковое горение водорода в канале,
- модельный прямоточный воздушно-реактивный двигатель,
- рабочий процесс в прямоточном двигателе гипотетического космического летательного аппарата, предназначенного для работы в атмосфере Юпитера

В заключении сформулированы основные выводы и результаты проведенных численных исследований.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Построена математическая модель теплообмена в нестационарных, вязких, химически реагирующих, термодинамически неравновесных течениях.
2. Построен численный метод решения системы уравнений газовой динамики, химической кинетики и энергетических переходов на неструктурированной сетке.
3. Разработан новый эффективный полностью связанный численный метод решения уравнений движения химически и термически неравновесного газа с жёсткими источниками.
4. На основе построенного численного метода реализован новый компьютерный код на языке Фортран с применением параллельных вычислений, позволяющий проводить расчёт параметров течения и теплообмена в термодинамически неравновесных течениях.
5. Выработаны методические рекомендации по организации параллельных вычислений при численном решении уравнений механики сплошной среды, направленные на ускорение расчётов.
6. Проведены верификация и валидация численного метода путём сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными и результатами расчётов других авторов.
7. Проведено численное исследование высокоскоростных течений с помощью

разработанного компьютерного кода Universe3D. Выполнен сравнительный анализ реализованных математических моделей учёта физико-химических процессов в высокотемпературном газе.

8. Разработана схема двигателя и рекомендации по созданию двигателя для полетов в атмосфере Юпитера.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанный компьютерный код Universe3D может быть использован для решения широкого круга задач, возникающих при расчёте высокоскоростных летательных аппаратов, с высокой точностью и за приемлемое время, обеспечиваемое применением параллельных вычислительных технологий.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов численного моделирования подтверждена верификацией и валидацией, проведенной с использованием точных аналитических решений и расчётов других авторов, а также сравнением с экспериментальными данными.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. Понятие термодинамической энергии и соответствующее уравнение (Глава 2) описаны излишне скупно, без разъяснения мотивации.

2. В Таблицах 5.11 и 5.12 диссертации (табл. 5 и 6 автореферата) в графе температура присутствует опечатка, не соответствующая ни физическому смыслу, ни последующим рисункам.

Указанные замечания не снижают актуальности и значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему. Работа выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне, её научные положения и выводы достаточно обоснованы. Проведенные исследования имеют практическую значимость при решении задач моделирования высокоскоростных течений. Результаты работы докладывались на многочисленных научных конференциях и опубликованы в трех статьях в научных журналах, принадлежащих списку ВАК.

Выводы в работе отражают основные результаты исследований.

Автореферат правильно отражает содержание работы.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника, а её автор, Грибиненко Дмитрий Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Главный научный сотрудник
ПАО «РКК «Энергия»
доктор физико-математических наук,
доцент



Алексеев Алексей Кириллович

141070, Московская область, г. Королёв, ул. Ленина, д. 4А
Тел. +7(495) 513-68-19
Эл. почта: post@rsce.ru

Подпись официального оппонента, главного научного сотрудника, доктора физико-математических наук Алексеева А.К. заверяю

Ученый секретарь ПАО «РКК «Энергия».

доктор физико-математических наук



Хатунцева Ольга Николаевна

С Орденом знака отличия 30.11.2022 г.

