

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Мартыненко Сергея Ивановича на диссертационную работу Грибиненко Дмитрия Валерьевича «Математическое моделирование тепломассообмена в термохимически неравновесных потоках при полёте высокоскоростных летательных аппаратов», представленную в диссертационный совет 24.2.327.06 на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14. — «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Актуальность темы диссертационной работы

В современном математическом моделировании прослеживаются две устойчивые тенденции: 1) более детальное математическое описание отдельных физико-химических процессов; 2) математическое моделирование совокупности сложных физико-химических процессов (multiphysics simulation), протекающих в технологическом оборудовании или двигательных установках (real-life problems). Особую значимость приобретают проблемы, которые трудно математически описать с использованием допущений механики сплошных сред. Поэтому каждый новый метод численного исследования подобных проблем и полученные результаты моделирования представляют не только научный, но и практический интерес.

Диссертационная работы Грибиненко Д.В., посвящена моделированию тепломассообмена в термохимически неравновесных потоках при полёте высокоскоростных летательных аппаратов. Актуальность диссертации обусловлена необходимостью решения комплекса научно-технических проблем, возникающих при создании высокоскоростных летательных аппаратов, к которым относится построение математических моделей высокого уровня физико-химических процессов в авиационно-космической технике и развитие параллельных методов численного решения начально-краевых задач.

Обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность полученных результатов обусловлена корректным и достаточно строгим использованием методов математического моделирования. Полученные результаты широко обсуждались на международных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением результатов расчётов с данными экспериментов других авторов.

Научная новизна и практическая значимость полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы заключается

- в построении математической модели тепломассообмена в нестационарных, вязких, химически реагирующих, термодинамически неравновесных течениях;
- в разработке численного метода решения системы уравнений газовой динамики и химической кинетики на неструктурированных сетках;
- в разработке численного метода решения уравнений движения химически и термически неравновесного газа;
- в построении параллельного алгоритма для расчёта тепломассообмена в термодинамически неравновесных течениях;
- в результатах численного исследования высокоскоростных течений с помощью разработанного компьютерного кода Universe3D;
- в разработке схемы двигателя и рекомендации по созданию двигателя для полетов в атмосфере Юпитера.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в возможности моделирования термодинамически неравновесных потоков при создании перспективных образцов высокоскоростных летательных аппаратов.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Грибиненко Д.В. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём представленной работы составляет 171 лист, включая 101 рисунок и 19 таблиц. Список литературы содержит 201 наименование.

Во *введении* обосновывается актуальность работы, определяются цели и задачи работы.

В *первой главе* представлен обзор современного состояния исследований в данной области. Проведён анализ развития моделей вычислительной гидродинамики и тепломассообмена в термодинамически неравновесных потоках. Выделены основные направления и проблемы в области разработки инструментов численного моделирования высокоэнергетических течений.

Во *второй главе* приведены основные уравнения, описывающие течение вязкого химически реагирующего, термохимически неравновесного газа. Приводится анализ основных составляющих полной энергии в термохимически неравновесных потоках. Представлены формулы для вязких напряжений тепловых и диффузионных потоков. Представлена методика учёта влияния турбулентности на скорости химических реакций.

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

В *четвёртой главе* проведён анализ современных особенностей вычислительных систем и видов организации параллельных вычислений. Описаны архитектурные решения разработанного программного кода. Выработаны рекомендации по эффективному применению параллельных вычислений.

В *пятой главе* с помощью разработанной методики расчёта тепломассообмена в термохимически неравновесных потоках решается несколько экспериментальных задач, результаты расчёта сравниваются с экспериментальными данными. Также проводится расчёт схемы двигателя для полётов в атмосфере Юпитера.

В целом диссертация Грибиненко Д.В. является завершённым исследованием, представляет решение актуальных задач, объединённых общим подходом и обеспечивает возможность моделирования тепломассообмена в термохимически неравновесных потоках при полёте высокоскоростных летательных аппаратов. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника» по п.9: «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты».

Замечания по диссертации

Несмотря на высокий научный уровень, диссертационная работа не лишена недостатков, к которым можно отнести следующее:

1) В Главе 1. (обзор литературы) не отражено современное состояние математического моделирования тепломассообмена в термодинамически неравновесных потоках при полётах высокоскоростных летательных аппаратов в США, ЕС, КНР и других странах. Какие результаты опубликованы в открытой печати? Какие модели, сетки и параллельные алгоритмы используют за рубежом?

2) Как вычислялось выражение F_{cent} ?

$$c = -0.4 - 0.67 \lg F_{cent}, \quad n = 0.75 - 1.27 \lg F_{cent}, \quad d = 0.14, \\ F_{cent} = (1 - a) \exp(-T / T^{***}) + a \exp(-T / T^*) + \exp(-T^{**} / T^*) \quad (2.44)$$

Для реакций 9, 15:

$$a = 0.5, \quad T^{***} = 1.0 \times 10^{-30}, \quad T^* = 1.0 \times 10^{30}, \quad T^{**} = 1.0 \times 10^{100} \quad (2.45)$$

3)

структурах. Размеры этих структур определяются соотношением:

$$\xi^* = C_{\xi} \left(\frac{v \varepsilon}{k^2} \right)^{1/4} \quad (2.56)$$

Как изменяется размер этих структур в пристеночной области ($y^+ \rightarrow 0$)?

4) Что нового в математической модели тепломассообмена, представленной в Главе 2, по сравнению с аналогичными моделями?

5)

Матрица Якоби A может быть диагонализирована подобным представлением

$$A = S^{-1} \Lambda S \quad (3.4)$$

По-видимому, здесь речь идёт о факторизации матрицы коэффициентов. В диссертации указаны три известных способа представления невязкого потока на j -ой грани, однако не ясно какой из них использован в вычислительном алгоритме.

6) Каков порядок конечно-объёмной аппроксимации по времени и пространству? Какова алгоритмическая трудоёмкость представленных методов решения СЛАУ? Какое характерное количество неизвестных образует вектор неизвестных?

7) Раздел 3.8 можно заменить фразой «Результирующая СЛАУ решена при помощи симметричного метода Гаусса–Зейделя».

8) Не вполне понятно, что автор подразумевает под жёсткостью источника в 3.9?

9)

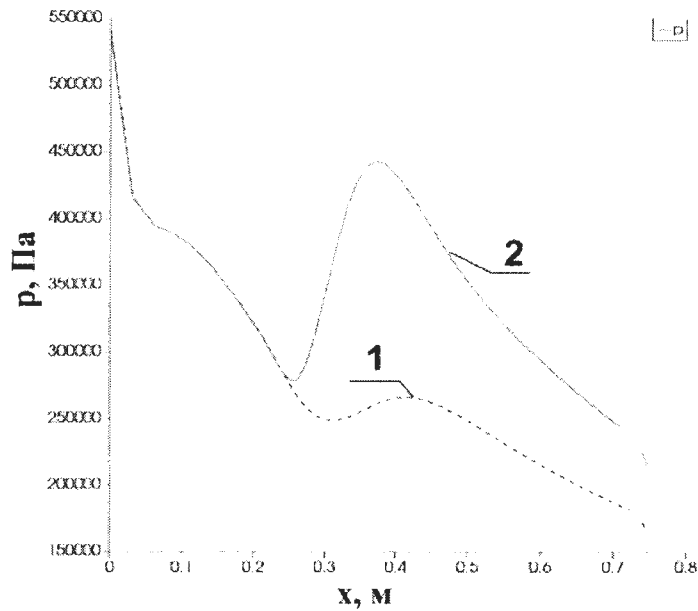


Рисунок 5.66 – Давление на верхней стенке. Номинальный режим (01, 02). 1 – расчёт БЕЗ учета химических реакций; 2 – расчёт С учетом химических реакций

Учёт химических реакций приводит к почти двукратному увеличению давления на верхней стенке в этом и последующих расчётах. Какова причина данного эффекта?

10) Заключение соответствует поставленным задачам, однако содержит только качественное описание полученных результатов. К сожалению, отсутствие количественного сравнения с аналогичными моделями и алгоритмами затрудняет оценку достигнутого прогресса в области построения математических моделей, развития численных методов и моделирования тепломассообмена в термохимически неравновесных потоках

Отмеченные замечания не снижают положительной оценки диссертационной работы. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 научных работах, в том числе 3 научные статьи в рецензируемых журналах, включенных ВАК в перечень ведущих периодических изданий.

**Заключение о соответствии диссертационной работы критериям,
установленным в Положении о присуждении учёных степеней**

Диссертационная работа Грибиненко Дмитрия Валерьевича, представленная на соискание ученой степени кандидата технической наук, является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи моделирования тепломассообмена в термохимически неравновесных

потоках, имеющей несомненную научную значимость для специальности 1.3.14. — «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Автореферат и публикации автора в полном объёме отражают содержание, выводы и результаты работы.

Считаю, что диссертация «Математическое моделирование теплообмена в термодинамически неравновесных потоках при полёте высокоскоростных летательных аппаратов» соответствует всем критериям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённом Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а её автор Грибиненко Дмитрий Валерьевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14. — «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Мартыненко Сергей Иванович,
ведущий научный сотрудник Лаборатории №8 (физического моделирования двухфазных течений) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединённый институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), д.ф.-м.н. (по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), профессор
Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
Тел: +7(916)9876-079
E-mail: Martynenko@icp.ac.ru, martyn_s@mail.ru

Подпись Мартыненко С.И. удостоверяю.

Заведующий лабораторией,
д.ф.-м.н.
чл.-корр. РАН



Вараксин А.Ю.

С отрывком от рукописи 3 6 01.12.2022г.