

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации



Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

«Московский государственный  
технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
Тел. (499) 263-63-91 Факс (499) 267-48-44  
E-mail: [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)  
ОГРН 1027739051779  
ИНН 7701002520 КПП 770101001

28.11.2022 № 01.03-10/133

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Председателю  
диссертационного совета 24.2.327.06  
на базе Московского авиационного  
института (национального  
исследовательского университета)  
доктору технических наук,  
профессору  
Ю.А. Равиковичу

Уважаемый Юрий Александрович!

Направляю Вам отзыв ведущей организации на диссертационную работу Грибиненко Дмитрия Валерьевича «Математическое моделирование тепломассообмена в термодинамически неравновесных потоках при полёте высокоскоростных летательных аппаратов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Приложение: отзыв на 7 л.

Проректор по науке и  
цифровому развитию



П.А. Дроговоз

Исп. А.Ю. Чирков  
17-79

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

02 12 2022

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке

и цифровому развитию

  
П.А. Дроговоз  
«28» 12 2022 г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

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

### Актуальность темы диссертационной работы

Диссертация Грибиненко Дмитрия Валерьевича посвящена исследованиям в области вычислительной термогазодинамики, направленным на развитие математических моделей и численных методов, используемых при решении задач моделирования высокоскоростных летательных аппаратов.

Разработка вычислительных моделей, позволяющих проводить расчеты газодинамических характеристик в условиях интенсивного нагрева высокоскоростных летательных аппаратов сложных геометрических форм в

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«02» 12 2022

настоящее время имеет большую актуальность. Помимо учёта физико-химических процессов немаловажным моментом является построение численного метода для расчёта течений с сильными ударными волнами. Таким образом, выбранное в диссертационной работе направление исследования представляет значительный научный интерес и практическую значимость.

### **Основное содержание диссертационной работы**

Диссертация 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 показана актуальность и практическая значимость работы, формулируются цель и задачи исследования.

В первой главе проведён анализ развития моделей вычислительной гидродинамики и тепломассообмена в термохимически неравновесных потоках. Описан механизм возникновения физико-химических процессов и влияние на параметры потока в двигателях летательных аппаратов и при входе космического корабля в атмосферу. Выделены основные направления и проблемы в области разработки инструментов численного моделирования гиперзвуковых течений. Приведены основные математические модели турбулентного горения.

Во второй главе представлены основные уравнения, описывающие течение вязкого химически реагирующего колебательно неравновесного газа. Рассмотрены вопросы, связанные колебательной релаксацией. Проанализированы основные составляющие полной энергии в химически и термически неравновесных потоках. Представлены формулы для вязких напряжений и тепловых и 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 третьей главе формулируется численный метод решения систем уравнений газовой динамики, химической кинетики и энергетических мод. Описаны основные методы расщепления невязкого потока. Получено уравнение, учитывающее невязкие члены и вязкие потоки. Описаны методы решения 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 взаимодействия при реализации параллельных вычислений. Описаны архитектурные решения, применённые в последовательной версии программного кода Universe3D, учитывающие современные особенности вычислительных систем. Описаны основные отличия параллельной версии программного кода Universe3D от последовательной.

В пятой главе приведены решения нескольких практических задач на основе разработанной и апробированной в предыдущих главах математической модели высокоскоростных потоков и даны практические рекомендации по совершенствованию изделий новой техники.

В заключении формулируются основные выводы по результатам проведенных в диссертации исследований.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Построена математическая модель тепломассообмена в нестационарных, вязких, химически реагирующих, термохимически 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 тепломассообмена в термодинамически неравновесных течениях.

5. Выработаны методические рекомендации по организации параллельных вычислений при численном решении уравнений механики сплошной среды, направленные на ускорение расчётов.

6. Проведена 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.

### **Обоснованность научных положений, достоверность полученных результатов.**

Достоверность научных положений подтверждается использованием законов сохранения массы химических компонентов, количества движения и энергии, теории численных методов; всесторонним тестированием разработанных численных методов и алгоритмов, исследованием устойчивости и сходимости решений на последовательности сгущающихся сеток; сравнением результатов расчётов с экспериментальными данными и результатами расчётов тестовых задач другими авторами.

### **Личный вклад автора**

При выполнении диссертационной работы автор принимал непосредственное участие в получении следующих результатов:

- Разработка метода расчёта тепломассообмена в нестационарных, вязких, химически реагирующих, термодинамически неравновесных течениях;

- Сопоставление результатов расчётов с данными экспериментальных исследований высокоскоростных течений;
- Участие в создании численного метода решения уравнений движения химически и термически неравновесного газа с жёсткими источниками;
- Создания высокопроизводительной и масштабируемой по объёму задачи и числу процессорных ядер программной реализации предложенного численного метода;
- Реализации программного кода Universe3D с использованием параллельных вычислений и с учётом особенностей современных вычислительных систем.

### **Практическая значимость результатов исследований**

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

По диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Построенный автором численный метод и программа, в которой он реализован, позволяют производить вычисления с одновременным учетом термической и химической неравновесности потока, но при этом вопрос их взаимного влияния практически не затронут.
2. Не обсуждается сравнение результатов численного моделирования химически неравновесного течения с расчетами химически равновесных течений с переменными теплофизическими свойствами.
3. Недостаточно оговорены границы применимости различных моделей химической кинетики, рассматриваемых в работе.
4. В задаче о спускаемом аппарате не обсуждается влияние теплообмена излучением.

Сделанные замечания не снижают актуальность и значимость полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы. Несмотря на имеющиеся замечания, работа выполнена на высоком научном уровне, а проведенные в работе исследования научно-обоснованы и имеют практическую значимость в области вычислительной термогазодинамики и теплообмена.

Основные результаты работы в достаточной степени отражены в научных публикациях, представленных соискателем ученой степени.

Диссертационная работа Грибиненко Дмитрия Валерьевича «Математическое моделирование тепломассообмена в термохимически неравновесных потоках при полёте высокоскоростных летательных аппаратов» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, которая посвящена актуальной научной проблеме, имеющей практическое и теоретическое значение. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне. Автореферат соответствует и в полном объёме отражает содержание диссертации. По научному уровню, полученным результатам, актуальности, практической и теоретической значимости, оформлению и содержанию диссертация полностью соответствует всем требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации № 426 от 20 марта 2021 г.) Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тема и содержание диссертации полностью соответствуют специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника. Автор работы, Грибиненко Дмитрий Валерьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника».


Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры теплофизики МГТУ им. Н. Э. Баумана, протокол № 3 от 09 ноября 2022 г. Результаты голосования: «за» – единогласно.

Заведующий кафедрой теплофизики,  
д.ф.-м. н., доцент



Чирков Алексей Юрьевич

Профессор кафедры теплофизики  
д.т.н., профессор



Гришин Юрий Михайлович

*С отзывом ознакомлен 02.12.2022г*

