



Государственная корпорация
по космической деятельности "Роскосмос"



Акционерное общество
"Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения" (АО "ЦНИИмаш")

ул. Пионерская, д. 4, корп. 22
г.о. Королёв,
Московская область, 141070

Тел.: +7 (495) 513 5951
Факс: +7 (495) 512 2100

e-mail: corp@tsniimash.ru
http://www.tsniimash.ru

ОГРН 1195081054310
ИНН / КПП 5018200994 / 501801001

11.11.2025 исх. № 09001-25752

На № _____ от _____

Председателю
диссертационного совета 24.2.327.08
на базе "Московского авиационного института
(национального исследовательского
университета)"
доктору физико-математических наук,
профессору
П.С. Красильникову
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, МАИ

Уважаемый Павел Сергеевич!

В соответствии с исх. от 03.10.2025 № 01-105-125 высылаю Вам отзыв официального оппонента А.Л. Кусова на диссертацию Н.И. Сергеевой на тему "Разработка физико-математических моделей для описания высоконеравновесных течений газовых смесей", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. "Механика жидкости, газа и плазмы".

Приложение:

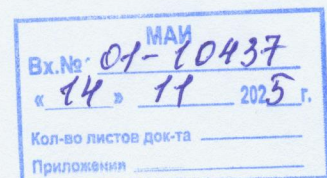
Отзыв официального оппонента, 2 экз. на 5 листах каждый.

Главный ученый секретарь института,
доктор технических наук

В.Ю. Ключников

Исп. Кусов А.Л.

тел.: 8(495)513-55-83, 8-916-356-01-40



ОТЗЫВ

официального оппонента

кандидата физико-математических наук

Кусова Андрея Леонидовича

на диссертационную работу Сергеевой Натальи Ивановны

"Разработка физико-математических моделей для описания высоконеравновесных течений газовых смесей", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9.

Механика жидкости газа и плазмы

Диссертационная работа Сергеевой Натальи Ивановны посвящена разработке физико-математических моделей течений с сильной неравновесностью. В качестве практического приложения рассматривается задача о структуре ударной волны и течения в микроканале с конденсацией газовых компонентов на его стенках. В качестве теоретической основы работы положены методы основанные на решении модельного кинетического уравнения и моментных уравнений.

Актуальность темы исследования

В сверхзвуковой аэродинамике часто возникает необходимость численного моделирования течений, в которых одновременно имеет место течение сплошной среды и разреженного газа, например, в струйных течениях, ударных волнах. Использование подходов, основанных на решении уравнения Больцмана, в том числе, метода прямого статистического моделирования Монте-Карло, затруднительно для условий сплошной среды, так как размер ячеек расчётной области должен быть порядка длины свободного пробега, а шаг по времени быть меньше времени свободного пробега молекул. Поэтому важна разработка физико-математических моделей течений на базе комбинации кинетических и сплошносредних методов описания динамики газовой среды.

Также в сверхзвуковой аэродинамике имеет неравновесное течение газа с отрывом температуры вращательных, колебательных, электронных степеней свободы от поступательной. В ряде случаев эффект неравновесности течения может оказывать существенное влияние на конвективные и лучистые тепловые потоки, поэтому явление неравновесности является предметом активных исследований в физической литературе. Таким образом разработка физико-

математических моделей для описания неравновесных течений является актуальной.

Содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (93 источника) и списка сокращений. Объем составляет 105 страниц, 47 рисунков.

Во введении автором обоснована актуальность темы и направления исследований, сформулированы основные цели и задачи работы, показаны научная новизна и ценность результатов, выносимых на защиту. Анализируются модели, используемые при численном моделировании течений сплошной среды и разреженных газов. Описаны неточности, которые возникают при использовании моделей сплошной среды в переходной области течения от сплошной среды к свободномолекулярному потоку. В частности, указывается на неправильность использования уравнений Навье-Стокса в слое Кнудсена около обтекаемых газом поверхностей, а также сложность постановки граничных условий в рамках сплошной среды для реакций испарения-конденсации молекул на поверхности. Указывается на важность исследования структуры ударных волн, так как неравновесные процессы оказывают существенное влияние на структуру ударной волны.

В первой главе рассматривается кинетическое уравнение для описания течения многокомпонентных газов, состоящих из многоатомных молекул. Дано описание его численного решения. Проведено тестирование предложенной математической модели путём сравнения с экспериментальными данными и с методом прямого статистического моделирования на примере задачи о профиле ударной волны.

Во второй главе на основе модельного кинетического уравнения для смеси многоатомных газов получена система моментных уравнений для каждого компонента смеси многоатомных газов. Описано построение численного решения полученных уравнений. Проведено тестирование моментных уравнений путём сравнения с решением модельного кинетического уравнения на примере задачи о профиле ударной волны в газовой смеси, состоящей из атомов и многоатомных молекул.

В третьей главе рассмотрена структура ударной волны в бинарных смесях газов, состоящих из атомов и многоатомных молекул при различном соотношении концентраций компонентов.

В четвёртой главе решается задача о течении многокомпонентного газа в микроканале с поглощающими стенками в переходной области течения от сплошной среды к разреженному газу. В основной области течения решаются уравнения Навье-Стокса, а в слое Кнудсена решается кинетическое уравнение с граничным условием испарения-конденсации на стенке.

В заключении диссертации подводятся итоги исследования, обсуждаются перспективы и направления дальнейших разработок, приводятся рекомендации по практическому применению разработанных моделей.

Достоверность и новизна полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждена сравнением расчетов с экспериментальными данными и расчётами методом прямого статистического моделирования.

В диссертационной работе предложен метод описания течений высокой степени неравновесности в ударных волнах и микроканалах при наличии реакций испарения-конденсации.

Научная и практическая значимость работы

Разработаны физико-математическая модель течения и схема численного решения полученной системы уравнений для расчётов тепловых нагрузок на ЛА для условий, когда отклонение от сплошной среды существенно влияет на структуру течения.

Общая оценка диссертационной работы

Область исследования диссертационной работы Сергеевой Натальи Ивановны соответствует следующим направлениям паспорта научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы:

- течения сжимаемых сред и ударные волны;
- динамика разреженных газов и молекулярная газодинамика;
- аэродинамика и теплообмен летательных аппаратов;
- тепломассоперенос в газах и жидкостях;
- аналитические, асимптотические и численные методы исследования уравнений кинетических и континуальных моделей однородных и многофазных сред.

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему. Материал диссертации изложен логично и аргументировано. Автореферат диссертационной работы и публикации автора полностью отражают содержание диссертации и соответствуют требованиям ВАК. Результаты работы с достаточной полнотой опубликованы. Результаты, полученные в ходе диссертационной работы, представляют практическую ценность.

Замечания по диссертационной работе:

1. Формула (1.3) выражения диаметра столкновения частиц разных сортов через диаметры столкновений молекул одного сорта является оценочной, а автор фактически использует эту формулу как точную.
2. Подбор диаметров столкновений по вязкости, может дать ошибки при определении бинарных коэффициентов диффузии, т.к. число Шмидта может оказаться отличающимся в разы, лучше было бы использовать работы, в которых определялись сечения столкновения для земной и марсианской атмосфер:
 - Wright M.J., Bose D., Palmer G.E., Levin E. Recommended Collision Integrals for Transport Property Computations, Part 1: Air Species // AIAA Journal, vol. 43, No. 12, 2005, pp. 2558-2564.
 - Wright M.J., Hwang H.H, Schwenke D.W. Recommended Collision Integrals for Transport Property Computations Part 2: Mars and Venus Entries // AIAA Journal, vol. 45, No. 1, 2007, pp. 281-288.
3. Не описано как автор обошёл условие инвариантности одномерной ударной волны к сдвигу по координате (трансляции) и необходимость стабилизировать ударную волну в расчётной области, не было ли эффекта размазывания ударной волны за счёт её перемещения внутри расчётной области.
4. Нет чёткого обозначения какого порядка схема использовалась для численного решения полученного модельного кинетического уравнения, если схема первого порядка, есть ли уверенность у автора что численные вязкость и диффузия не превышают физические вязкость и диффузию.
5. Показатель адиабаты для многоатомных молекул существенно зависит от температуры газа, в параграфах 2.2 и 3.5 он не указан, также не ясно как моделируется возбуждение колебательных степеней свободы молекул.
6. В расчётах структуры ударной волны в смеси газов не учтена термодиффузия.

Заключение

Диссертационная работа Сергеевой Натальи Ивановны "Разработка физико-математических моделей для описания высоконеравновесных течений газовых смесей" представляет собой законченное научное исследование, посвященное решению актуальной задачи, имеющей значение в области молекулярной газодинамики, характеризующееся научной новизной и практической ценностью. Диссертационная работа выполнена с использованием современных методов аналитического и численного исследования, написана квалифицированно и аккуратно оформлена.

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работы. Диссертационная работа соответствует требованиям ВАК РФ, в том числе, установленным п. 9 Положения "О порядке присуждения ученых степеней" № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор, Сергеева Наталья Ивановна, заслуживает присвоения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,

начальник лаборатории АО "ЦНИИмаш",
кандидат физико-математических наук



А.Л. Кусов

Контактные данные:

Кусов Андрей Леонидович, тел. 8-916-356-01-40, 141070, г. Королёв, ул. Пионерская, д.4, kusoval@tsniimash.ru, специальность - 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Место работы:

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО ЦНИИмаш)

Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, дом 4

Тел./факс: 8 (495) 513-59-51, 512-21-00

E-mail: corp@tsniimash.ru, press@tsniimash.ru

Подпись Кусова А.Л. удостоверяю

Главный ученый секретарь АО "ЦНИИмаш"

доктор технических наук

5



В.Ю. Ключников

С отзывом ознакомлена 14.11.2025 г. Сергеева Н.И.