



Государственный научный центр Российской Федерации  
Федеральное автономное учреждение

**ЦЕНТРАЛЬНЫЙ  
АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени профессора Н.Е. Жуковского  
ФАУ «ЦАГИ»**

Жуковского ул., д. 1, г. Жуковский, Московская область, 140180  
тел.: +7 495 556-4303, факс: +7 495 777-6332, www.tsagi.ru  
ОГРН 1225000018803, ИНН 5040177331, КПП 504001001, ОКПО 50205960

*30.11.2022 № АМ 40/8-10-11395*

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Председателю Совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 24.2.327.08 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» д.ф.-м.н., профессору

П. С. Красильникову

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе,  
д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ

Уважаемый Павел Сергеевич!

Высылаю отзыв нашей организации, утвержденной в качестве ведущей, по диссертации Березко Максима Эдуардовича на тему «Физико-математические модели пристеночных течений в расширенном кнудсеновском слое», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы в диссертационном Совете 24.2.327.08 при ФГБОУ ВО «МАИ (национальный исследовательский университет)».

Диссертация и отзыв рассмотрены и одобрены на заседании научного семинара Сектора №11 «Неравновесных течений разреженного газа и плазмы», Отделения №8 «Аэротермодинамики гиперзвуковых течений» ФАУ ЦАГИ.

Приложение: Отзыв на 6 листах, 2 экз.

Первый заместитель генерального директора  
ФАУ «ЦАГИ»  
д.ф.-м.н., профессор

*С.В. Медведев*

А.Л. Медведевский

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

*01.12.2022г.*

004016

## УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель Генерального  
директора Государственного научного  
центра РФ ФАУ «Центральный  
аэрогидродинамический институт  
имени профессора Н.Е. Жуковского»,  
(ФАУ «ЦАГИ»)

д.ф.-м.н., профессор

Медведский Александр Леонидович



2022 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

**Березко Максима Эдуардовича**

### **ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРИСТЕНОЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ В РАСШИРЕННОМ КНУДСЕНОВСКОМ СЛОЕ**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 (Механика жидкости, газа и плазмы).

#### **Актуальность темы исследования:**

Современные аэрокосмические, вакуумные и нанотехнологии, а также ряд других областей техники нуждаются в совершенствовании вычислительных методов и математических моделей течений газа в широком интервале значений плотности, скорости, температур, чисел Маха и Кнудсена. Особенностью ряда газодинамических процессов является их существенная неравновесность, обусловленная быстрыми изменениями параметров газа, т.е. малым временем протекания этих процессов.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«01» 12 2022

Проблема постановки граничных условий на твердой поверхности для уравнений вязкого теплопроводного газа становится весьма актуальной в случае гиперзвуковых и умеренно разреженных течений. Сильный разогрев поверхностей, возникающий, например, при гиперзвуковом обтекании летательного аппарата, активизирует хемосорбционные процессы на его поверхности.

Технологии получения химически чистых веществ широко используют конденсацию отдельных компонент газовой смеси на охлаждаемых, часто – криогенных, поверхностях разделительной установки.

Самостоятельный интерес представляют процессы, протекающие в окрестностях поверхностей большой кривизны при их сверх- и гиперзвуковом обтекании. Острая кромка подвергается высокому аэродинамическому разогреву при сильно затрудненном теплоотводе, обусловленному формой кромки. В большинстве современных вычислительных пакетов такие кромки интерпретируются абсолютно острыми. Тем не менее на сегодняшний день не разработаны надежные математические модели, описывающие течения в окрестности особых точек, возникающих в процессе решения задачи обтекания острой кромки.

Таким образом, актуальность темы исследований Березко М.Э. не вызывает сомнений.

### **Научная новизна:**

Предложен метод описания высоко неравновесных течений в пристеночных областях, описывающий взаимодействие газа с поверхностью на молекулярном уровне.

Показано, что в качестве гидродинамической составляющей кинетико-гидродинамических моделей целесообразно использовать модель Навье-Стокса-Фурье. Повышение порядка моментного уравнения в задачах этого класса не позволяет повысить точность расчетов.

Разработан метод решения модельного кинетического уравнения в окрестности абсолютно острой кромки, позволяющий учитывать разрывы функции распределения в расширенном кнудсеновском слое.

#### **Теоретическая и практическая значимость исследований:**

Изучены основные свойства кинетико-гидродинамической модели применительно к пристеночным течениям.

Получено численное решение задачи обтекания поверхности большой кривизны.

Практическая значимость работы заключается в возможности разработки вычислительных ядер CFD-пакетов, ориентированных на расчеты высокоскоростных и разреженных течений.

#### **Достоверность результатов:**

подтверждена сравнением полученных расчетных данных с данными экспериментальных и расчетных исследований разных авторов.

#### **Объём и структура диссертации:**

Диссертация состоит из введения, списка сокращений и условных обозначений, трёх глав, заключения и библиографического списка. Общий объём составляет 102 страницы, включая 33 рисунка. Библиографический список содержит 104 наименования. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, номер темы FSFF-2020-0013.

**Во введении** обоснована актуальность в разработке эффективных методов расчёта течений высокой неравновесности однокомпонентных газов, сформулированы цель и задачи работы, выделена научная новизна и теоретическая значимость работы, представлена общая структура диссертации.

**В первой главе** рассматривается метод комбинирования гидродинамической и кинетической моделей. Разработан метод комбинирования моделей для многоатомных газов. Проведён анализ результатов при использовании в

качестве гидродинамической модели систем моментных уравнений различных порядков.

В качестве гидродинамической модели использована система моментных уравнений неполного 2-го порядка, которая соответствует модели Навье-Стокса-Фурье (НСФ).

**Во второй главе** проведен анализ различных граничных условий на твёрдой стенке для гидродинамической и кинетической моделей. В качестве тестовой задачи выбрано плоское течение Куэтта, а для величины сравнения – коэффициент трения, отнесенный к его теоретическому пределу в свободномолекулярном режиме течения. Выбор этой величины обуславливается её важностью для практических задач.

Для гидродинамической модели НСФ выбирались граничные условия прилипания и скольжения пограничного слоя. Для кинетической модели – диффузный закон отражения молекул от твёрдой стенки.

**В третьей главе** исследуется гиперзвуковое обтекание бесконечно тонкой пластины с нулевым углом атаки. Основное внимание уделено течению в окрестности особой точки с позиций молекулярно-кинетической теории газов. Особой точкой считается точка разделяющая набегающий поток от носика пластины.

Математическую модель обтекания тонкой пластины построена в полярных системах координат как в геометрическом, так и скоростном пространствах. Для численного решения используется модельное кинетическое уравнение многоатомных газов в интегральной форме. Решение строится вдоль траекторий молекулярных потоков.

**В заключении** перечислены основные результаты и выводы по диссертационной работе, намечены дальнейшие численные исследования.

#### **Замечания:**

- 1. Не понятно, откуда взялась схема на рисунке 1?*

2. На рисунке 9 стр. 48 представлена зависимость от числа Кнудсена отношения коэффициента трения к коэффициенту трения в свободномолекулярном пределе. Из представленных данных не ясен их предел при значениях числа Кнудсена, стремящихся к бесконечности.

3. В главе 2 рассмотрено влияние различных граничных условий на примере одномерного течения. В главе 3, помимо течения в окрестности особой точки, рассматривается двумерное течение вдоль пластины. Целесообразно, используя методологию главы 2, рассмотреть влияние различных граничных условий на параметры течения в данной задаче. Для сравнения результатов имеется обширный материал различных авторов, в том числе, сотрудников ЦАГИ.

4. В тексте диссертации замечены следующие опечатки и неточности:

- на стр.5, 7, 24, 55, 58, 69,70, 74, 78,88 пропущены пробелы;
- на стр.89, 100 пропущены буквы в словах "использования" и "суммирование".

#### **Заключение:**

Диссертация является научной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. Диссертационная работа содержит достаточное количество данных, рисунков, графиков, примеров. По каждой главе и работе в целом имеются выводы. Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему и соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней». Диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Березко Максим Эдуардович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Доклад по теме диссертации заслушан на видео семинаре по аэромеханике ЦАГИ - ИТПМ СО РАН - СПбПУ - НИИМ МГУ - ОИВТ РАН, 04.10.2022.

Отзыв подготовил д.ф.-м.н., доцент Горелов Сергей Львович. Диссертация и отзыв рассмотрены и одобрены на заседании научного семинара Сектора №11 “Неравновесные течения разреженного газа и плазмы”, Отделения №8 “Аэротермодинамика гиперзвуковых течений” ФАУ ЦАГИ.

Начальник Сектора № 11

к.ф.-м.н., доцент

Здор Александр Геннадиевич

Автор отзыва:

Ведущий научный сотрудник Сектора № 11

д.ф.-м.н., доцент

Горелов Сергей Львович

Государственный научный центр РФ  
ФАУ

«Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е.  
Жуковского»  
(ФАУ «ЦАГИ»)

Почтовый адрес: 140180, Россия, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1.  
Телефон: 8 (495) 556-41-70, факс: 8 (495) 777-63-32  
Эл. почта автора отзыва: e-mail: gorelovsl@yandex.ru

С отзывом ознакомлен  
04.12.2022